

29/36

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**



**GENERALIDADES ACERCA DE LOS TUNELES  
DE TRANSITO.**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**  
**P R E S E N T A :**  
**OSCAR FERNANDO PINELO LOPEZ**

**RECIBO EN VENTA  
FALTA DE ORDEN  
NO SE PUEDE**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## INDICE

	Pag.
I. INTRODUCCION	1
I.1. HISTORIA Y ANTECEDENTES DE LOS TUNELES	4
I.2. DESARROYO HISTORICO DE TUNELES EN MEXICO	9
II TUNELES DE TRANSITO	17
II.1 CARACTERISTICAS DE LOS TUNELES	21
II.2 CLASIFICACION DE TUNELES	35
II.3 JUSTIFICACION DE LA CONSTRUCCION DE UN TUNEL.	39
III. PROYECTO EJECUTIVO	45
III.1 CONSIDERACIONES Y PARAMETROS GENERALES PARA DISEÑO	51
III.2 ETAPAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE TUNELES	60
III.3 ESTUDIOS PREVIOS	63
III.4 METODOS PARA EL DISEÑO DE TUNELES	67
IV PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS	70
IV.1 EXCAVACION DE TUNELES EN SUELOS FIRMES Y EN ROCA	73

IV.2	EXCAVACION DE TUNELES EN SUELOS BLANDOS	78
	TUNELES FALSOS	82
	TUNELES SUBACUATICOS	84
IV.3	REZAGA DE MATERIAL	87
IV.4	SISTEMAS DE SOPORTE	89
IV.5	INYECCIONES Y TRATAMIENTOS ESPECIALES	93
IV.6	INSTRUMENTACION	96
IV.7	SISTEMAS DE APOYO	99
IV	OPERACION DE TUNELES DE TRANSITO	100
V.1	ILUMINACION DE TUNELES DE TRANSITO	104
V.2	VENTILACION DE TUNELES DE TRANSITO	107
V.3	CONTROL	109
VI	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	111
	BIBLIOGRAFIA	115

## I INTRODUCCION

## I - INTRODUCCION

Un túnel es una estructura subterránea abierta artificialmente para librar cualquier obstáculo estableciendo así una comunicación por debajo de un monte, de un río ó del mar, ó simplemente por debajo del nivel del terreno natural. En su construcción puede emplearse una diversidad de metodologías, procurando siempre el mínimo de afecciones en la superficie y la mayor economía.

La ejecución de una obra de esta especie está ligada a la optimización de las alternativas de solución propuestas como parte integral de un sistema, en el que puede ser de gran relevancia. Así por ejemplo, su uso para conducción de fluidos tiene mucha importancia al constituirse como estructuras indispensables en proyectos de abastecimiento de agua potable, de drenaje, oleoductos y otros.

Su aplicación en la tecnología de vías terrestres atiene a las exigencias de pendientes y curvaturas que en algunos casos son muy rígidas. En el medio urbano su uso trasciende en la construcción de líneas para tren metropolitano y como libramientos de obstáculos e inclusive de ciudades enteras. En muchos países las intensidades de tránsito permiten por ser relativamente bajas, mayores desarrollos longitudinales con tal de evitar los costos de construcción, iluminación, --

ventilación, etc. que conllevan los túneles. Sin embargo, teniendo un buen balance de unos y otros factores, es muy probable que una mayor incidencia de estas estructuras resultasen con frecuencia la alternativa más económica y conveniente.

Es primordial prever que el túnel sea lo más económico posible, principalmente si es de gran longitud (del orden de 1000 m. o más), ya que requiere de una elevada inversión - debido a los altos costos que se tienen por metro lineal de túnel, lo que justifica gastos fuera de lo común en el proyecto. Este, requiere de estudios interdisciplinarios con su suficiente grado de detalle, a nivel de anteproyecto para obtener presupuestos confiables que en la medida de lo posible - retroalimenten el estudio de factibilidad económica para la decisión final y para la programación de la obra.

Considerando lo expuesto, en el presente trabajo se proyecta un panorama general de túneles y su desarrollo con el tiempo, concentrando posteriormente la atención en los túneles de tránsito. A continuación se comentan algunos parámetros y metodologías para diseño y los procedimientos constructivos más sobresalientes; la operación y el mantenimiento de túneles constituyen una fase importante del proyecto, y se examina al final de este estudio.

## I.1 HISTORIA Y ANTECEDENTES DE LOS TUNELES

Desde tiempos prehistóricos se han construido túneles, el hombre primitivo excavaba cuevas, acondicionaba o agrandaba las ya existentes.

Uno de los túneles más antiguos del que se tiene conocimiento, es el que se construyó bajo el reinado de Semirasis para pasar bajo el río Eufrates, comunicando al Palacio Real con el Templo de Jupiter en la antigua Babilonia hace aproximadamente unos 4000 años. Su longitud era de 1 km. con un gálibo vertical de 4.5 m. y ancho de 3.5 m. Obra admirable, ya que el siguiente túnel subacuático fué construido hasta 1843-bajo el Río Támesis, en Londres.

El uso de la pólvora fué introducido por primera vez - en la construcción de un túnel para el Canal Languedoc en --- Francia, hacia 1679 con fines de navegación. Anteriormente-- eran utilizados martillos y cuñas para romper la roca; ocasionalmente la roca era calentada y luego enfriada súbitamente - con agua fría para fracturarla como consecuencia de la con -- tracción rápida. La pólvora ya había sido usada medio siglo- antes en labores mineras en Selmaobánya, en Hungría.

El primer túnel ferroviario también fué construido en Francia en 1826, para dar paso a un tren jalado por caballos-

en la línea Roanne-Andressieux. El primer túnel para un tren de vapor fué construido en la línea Liverpool-Manchester entre 1826 y 1829.

La perforación hidráulica de la roca fué introducida durante la excavación del túnel MONT-CENIS, entre Francia e Italia, iniciado en 1857. Esta técnica pronto fué superada por la perforación neumática desarrollada por Somellier. Por esa misma época, en 1864 fué inventada la dinamita por Nobel.

Por lo que respecta a volúmen excavado, resultan de singular importancia: El túnel Gran Alpino sobre la línea ferrea Boloña-Florenca, en el que a lo largo de 11 años, 1'970, 000 m<sup>3</sup> de roca fueron extraídos. Con fines de navegación, cerca de Marsella, el túnel Rove para el que se excavaron 2 millones de metros cúbicos. El metro de Moscú requirió de excavaciones del orden de 4.5 millones de metros cúbicos, similares a los del "Tube" de Londres.

En cuanto al desarrollo de técnicas constructivas y de diseño, estas están ligadas a los túneles alpinos y posteriormente a los Italianos, dentro de los que destacan el Gotardo en Suiza, el Simplon entre Suiza e Italia y los ALBERGTUNNELS entre Viena y París.

Para esas épocas el estudio y diseño de los túneles --

prácticamente se reducía a una inspección geológica, que defi  
nía y caracterizaba cualitativamente las formaciones geológi  
cas en las que se realizaría la excavación. Basandose en la-  
experiencia, el geólogo hacía señalamientos acerca de las ---  
principales dificultades que sería posible encontrar; a par---  
tir de estos conocimientos, un ingeniero experimentado reali-  
zaba el diseño básico, con el que se procedía a la excavación  
de la obra.

Según los datos obtenidos, sobre la marcha se intro---  
ducían modificaciones a los métodos constructivos y se redise-  
ñaban los ademes provisionales o soportes temporales. Cabe -  
mencionar, que muchas excavaciones de esta época se encuentran  
hoy dando servicios sin más soporte que el primario colocado-  
durante la excavación, generalmente a base de polines y vigas  
de madera, tal es el caso de la veintena de túneles que opera  
el ferrocarril del sudpacífico, entre Guadalajara y Tepic.

Los túneles hidráulicos debido a sus requerimientos de  
operación, en su mayoría eran recubiertos con mampostería o -  
con concreto simple.

Al concluirse la primera mitad del siglo XX, con el --  
desarrollo de las geociencias, apareció la posibilidad de un-  
diseño más racional, el que basándose en reconocimientos su--  
perficiales y exploraciones profundas, tanto directas como in

directas, permitió construir modelos de las formaciones por -  
excavar, en los que quedaban representadas tanto su geometría  
interna (fallas, contactos litológicos, fracturas, niveles -  
freáticos, etc.), como sus características de comportamiento -  
mecánico. Apoyados en este modelo geotécnico fué posible ana-  
lizar el probable comportamiento del macizo de suelo o roca -  
ante la excavación.

En la década de los 50s. nace la mecánica de rocas, lo  
que viene a ampliar muy significativamente las posibilidades-  
de análisis y diseño en los túneles. Hasta esos mismos años,  
el criterio de diseño había sido proporcionar el soporte nece-  
sario para absorber mediante elementos estructurales, los es-  
fuerzos que antes de la excavación tomaba la roca dentro del-  
perímetro del túnel; esto básicamente correspondía a una sus-  
titución de elementos estructurales; la roca por vigas y poli-  
nes, marcos de acero o losas de concreto más resistentes pero-  
de menor volumen, que consecuentemente dejaban espacio libre-  
suficiente para la formación de una oquedad que constituía el-  
túnel propiamente dicho. Es innegable que en muchos casos, la  
buena calidad de la formación rocosa y su resistencia permir-  
tían que mediante la redistribución de esfuerzos se consevara-  
la oquedad sin necesidad de soporte adicional alguno.

Sin embargo, al inicio de la segunda mitad del siglo -  
XX, este concepto fué ampliado y generalizado hasta conside--

rar que muchas otras formaciones, que aunque incapaces de sostener la excavación abiertas por sí misma, si podían resistir un incremento significativo de esfuerzos, si se les permitía deformarse bajo situaciones controladas. De esta manera el concepto de sistema de soporte se amplió para incluir a la misma roca o suelo en la vecindad del túnel; lo que dio origen a lo que hoy se conoce como Método Austriaco.

De los túneles subacuáticos, probablemente la aventura más soñada es el túnel del Canal de la Mancha entre Francia e Inglaterra. Proyecto similar es el que constituye el túnel Sheikan en Japón, cuya ejecución tiene la finalidad de comunicar a las Islas de Honshu y Hokkaido por debajo del estrecho Tsugaru, alojando a lo largo de sus 53.85 Km. dos líneas para la operación del Tren Shinkansen, proyectado para operar a una velocidad de 210 Km/h bajo ese estrecho de 23 Km de ancho y 140 m. de profundidad.

## I.2 DESARROLLO HISTORICO DE TUNELES EN MEXICO

Los viaductos y los túneles han sido usados ventajosamente en México desde hace mucho tiempo en la construcción -- y modernización de acueductos, alcantarillado, ferrocarriles y caminos, alcanzando un mayor aprovechamiento en las últimas décadas al utilizarse en la edificación del Sistema Metropolitano de Transporte de la Ciudad de México. (METRO).

Dentro del ámbito tunelero de nuestro país destaca, -- por la época en que fué construido, el secavón de Nochistongo, obra realizada para desviar las aguas del río Cuautitlán y -- hacerlas llegar al río Tepejí, con el fin de evitar las inundaciones que sufría la capital de la Nueva España. En 1607 -- don Enrico Martínez, después de realizar los estudios que demostraron la factibilidad de la obra, logró el apoyo del gobierno e inició la excavación de 6,600 m. de longitud con la ayuda de 24 lumbreras, concluyéndose dichos trabajos nueve y medio meses después, el 17 de septiembre de 1608. Al no haberse recubierto por falta de apoyo económico, este túnel se colapsó algunos meses después.

Durante el virreynato en la Nueva España fué grande la importancia de los túneles asociados a la extracción de minerales, conservándose hasta hoy importantes ejemplos en las -- ciudades de Zacatecas, Guanajuato y Pachuca.

Ya en México independiente, importantes obras subterráneas fueron construidas para abastecer de agua potable a las poblaciones, como es el caso del poco conocido sistema de los Colomos, en Guadalajara, donde una inmensa red de pequeños -- conductos, en los que apenas puede pasar una persona a gatas -- drenan el manto freático y conducen sus aguas hasta los estanques.

Su aplicación a la evacuación de aguas residuales además cuenta con otros importantes ejemplos: para el desagüe del Valle de México, en Julio de 1866 se inició el túnel viejo -- Tequisquiác con una longitud de 10,027 m, que fué excavado -- con la ayuda de 24 lumbreras, y terminado junto con el gran -- canal de desagüe en marzo de 1900.

El nuevo túnel de Tequisquiác se inició en 1938, con una longitud de 11300 m; para su excavación se emplearon 10 -- lumbreras y cerca de 18 pozos de ventilación, la obra se terminó en 1954.

Los hundimientos regionales debidos a la extracción de agua del subsuelo dislocaron el sistema, haciendose necesario el control de los principales escurrimientos hacia el Valle de México mediante la construcción del interceptor poniente --

de 17 Km, de longitud, puesto en operación en 1960. La excavación y el recubrimiento fueron ejecutados en un tiempo del orden de los 20 meses.

Posteriormente y ante el crecimiento de la población - en el Valle de México, en 1966 se iniciaron mediante la excavación de lumbreras, los trabajos del drenaje profundo, la obra de mayor importancia en América Latina por sus dimensiones y dificultades de construcción, dentro de las que destaca el manejo de mas de  $8\text{m}^3/\text{s}$  de filtraciones en sus 68 Km de longitud (primera etapa), sus 34 lumbreras y un solo portal de salida. El emisor central con una sección de 6.5 m y 50 - Km de longitud capaz de manejar hasta  $200\text{m}^3/\text{s}$ . Los interceptores (18 Km en su primera etapa), cuentan con un diámetro de 5m y se unen al emisor central antes de la lumbrera 0.

Pueden incluirse en este mismo tipo de obras de drenaje, el túnel de Sn. Cristobal las Casas, Chis. de 4 300m., -- de longitud excavado en calizas, que impide la inundación de la ciudad. Obras similares existen en Acapulco de 1300 m., - y en Guadalajara de 9500 m.

Para el abastecimiento de agua potable a las grandes - ciudades, también se ha requerido de la excavación de túneles, como es el caso del Lerma con 14336 m. de longitud que introduce su caudal al Valle de México desde 1951; el de Analco---

Sn, José de 16 Km., que pertenece al sistema Cutzamala, paralelo y sobre el Lerma entre sus lumbreras I y 2, y con 5 túneles mas en su ramal norte.

Existen túneles de este mismo tipo en otras ciudades - como Tijuana, Monterrey, Nacozari y Acapulco.

Como consecuencia lógica del desarrollo científico y tecnológico, los túneles con fines de conducción de agua a -- presión para la generación de energía en plantas hidroeléctricas aparece en nuestro país a principios de este siglo, destacan entre estos, las correspondientes al sistema Miguel Alemán, primeras construidas por la C.F.E. que comprende 8 presas ubicadas en los Edos. de México y Michoacán. De las plantas generadoras, dos de ellas se alojan en cavernas y se excavaron 51 500 m de túneles de conducción, 1000 m. de túneles de desfogue y 550 m de túneles de acceso.

Otras obras subterráneas recientes y de gran importancia corresponden al sistema del río Grijalva. En la presa -- de Malpaso (Netzahualcoyotl), se habían construido para 1969, 6 túneles de presión, una casa de máquinas subterránea y 6 túneles de desfogue que se unieron a los de desvío.

Más tarde dentro de este mismo sistema, para la presa La Angostura se excavaron 5 túneles de presión, una casa de -- máquinas subterránea y 5 túneles de desfogue. A continua---

ción se atacaron las obras de la presa Chicoasén que se concluyeron en 1979 y para las que fué necesario perforar 8 túneles de presión, una casa de máquinas en caverna y 8 túneles de desfogue, que se sumaron a los de desvío.

Con fines de riego, incorporado al distrito de riego - Palestina en el estado de Coahuila, se construyó el túnel Sn. Diego, con una longitud de 2200 m. excavado con sección herradura de 2.5 X 2.5 m. en conglomerados y calizas.

El primer túnel importante construido en la época moderna, fué el túnel el Mirador del distrito de riego Valsequillo, entre 1941 y 1946 en el estado de Puebla, de 1100 m. de longitud y con una sección circular de 4.9 m. de diámetro, totalmente revestido y excavado en conglomerados y pizarras.

Otros túneles importantes de este tipo son el Mexicano en Tamaulipas, Tomatlán en Jalisco y el Gallinero en Hidalgo.

Durante la primera mitad del siglo XIX, se inicia en México la construcción de las vías férreas de largo itinerario, y fué, según se cree con el Mexicano, entre México y Veracruz, cuyos trabajos se iniciaron en 1838, este incluye varios túneles entre Boca del Monte, Puebla y Maltrata, Ver., así como entre Fortín y Atoyac, Ver. en 1869 se inaugura el ramal a --

Puebla, que cuenta con 7 túneles y un año más tarde se inicia la operación del tramo Veracruz-Atoyac. Es hasta 1873 que se logran conectar los dos tramos, iniciándose la operación entre México y Veracruz.

Durante el Porfiriato, entre 1880 y 1910 la construcción de vías ferreas avanza en las líneas México-Guadalajara, México-Monterrey, Guadalajara-Tepic, Ojinaga-Chihuahua y Chihuahua-Creel, durante esta época y la postrevolucionaria se construyen los ferrocarriles interoceánicos, (México-Jalapa Veracruz), el transistmico (Salina Cruz-Puerto México), Cardenas-Tampico, México-Cd. Juárez, México-Apatzingan, México-Balsas, Monterrey-Laredo, Sn. Luis-Aguascalientes, Puebla-Oaxaca, etc.

Entre 1920 y 1925 la actividad se centra casi en 2 líneas troncales, la del ferrocarril del sureste y la del ferrocarril Sonora-Baja California.

En 1956 se reinician los trabajos en el ferrocarril Chihuahua-Pacífico, en su tramo Creel-Topolobampo, mismo que se inaugura en 1961 con un número importante de túneles, entre ellos el primero en espiral. En 1966 se constituye una rectificación del ferrocarril México-Nuevo Laredo en su tramo Viborillas-Villa de Reyes, que comprende un túnel falso de más

de 1 Km. de longitud.

Posteriormente se construye un nuevo ferrocarril entre México y Cuautla, con ramal que conecta hacia Puebla y el ferrocarril Corzónico-Lázaro Cárdenas. En fechas recientes se concluyen las obras para una nueva línea del Mexicano, en su travesía por Acualtzingo, donde se localiza el túnel más grande del sistema: "La Jarochita", con aproximadamente 3 Km. de longitud.

También se inicia y se ponen en operación algunos tramos de la nueva vía de México-Querétaro, primera vía doble en el país, que está siendo electrificada y en la que se localizan túneles importantes, como el Barrientos y el Palmillas. Todas estas líneas incluyen un importante número de túneles.

Los primeros túneles carreteros propiamente dichos se construyeron probablemente en la década de los 30s. para las carreteras México-Acapulco, en la zona del cañón del Zopilote uno de ellos, que aún subsiste, tiene de orden de los 60 m. de longitud y posteriormente fué abandonado al rectificarse el trazo. El otro fué destruido para reemplazarlo por un tajo a cielo abierto.

El segundo túnel carretero se construyó asociado a la obra hidroeléctrica de Chicomacán, en su carretera de acceso

tiene aproximadamente 800 m. de longitud, sección de portal - de 8m X 8m con ademe de anclas y concreto lanzado, sin revestimiento definitivo.

En 1984 se inició la construcción del túnel Puerto Vallarta, sobre el libramiento de dicha población. Proyecto -- que contempla dos túneles paralelos a sólo 2.5 diámetros entre sus ejes. En 1985 se inició la construcción de la obra - más importante de éste tipo en el país; corresponde a dos túneles paralelos de 330 m. de longitud de cada uno, a tan sólo dos diámetros entre sus ejes y con una sección semicircular - de 7 m. de radio, y cuya área individual supera los 160 m2. - Estos túneles viales llamados "La Venta", forman parte de la autopista La Venta-La Marquesa, y fueron puestos en operación en 1987.

La utilización militar de estas estructuras en los --- tiempos modernos, aunque de gran importancia en otros países, en México sólo se encuentran en raras ocasiones como es el-- caso de los anagares subterráneos del Aeropuerto de Tuxtepec, legado de la segunda Guerra Mundial.

Dada la amplitud del universo de túneles existentes, - dedicaremos nuestro estudio a los túneles de tránsito.

## II TUNELES DE TRANSITO

## II. TUNELES DE TRANSITO

Es interesante observar la tendencia mundial que existe con respecto a la generalización del uso de túneles con fines de tránsito, un importante incremento en el número de ellos se ha reflejado a lo largo de las últimas décadas, principalmente en lo que se refiere a la construcción de caminos, (esto se debe a las modificaciones de las especificaciones de las cargas y pendientes permisibles, tendientes a aumentar la velocidad de operación y disminuir el consumo de energéticos). Estas estructuras constituyen un recurso familiar a los proyectistas y constructores de vías ferreas en todo el mundo, y son principal materia prima en sistemas de transporte metropolitano. Sin embargo, es notorio que la utilización de túneles en la tecnología de vías terrestres tiene una muy alta desigualdad de distribución causada por las distintas condiciones prevalecientes en cada lugar.

Es bien sabido, que la metodología a través de la cual se desarrollan los proyectos de ingeniería de tránsito consta de tres etapas: Selección de rutas, Anteproyecto y Proyecto Definitivo. En la primera se plantean originalmente las distintas alternativas y aquellas que resultan con mejores posibilidades se analizan a nivel de anteproyecto, de donde se seleccionará la que deba concluirse como proyecto definitivo para su construcción. Dentro de este enfoque, el túnel tal como un puente o un viaducto, se constituye como una obra especial,

ambas, soluciones para librar obstáculos aunque de signos contrarios, muy a menudo con costos unitarios muy similares. La solución túnel debe considerarse como parte integral de un todo, con tal importancia, como la tiene en sí el proyecto del sistema del que forma parte, ya que de la misma manera, debe cumplir con la finalidad de permitir el transporte a través de él, con altos niveles de seguridad, economía y comodidad para el usuario, por lo que deben contar con las características y equipamientos que los hagan funcionales .

La necesidad del túnel debe definirse en las fases de selección de ruta y anteproyecto. Dentro de los lineamientos del proyecto del sistema deben estudiarse su justificación, su localización, su sección transversal y sus alineamientos preliminares, los cuales dependen de los requisitos impuestos por el tránsito y por las condiciones topográficas y de uso de suelo en el área del proyecto. Su ubicación final depende de las condiciones geotécnicas e hidrológicas particulares del lugar.

Es recomendable que estas obras sean estudiadas con un nivel muy alto en lo que a planeación se refiere. Se han de considerar conceptos cuantificables como son la inversión inicial, costos de construcción, de operación y de mantenimiento; factores intangibles tales como el riesgo, la incertidumbre, los costos sociales y los costos de oportunidad, además de otros factores relacionados con características particulares y locales como puede ser el impulso a la economía, la protección

de la ecología y el medio ambiente, etc..

En general, los túneles de tránsito son obras subterráneas con secciones de 50 a 150 m<sup>2</sup>, superadas solamente por las casas de máquinas de centrales hidroeléctricas y por las cavernas para almacenaje. Su longitud es muy variable según la aplicación y las condiciones del lugar. Un túnel ferroviario puede tener una longitud desde 20 m. mientras que los túneles para un sistema como el metro llegan a sumar hasta cientos de kilómetros, un túnel de base puede medir varios miles de metros en comparación con los túneles de puerto que generalmente son de poco desarrollo.

Si bien es cierto que los túneles son obras de ingeniería con un elevado grado de imprevisibilidad, también es cierto que es posible diseñarlos, programarlos, presupuestarlos y construirlos con gran precisión, principalmente si estas actividades son ejecutadas y/o supervisadas por personal experimentado.

## II.1 "CARACTERISTICAS DE LOS TUNELES"

Con el fin de contar con más y mejores alternativas -- para tomar la decisión más óptima en cuanto problemas a solucionar para el diseño y la construcción de un túnel, es conveniente conocer y valorar de alguna manera todos los factores que intervienen, para así lograr un mejor desarrollo y una mayor economía; por esto es importante conocer las características para poder clasificar a dicha obra (apoyandose en experiencias que se tengan en casos similares) y tener una mejor orientación respecto a su costo, que en muchos de los casos es muy incierto, dada la incertidumbre de algunos de esos factores -- como lo es la geología a que nos enfrentaremos; esto nos lleva a hacer un análisis de algunas de las características más importantes de los túneles.

### "CARACTERISTICAS GEOMETRICAS"

La geometría de un túnel es un aspecto muy importante para su proyecto y construcción, debiendo existir una coordinación entre todas las especialidades que intervienen, con el fin de conjuntar las restricciones marcadas por cada una de ellas.

Está deberá diseñarse tomando en cuenta diversos aspectos como son: uso del túnel, aspectos geológicos y geotécni--

cos; comportamiento estructural y procedimientos con constructivos entre otros.

á) Sección Transversal:

El primer punto a considerar en el diseño de la sección transversal de un túnel es la utilización que este tendrá, ya que de acuerdo a las condiciones de operación del túnel deberán satisfacerse ciertos requisitos geométricos; deben cumplirse ciertas especificaciones; por ejemplo:

En un túnel para el metro es necesario tomar en cuenta factores como el gálibo estático de los trenes, gálibo dinámico, movimientos transversales debidos al balanceo de la suspensión, banquetas, efectos de curvas, visibilidad, señalización, instalaciones especiales, etc; a partir del establecimiento de estos requerimientos se procederá a tomar en cuenta otros factores como son: espesor de revestimiento, procedimiento constructivo costo de la excavación, etc.

b) Trazo:

También forma parte del diseño geométrico del túnel. El aspecto operacional del túnel es un factor importante en la selección del trazo del mismo; desde luego que interviene otros factores no menos importantes como los son: la geología

la disponibilidad de áreas superficiales que puedan afectar - al túnel o puedan ser afectadas por este, el costo de túnel - por unidad de longitud, etc.

c) Perfil:

El perfil de un túnel como parte del diseño geométrico, involucra factores tales como: aspectos geológicos, profundidad máxima y mínima requerida por condiciones de operación, - existencia de estructuras superficiales o subsuperficiales. - etc.

CARACTERISTICAS GEOLOGICAS Y  
GEOTECNICAS

La geología y la geotécnica son factores que influyen de una manera preponderante en la construcción de un túnel, - ya que de acuerdo al tipo de terreno donde se va a oradar, y de acuerdo también con otros factores, se puede definir en -- primera instancia un costo aproximado del túnel previo a su - construcción; y serán estas características los parámetros -- que definan los procedimientos constructivos.

De lo anterior se deduce que dependiendo de la calidad de las exploraciones geológicas y geotécnicas, se tendrán un - determinaro nivel de confiabilidad en el diseño del túnel.

Es entonces la geología una variable independiente muy importante, y que trasciende en el costo y las características de la obra, pero también es la más difícil de definir.

Con la selección del trazo y el perfil del túnel se fija la geología del material por excavar, el que a su vez, determina el método constructivo a seguir, y por lo tanto, el costo (cuya precisión está relacionada con la predicción geológica), por ello el proyecto del túnel debe ser tan adaptable como sea posible a condiciones geológicas imprevistas, dada la incertidumbre de estas.

Se debe procurar una buena selección del sistema de ademe y del procedimiento de excavación, tal que guarden compatibilidad con el terreno, tratando de lograr economía y comportamiento adecuado en el entorno de la obra subterránea.

De singular importancia en el diseño de un túnel, así como de sus procedimientos constructivos y de sus ademes o recubrimientos, es el tiempo de autosoporte, que en esencia, es el tiempo que puede permanecer abierta sin soporte, una oquedad de dimensiones dadas antes de derrumbarse ó cerrarse.

## "CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES"

Entre los diversos aspectos que ejercen influencia en el comportamiento estructural de un túnel esta el geométrico, ya que de éste depende en gran medida, la carga que deberá soportar el revestimiento. Si la sección de un túnel esta formada por curvas sin aristas pronunciadas, el trabajo estructural será semejante al de un arco, donde los elementos mecánicos actuantes más importantes son los de compresión; la flexión y el cortante existen pero no ejercen efectos tan importantes en el comportamiento del túnel. Desafortunadamente no siempre es posible tener secciones con estas características, sin embargo, se debe tratar de ajustar la geometría del túnel para tener un comportamiento estructural satisfactorio.

## CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS

Existe una serie de características propias del túnel de tránsito, que deben ser cubiertas para satisfacer todos los requerimientos de comodidad, seguridad y funcionalidad para el usuario. Estas deben tenerse siempre presentes, tanto en selección de ruta y anteproyecto, como en proyecto definitivo, para mantener un óptimo desarrollo en todas sus etapas, diseño (geométrico, Estructural, Método constructivo, etc); - construcción (Ciclos de trabajo: excavación, rezaga, instalación de soporte temporal o definitivo, etc.): operación y man

tenimiento. A continuación se mencionan algunas características propias de estas obras.

- Se trata de una obra lineal con un número de accesos limitados.

- Se trata de un espacio reducido, en el que transita y labora personal y equipo, apoyados desde la zona exterior con recursos (aire, agua, energía, materiales), que son transportados a veces a grandes distancias a través del mismo túnel en tuberías, ductos, cables y diversas unidades de acarreo.

- Se trata de 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 el labora.

- No pueden utilizarse partes del túnel para los fines propuestos hasta no haber concluido por completo la perforación y buen parte, si no la totalidad del revestimiento definitivo.

En cuento a estas características, que influyen directamente en el diseño y en los procedimientos constructivos, pueden ser consideradas como, desventajas para los túneles, si se les compara con las obras a cielo abierto; aunque éstas conllevan la virtud de ser obras guarecidas de las inc

mencias del tiempo por lo tanto hábiles y dispuestas en todo momento, de tal manera que obliga a guardar un orden y una sucesión de actividades que por ser repetitivas, se pueden organizar en ciclos de trabajo, que propician el aprendizaje y promueven la eficiencia; siempre que el terreno excavado no oponga grandes variaciones ni complicaciones, y cuando la longitud del túnel sea lo suficiente grande para que se rebaje el período de aprendizaje y así se establezca un nivel de producción de alto rendimiento que compense los bajos avances propios de dicho período.

#### "CARACTERISTICAS DE TRANSITO"

Es recomendable, que para una buena operación de y en el túnel, exista una amplia vinculación entre estos dos conceptos. Para poder satisfacer este requisito, es necesario conocer a que se refieren esos dos conceptos, sus diferencias y las características propias de un túnel para tránsito.

Operación en el túnel; se refiere a las características del tránsito y su comportamiento dentro del túnel.

Operación del túnel: es esencialmente el equipamiento del propio túnel, necesario para reunir las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito y en consecuencia para el usuario.

Desde el punto de vista de tránsito, deben establecerse las especificaciones de proyecto que permitan diseñar las características geométricas de la planta, el perfil y la sección transversal con base en los volúmenes y composición de tránsito.

Para un proyectista de túneles, el problema es conocer en que medida las características recomendadas para sistemas viales al aire libre, pueden adoptarse o adaptarse en la construcción de túneles, sin que esto tenga efectos desfavorables para la fluidez de la circulación o la seguridad.

Por lo que respecta al cálculo de capacidad y niveles de servicio, en la actualidad los métodos de cálculo y valores utilizados no se diferencian de los aplicados para vías al aire libre, por lo que no se requieren consideraciones especiales; no obstante, debe tenerse en cuenta que un túnel es una obra de carácter permanente, no susceptible a variaciones en trazo, perfil, ni ampliaciones de la sección transversal, de ahí que sus especificaciones deban ser pensadas con criterios de amplio margen.

Para el trazo en planta, debe procurarse que el túnel se aloje en tangente, y si es necesario introducir una o más curvas, que estas resulten del menor grado de curvatura posible; a menor curvatura, menor ampliación en la sección -

transversal, lo que representa reducción en los costos.

Los accesos al túnel deben trazarse, si es el caso, - introduciendo grados de curvatura que permitan una transición de velocidades adecuada a las que se tendrán fuera y dentro del túnel como medida de seguridad. El trazo debe prever - que los entronques se retiren a la mayor distancia posible - de los túneles, pues las rampas de acceso y los entrecruzamientos constituyen puntos de conflicto que en el interior - de éstas obras significan un mayor peligro potencial.

El alineamiento vertical o perfil de un túnel, tiene un efecto muy importante en la capacidad y operación del -- tránsito, por lo que su proyecto requiere de especiales -- cuidados en los siguientes aspectos.

Se deben manejar pendientes máximas en los accesos al túnel y dentro de él, tales que permitan la circulación de los vehículos pesados a una velocidad mínima de 40 a 50 k.p.h. lo que impone pendientes máximas del 2.5 al 3 %. Debe revisarse el perfil con un análisis de capacidad para verificar que no se genere un cuello de botella. Cabe señalar que los túneles que requie-

ren de ventilación artificial, se origina un incremento en las necesidades de aire para diluir los gases nocivos y humanos que adicionalmente resultan en las pendientes elevadas.

Como ejemplo, se tiene que en túneles donde circulan vehículos de propulsión a diesel o gasolina para una pendiente del 4% el incremento de circulación de aire resulta 20% mayor en relación a una rasante a nivel.

Para túneles de dos carriles, uno en cada sentido de la circulación, se recomienda no exceder una pendiente del 2% para evitar la formación de colas en circulación que se originan por los vehículos pesados.

La longitud de las curvas verticales debe garantizar que en cualquier punto del túnel y en sus accesos, se otorgue la distancia de visibilidad de parada para la velocidad autorizada como medida mínima de seguridad. Para el caso de carreteras de dos carriles, uno en cada sentido, se recomienda, siempre que sea posible, proporcionar la distancia de visibilidad de rebase como medida de mayor seguridad, aún cuando se reglamente la prohibición de rebase o cambio de carril en el interior.

La pendiente mínima de este tipo de obra, debe garantizar el drenaje de las aguas durante y después de la construcción, por lo cual se deben prever pendientes para este caso del orden de 0.25 al 1.00 %.

El proyecto de la sección transversal requiere de especial atención, dado que su forma y dimensiones inciden en forma muy notable en el costo de la obra como resultado de la integración de los requisitos impuestos por el tránsito para su correcta operación, por el equipamiento del túnel para la seguridad y comodidad de los usuarios, y por los estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos para la estabilidad de la obra.

Por ejemplo, en el caso de carreteras, por lo que se refiere a los requisitos impuestos por el tránsito, se considera que la sección transversal para un tubo que contenga dos carriles, debe tener un ancho total de 9.50 m. con el siguiente arreglo: dos carriles de 3.50 m. cada uno, fajas de contracción por banquetas de 0.50 m. a cada lado y banquetas de 0.75m también a cada lado. Se recomienda que estas sean bajas con guarnición montable, para que en caso de descompostura de algún vehículo este pueda hacerse a un lado sobre la banqueta, permitiendo en esta forma mantener el flujo en dos carriles, aunque con restricción en la velocidad.

Es importante señalar, que para asegurar la cantidad de flujo de tránsito en toda la carretera, se recomienda no redu-

cir en el túnel el número de carriles que tiene la carretera al aire libre.

Por lo que respecta al gálibo vertical que se requiere para la circulación de los vehículos, la experiencia en nuestro país, derivada de la observación de pasos a desnivel, señala la conveniencia de proyectar con gálibo a de 5.00 m, para evitar daños al túnel, a sus instalaciones y a los propios vehículos en el caso de carreteras.

Los requisitos impuestos por el equipamiento del túnel para la seguridad y comodidad de los usuarios, condicionan las dimensiones de la sección transversal para disponer de los espacios necesarios para alojar los ductos de ventilación, o un mayor gálibo vertical si requieren aceleradores para ventilación longitudinal. En los túneles abovedados, la ventilación generalmente no influye en las dimensiones de la sección.

En lo referente a la iluminación, en los túneles abovedados y en los circulares con falso plafón, así como en los rectangulares cuando las hileras de alumbrado y los dispositivos de señalamiento se colocan sobre la calzada, debe considerarse una altura adicional igual a la de esos dispositivos. Esto no implica que todos los túneles deban ser iluminados.

Se debe prever que la conducción de cables para las distintas instalaciones del túnel, se aloje en un lugar accesi

ble y que permita inspeccionarlos en toda su longitud. En el caso de túneles de sección abovedada o circular, conviene utilizar los espacios disponibles fuera de la sección de circulación del tránsito.

Es importante señalar que la forma y el dimensionamiento finales de la sección transversal del túnel, para efectos de construcción, se derivan de los estudios geológicos y geotécnicos, que también determinan el espesor requerido del revestimiento del propio túnel y solucionan la impermeabilización y los requerimientos de drenaje con la acesoría de un hidrólogo de ser necesario. Debe considerarse también, para dimensionamiento de la sección, el espesor suficiente para alojar las estructuras necesarias para las superficies de rodamiento.

Por otra parte, es requisito indispensable que la contaminación del aire (originada por los vehículos en circulación) dentro del túnel, sea disminuida y mantenida dentro de rangos que no pongan en peligro la salud de el usuario mediante la inyección de aire fresco, en túneles largos con elevados volúmenes de tránsito.

Se requiere de dispositivos de detección de monóxido de carbono que determinen su concentración y transmitan esa información a la sala de control de operación, donde a través de --

una computadora se regule la inyección de aire fresco.

La diferencia entre las condiciones de luminosidad del interior y el exterior del túnel, exigen del conductor de un vehículo un esfuerzo de adaptabilidad a los cambios de luz, -- por esta razón, con base en criterios y normas que consideren la longitud del túnel, la velocidad de operación, los tiempos de adaptación de la retina, los niveles de luminosidad en los accesos al túnel y el tipo de vehículo que circulan, sea en un sentido o en ambos; debe especificarse la iluminación como una medida de seguridad, y su proyecto debe ser realizado por ingenieros especialistas en iluminación.

Resulta conveniente disponer de dispositivos para control de tránsito, tales como señalamiento preventivo y restrictivo ó semáforos que además de indicar la proximidad de un túnel, regulen la velocidad de los vehículos a una magnitud acorde a las condiciones de operación en él ó aún en casos especiales como vehículos estacionados en el interior por descompostura, carencia o insuficiencia de iluminación, inundación por deficiencia de drenaje, etc.

## II.2 "CLASIFICACION DE TUNELES"

Se puede clasificar a los túneles de acuerdo a diferentes criterios. Considerando el uso al que sean destinados, se puede definir de ellos, la siguiente clasificación:

Para el transporte de bienes y/o mercancías.

Para el tráfico de personas- a pie o en vehículos.

Para conducción de fluidos

Para extracción de minerales.

Para aprovechamiento de espacios Subterráneos

También pueden clasificarse de la siguiente forma:

TUNELES DE TRANSITO:

TUNELES FERROVIARIOS.

TUNELES CARRETEROS.

TUNELES PEATONALES.

TUNELES PARA LA NAVEGACION.

TUNELES PARA EL METRO.

TUNELES PARA ESTACIONAMIENTOS.

**TUNELES DE CONDUCCION:****TUNELES HIDROELECTRICOS.****TUNELES DE CONDUCCION DE AGUA POTABLE.****TUNELES PARA INSTALACIONES PUBLICAS (Teléfono, conducción eléctrica, conducción de gas combustible).****TUNELES DE ALCANTARILLADO****TUNELES PARA BANDAS TRANSPORTADORAS.****TUNELES PARA ALMACENAMIENTO DE LIQUIDOS.****Y adicionalmente:****TUNELES PARA REFUGIOS ANTIAEREOS.**

Diversas formas de caracterización, están basadas en algunas otras variables, atendiendo a estas, pensemos en interpretar para los túneles de tránsito las siguientes clasificaciones:

Según su profundidad:

**TUNELES SOMEROS.****TUNELES PROFUNDOS.**

Segun su seccion transversal

TUNELES DE SECCION CIRCULAR

TUNELES DE SECCION OVAL

TUNELES DE SECCION HERRADURA

TUNELES DE SECCION RECTANGULAR

Segun su posición.

TUNELES HORIZONTALES

TUNELES VERTICALES O LUMBRERAS:

TUNELES INCLINADOS

Segun su licalización

TUNELES EN MOTAÑA

TUNELES URBANOS

TUNELES SUBACUATICOS

Desde un punto de vista geotécnico, es usual que los -  
túneles se agrupen en tres grandes categorías:

-Túneles en roca sana: que no requieren soporte tempo-  
ral, aunque se revistan por razones funcionales.

-Túneles en rocas suaves: que requieren de sistemas de  
soporte sustanciales para garantizar su permanencia por un --  
período igual o mayor a su vida útil.

- Túneles en suelos duros o blandos: cuya excavación requiere de complicados sistemas que provean soporte inmediato ó aún simultáneo a la excavación.

Adicionalmente, existen otras clasificaciones basadas en la experiencia, y que tienen como objetivo fundamental -- ayudar en el diseño de algunas condiciones como son: longitudes sin soporte, tiempo libre de soporte, excavaciones, estabilización del frente de ataque y de las paredes, y revestimientos definitivos; sin llegar a ser concluyentes.

Como puede apreciarse, las posibilidades de clasificación de túneles son muy amplias, lo que implica en general, - que cada túnel ha de ser considerado, estudiando, diseñado, - construido y operado de una manera particular, y en muchos -- aspectos única, por lo que no se repite nunca, lo que es una característica muy particular y muy importante de los túne-- les, y que les proporciona ese toque de novedad e interés que los hace tan atractivos para los profesionales de diversos -- especialidades que a ellos se dedican.

### II.3 JUSTIFICACION DE LA CONSTRUCCION DE UN TUNEL

La creciente demanda de transporte obliga a modernizar los diversos sistemas de transporte; diversas carreteras vías-ferreas, metro, etc., son susceptibles de mejorar sus niveles de servicio y seguridad mediante el uso de pasos directos, entre los que destacan las alternativas de solución en las que interviene la construcción de túneles.

En los análisis de capacidad y costos de sistemas de -- transporte terrestre intervienen los volúmenes de tránsito, -- distribución direccional y composición, sus variaciones diaria, semanal y estacional, sus tasas de crecimiento histórica y -- previsible, las estadísticas de accidentes, así como los cos-- tos básicos de operación de los vehículos típicos y su varia-- ción con las pendientes y curvaturas usuales.

En consecuencia, vale la pena hacer un estudio de alter-- nativas y valorar cada uno de los factores que inciden en el -- costo del transporte.

#### ECONOMIA DEL TRANSPORTE.

El costo anual de transporte es la base primordial para la comparación de alternativas de ruta, e involucra a los si-- guientes conceptos:

- Velocidad de Proyecto.
- Costo de Proyecto.
- Costo de Derecho de vía.
- Costo de Construcción.
- Costo de Operación.
- Costo de Conservación.

#### VELOCIDAD DE PROYECTO

Está en función del volumen de tránsito por servir y -- del tipo de terreno en cuanto a relieve topográfico; constituye un indicador de la rapidez, seguridad y eficiencia esperadas en el transporte.

Dado que los túneles, como elementos rígidos que son, - no pueden ser modificados fácilmente en su sección transversal, o en su alineamiento horizontal o vertical. Es recomendable - que desde un principio la velocidad de proyecto y la geometría correspondiente, sean determinadas para que tengan una vigencia previsiblemente amplia, concibiendo sus especificaciones - con criterios generosos.

También es recomendable que la velocidad de proyecto en el túnel y antes y después, en una longitud equivalente a 30 - seg. de recorrido sea la misma para evitar discontinuidades in convenientes.

## COSTO DE PROYECTO

Depende directamente del uso actual o potencial del terreno , puede variar muy ampliamente y consta del costo de la tierra y de los llamados bienes ajenos a la tierra como son: - cultivos, canales, edificaciones, etc.

El costo de derecho de vía es uno de los que más inciden en el costo de los proyectos a cielo abierto, no solo cuando se alojan en zonas de alto valor comercial, si no por que frecuentemente los propietarios o posesionarios, presentan dificultades legales y de otro tipo en contra de la obtención de los terrenos necesarios, lo que produce retrasos y encarecimiento de las obras. Ante esta situación, el túnel es una solución para reducir los altos costos financieros que motivan los retrasos de obra por concepto del derecho de vía.

## COSTO DE CONSTRUCCION

Comprende los conceptos de terracerías, drenajes, puentes, viaductos, túneles, intersecciones, pavimentos, vías, señalamientos, etc. La información estadística de costos de obras recientes y la tendencia de los mismos, sirven de apoyo a la estimación requerida a nivel muy preliminar o de planeación; pero para el estudio de alternativas de ruta, se requiere de levantamiento topográficos suficientemente amplios y precisos, preferentemente con el uso de fotogrametría, para de



1.0 al 1.5% del costo total de construcción. Los tramos de túnel requieren de gastos adicionales de conservación.

La suma de costos actualizados (de proyecto, derecho de vía, construcción, operación y conservación) para el período de amortización considerado, dividido entre el número de vehículos que en el mismo período transitarán por el tramo en estudio nos da un índice de costo de transporte, que puede servir de base de comparación entre alternativas.

#### IMPACTO SOCIAL.

Además del costo de transporte, hay otros factores socioeconómicos importantes, llamados factores sociales, que debemos tomar en cuenta en la comparación de alternativas, estos son:

2. Menor daño a terrenos agrícolas.
3. Menor desalojo de habitantes.
4. Menor riesgo para el público.
5. Nuevos habitantes a servir.
6. Plusvalía de terrenos vecinos.
7. Preservación de sitios culturales.
8. Impulso a la actividad económica.

### "FACTORES ECOLOGICOS"

Los principales factores ecológicos a considerar en la evaluación de alternativas de ruta en el proyecto son:

9. Menor daño a bosques, lagos y parques.
10. Menor contaminación ambiental.

Considerando estos conceptos, la solución con túnel tiene ventajas sobre la obra a cielo abierto, pues reduce al mínimo el daño al medio ambiente en cuanto al ruido, humos, vibraciones y alteración del paisaje, lo cual es muy importante en zonas urbanas, suburbanas, de interés recreativo ó cultural.

En resumen, si a cada uno de estos diez conceptos se le da un peso, cuya sumatoria sea igual a 100 ( por mencionar alguna escala), y que equivalga al valor proporcional que en la solución ideal representa dicho concepto desde el punto de vista general, para la región o el país, y en cada alternativa se califica el cumplimiento de cada concepto, la suma de calificaciones en cada alternativa nos dará la puntuación correspondiente, esta ayudará a determinar la mejor solución, que eventualmente puede incluir un túnel.

### ANALISIS ECONOMICO TUNEL CONTRA CORTE

Existe una idea generalizada de que la construcción de

un túnel solo se justifica, cuando la obra dará paso a grandes volúmenes de tránsito a la cual puede no darse crédito, ya que al considerarse una determinada sección transversal de la vía, y las características topográficas y geológicas de la zona, pueden resultar convenientes túneles cortos que no requieren ventilación e iluminación especial ni revestimiento generalizado. El túnel corto puede entonces resultar muy competitivo, en sistemas de bajo tránsito, si reduce longitudes, pendientes, curvaturas y daños al medio ambiente.

En el análisis de túnel contra corte, la siguiente expresión nos permite determinar el espesor de corte máximo.

$$D+A(E+a) + O' + tC = I+T+tM \dots [I]$$

Donde:

D = Costo de derecho de vía.

A = Area de la última sección de corte.

E = Costo de excavación.

a = Costo de acarreo.

O' = Costo de obras complementarias en el corte --  
(contra cunetas, barbas, subdrenes, cunetas --  
etc.).

t = Tiempo de vida económica, en años.

C = Costo anual de conservación del corte.

I = Costo de expropiación o indemnización para la construcción del túnel.

T= Costo de construcción del túnel por metro lineal.

M= Costo anual de conservación del túnel.

y por otra parte el área de corte es:

$$A = bh + ih^2 \dots (2)$$

dónde:

b= Ancho de cama de corte.

h= Espesor máximo de corte.

i= Talud= Cotb.

de (1):

$$A(E+a) = I+T+tM - (D+O'+tc)$$

$$A = \frac{I+T+tM - (D+O'+tc)}{E+a}$$

De (2):

$$ih^2 + bh - A = 0$$

$$h = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4Ai}}{2i}$$

Siendo h el espesor máximo de corte.

Es recomendable complementar la evaluación técnica de-- alternativas con una consulta pública que incluya a usuarios, afectados y con la información que se pueda obtener al respecto con las autoridades competentes. Este muestreo debe ser bien - diseñado y ejecutado en cuanto a tamaño, peso de la opinión y demás parámetros que un estudio estadístico técnicamente consistente requiere para llegar a una decisión que satisfaga óptimamente los aspectos técnicos, económicos, sociales y ecológicos.

A este aspecto, se puede añadir por ejemplo, que aun -- cuando los costos de mantenimiento hagan un costo global muy - elevado de una carretera en ladera sobre los costos de un túnel, si dicha carretera puede tener efectos turísticos, estos finalmente inclinan la balanza en beneficio de este factor.

### III PROYECTO EJECUTIVO

## III PROYECTO EJECUTIVO

Dentro de las obras de ingeniería, el diseño de la estructura de superficie alcanza tal grado de detalle que pueden especificarse dimensiones geométricas con tolerancias de fracciones de centímetro, ejemplos de esto, lo pueden constituir los puentes, presas, edificios, etc., donde además se calcula detalladamente el refuerzo en cada elemento estructural. En los túneles por el contrario, no es recomendable detallar secciones de excavación, ni espesores de concreto, ni armados, ni el soporte temporal con criterios rígidos; es mucho más aconsejable basarse en normas flexibles para un pre-diseño del túnel, ya que en muchas ocasiones el proyecto final se lleva a cabo durante su construcción. En esos casos, las observaciones directas en el campo, los levantamientos geológicos de detalle, las pruebas mecánicas dentro del túnel, la correcta caracterización de los suelos y rocas y las mediciones de comportamiento son de vital importancia y constituyen las herramientas más valiosas, ya que ayudan a la toma de decisiones y contribuyen a afinar el proyecto al retroalimentario con esta información. Normalmente, basado en los datos obtenidos de los sondeos geológicos, ensaye de núcleos de roca o muestras de suelo, se tiene solo una idea panorámica de la naturaleza del terreno; y los valores de algunas propiedades mecánicas tienen solamente un carácter orientador que permite llevar a cabo un pre-diseño conservador, muy conveniente para fines de programación de obra, de presupuesto y de licitaciones.

La adaptabilidad a que se refiere lo anterior, corresponde a los procedimientos de construcción y a los sistemas de soporte, pero también el destino que se vaya a dar a cada túnel puede imponer restricciones de diseño, y en consecuencia, limitaciones de adaptabilidad en su realización.

Un proyecto bien constituido debe contener una amplia información geológica que muestre las propiedades de suelos y rocas, dentro de lo económicamente posible y sin excesos que rayen en redundancia, debe contar con las normas y especificaciones sobre la calidad y procedimientos de las distintas etapas de construcción. Es conveniente que sea complementado con la redacción de criterios normativos que permitan hacer los ajustes adecuados durante su ejecución, entre los que destacan la interpretación de mediciones de campo, seccionamiento de excavaciones, estabilización de tramos críticos, medidas de protección y soporte del terreno para cada posible situación, secuencias de excavación, etapas de colado, inyectado, alivio de presiones hidrostáticas, sondeos, etc.

Es importante aclarar que en el diseño del túnel de tránsito deben considerarse todos los aspectos, (geotécnicos, geohidrológicos, procedimientos constructivos y aquellos que sirvan para la operación del túnel), como una unidad en la que intervienen e interactúan cada una de sus partes con una misma finalidad, por la que es indispensable que tengan una perfecta coordinación.

### III.1 CONSIDERACIONES Y PARAMETROS GENERALES PARA DISEÑO

Para diseñar la sección de excavación de un túnel deberán considerarse tanto las necesidades de instalaciones, espacios, viales, y los espesores de soportes primarios y/o definitivo como las características del terreno o macizo rocoso. Asimismo el diseño de sus recubrimientos, de sus instalaciones y de sus espacios deben analizarse como un conjunto de carácter interdisciplinario, en el cual cada uno cumpla con todas las finalidades a que esté destinado cubriendo al mismo tiempo las condiciones impuestas en dicho conjunto por las diversas especialidades asociadas.

En el párrafo anterior se resume la esencia de la filosofía con la que se deben diseñar un túnel para transporte. De ahí que sea necesario considerar diversos criterios, y bajo esos enfoques, establecer las condiciones que deba reunir el túnel.

- 1.- Criterios de ingeniería de tránsito
- 2.- Criterios de proyectos geométricos
- 3.- Criterios geotécnicos y estructurales.

## CRITERIOS DE INGENIERIA DE TPANSITO

La capacidad de los sistemas de transporte se diseña -- de tal forma que plantee un balance entre el volumen de tránsito aceptable en la vía y la inversión, lo que es aplicable también a los túneles, pues unos y otros deberán aceptar los mismos volúmenes de tránsito.

Un estudio de la composición del tránsito actual y una estimación futura de ella, ayudará a determinar la demanda y el vehículo de proyecto para definir algunas de las características geométricas de la obra, como son el número y ancho de carriles, el espacio libre vertical y el alineamiento horizontal y vertical, con la intención de suministrar un nivel de servicio aceptable.

Mediante la estimación del volumen de tránsito esperado, su composición vehicular y su variación estacional y a lo largo del día, se podrá contar con bases sólidas para obtener los tipos y volúmenes de contaminación que se pueden presentar durante la vida útil del proyecto. Con esto será posible establecer alternativas de ventilación, las cuales juegan un papel muy importante en la definición de las características geométricas.

Otro aspecto de la ingeniería de tránsito lo constituye el conocimiento de las reacciones y limitaciones del conductor

ante circunstancias especiales encontradas a lo largo de las vías de comunicación. En el caso particular de un túnel, el conductor puede quedar ciego momentáneamente para los objetos insuficientemente iluminados a la entrada o la salida, lo cual es de vital importancia analizar y principalmente para túneles carreteros. Los elementos de iluminación deben estudiarse teniendo presente la necesidad de que no se produzcan deslumbramientos y de que los cambios de iluminación de los objetos que caen dentro del campo visual sean graduales, de acuerdo a las posibilidades del ojo humano.

A ese respecto, resulta conveniente contar con dispositivos para el control de tránsito, tales como señalamiento preventivo y restrictivo o semáforos, que informen al usuario de la existencia del túnel y de su operación en ese tramo del camino.

#### CRITERIOS DE PROYECTO GEOMETRICO

Los principios básicos que rigen la geometría de un túnel, dado que forman parte integral de un sistema son:

- La capacidad del túnel debe ser comparablemente aceptable con la de la vía de comunicación al aire libre a la que pertenece.

- Las limitaciones máximas de anchos de carril y pendientes deben ser congruentes entre ambos tramos.

Esto implica que la geometría del túnel estará en función directa del tráfico que circulará y del nivel de servicio proyectado. Asimismo inciden en este criterio los aspectos de ventilación e iluminación como en el criterio de ingeniería de tránsito. Adicionalmente, influyen las características del suelo o roca por atravesar. No obstante, señalaremos solamente las limitaciones de cada elemento que constituye la geometría del túnel en relación al tránsito.

#### SECCION TRANSVERSAL

- Ancho de carril. Dentro del túnel, deberá ser diseñado con criterios de adaptabilidad tales que permitan un funcionamiento óptimo del sistema aun en situaciones especiales, observando siempre las especificaciones que para cada sistema sean impuestas por las diversas entidades correspondientes.

- Número de carriles. No deberá reducirse en el túnel el número de carriles con que cuenta el sistema al aire libre.

- Espacio libre Vertical. Deberá dejarse un espacio libre vertical 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. Su finalidad es permitir el paso al perso-  
nal de mantenimiento, salida de los pasajeros de vehículos y--  
accidentados o descompuestos, protección de los dispositivos--  
o equipos suspendidos en la pared (alumbrado, señalamiento, te-  
lefonos, extinguidores, etc.) Su ancho varia de 0.60 m. a 1.00  
m.

- Bombeo Transversal. Con objeto de facilitar el escu-  
rrimiento del agua de filtración o de limpieza sobre la super-  
ficie de rodamiento, se proporcionará un bombeo transversal -  
hacia las banquetas con una pendiente mínima del 2%.

#### ALINEAMIENTO HORIZONTAL

- Localización. Dado que la localización del túnel --  
queda definida por el alineamiento del sistema, en aquellos -  
casos en que la entrada o salida del tunel queden orientadas-  
en algún momento del día hacia el sol a poca altura sobre --  
el horizonte , deberá tomarse las medidas preventivas que --  
auxilien al usuario ante estos sucesos.

- Trazo General. De ser posible, el túnel deberá ubi-  
carse totalmente en tangente horizontal, para evitar sobrean-  
chos provocados por la ampliación de las curvas.

-Curvatura, siempre que sea posible, se observará cuando menos las mismas normas que en el sistema a cielo abierto para la velocidad de proyecto, principalmente en lo que se refiere a grado máximo y a la distancia de visibilidad de parada.

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

#### ALINEAMIENTO VERTICAL

- Localización. Sea cual sea ésta, se buscará proporcionar el escurrimiento del agua por gravedad hacia los portales, tanto en la etapa de construcción como en su operación. Para esto se recomienda pendientes que oscilen entre 0.5 y 1.00%.

- Pendiente Longitudinal. El valor máximo debe ser congruente con el que permita mantener en el túnel la capacidad y el nivel de servicio del sistema a cielo abierto. La pendiente mínima será del 0.5% para garantizar el escurrimiento longitudinal del agua. En el caso de túneles que requieren ventilación artificial no deberá rebasarse el 4% para evitar incrementos importantes en la producción de contaminantes de los vehículos usuarios.

-Curvas Verticales. Deberan tener una longitud de curva apropiada a la velocidad de proyecto y a la distancia de visibilidad de parada.

## CRITERIOS GEOTECNICOS Y ESTRUCTURALES

Dada la importancia que tiene en el comportamiento del túnel la interacción suelo-estructura, ya que el espesor de revestimiento, resistencia del concreto y acero de refuerzo necesario, están mas íntimamente ligados a las características del suelo que a las condiciones de servicio de la estructura, y -- con la finalidad de economizar el diseño del revestimiento, es fundamental contar con la mas amplia información relacionada -- con las características del suelo. De ahí que realizar la -- exploración, muestreo, ensaye y pruebas de laboratorio lo mas -- completamente posible, apoyarse en experiencias en otros túne -- les excavados en suelos similares, realizar mediciones geosis -- micas por refracción; efectuar pruebas de placa; y medir las -- presiones de tierra sobre el ademe o revestimiento primario -- tenga gran importancia y trasciendan grandemente en la construc -- ción del túnel.

La información que se obtiene a través de estas pruebas, constituyen los parámetros de diseño para el procedimiento -- -- constructivo y sus soportes temporal y definitivo, estos son:

- Peso Volumétrico de los diferentes estratos.
- Angulo de fricción interna.
- Módulo de elasticidad del suelo
- Factor de resistencia (parámetro, empírico que depende de las características mecánicas de las formaciones)

- Velocidad de transmisión de ondas transversales.
- Buzamientos, estratificaciones y fracturación.
- Perfil geológico, contactos y fallas.
- Posición del nivel piezométrico a la profundidad del túnel y flujos subterráneos.

En este criterio se considera además la geometría y longitud del túnel o los segmentos a diseñar; y conjuntados con los diferentes parámetros que establecen diversos autores se puede obtener el valor de la presión vertical y horizontal ya sea aplicando una u otra metodología para análisis de carga y resistencia para diseño.

### III.2 ETAPAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE TUNELES

#### I. CARACTERIZACION DE LAS CONDICIONES DEL SUBSUELO.

I.1. Exploración, muestreo y medición de las condiciones y propiedades del subsuelo.

I.2. Desarrollo de un modelo conceptual con las características y propiedades de los suelos a lo largo del eje del túnel.

I.3. Investigaciones complementarias y mediciones durante la etapa de construcción para afinar el modelo conceptual del subsuelo.

#### II. DISEÑO CONTRA COLAPSO

II.1 Selección de los equipos y procedimientos de construcción.

II.2 Selección del método de soporte del frente en caso de ser necesario.

II.3 Selección del ademe primario, características y método de colocación del mismo.

III. DISEÑO CONTRA DEFORMACIONES EXCESIVAS. (PARA SUELOS)

Prevención ó Control de:

III.1 Deformación del frente excavado.

III.2 Deformación de la superficie durante el tuneleo. - (Por el paso de un escudo)

III.3 Deformación de las paredes del túnel debido al ajuste inicial entre el suelo y el ademe.

III.4 Deflexión del revestimiento primario.

III.5 Deformaciones debidas al efecto del tiempo en el suelo y en el revestimiento definitivo.

IV. CONSTRUCCION

IV.1 Implementación de las decisiones de diseño .

IV.2 Observación del comportamiento del túnel.

IV.3 Retroalimentación al modelo conceptual del terreno.

IV.4 Ajustes al diseño.

## III.3 ESTUDIOS PREVIOS

Para la óptima localización, diseño y construcción de un túnel, es necesario analizar cada uno de los rasgos geológicos existentes en el lugar, para lo que un estudio geológico bien planeado es de vital importancia; se recomienda que este sea realizado en tres etapas:

## ESTUDIOS PRELIMINARES

Se hace una recopilación y análisis de la información existente y un reconocimiento preliminar de la región. Se pretende conocer la historia y el ambiente geológico-geotécnico general para planear y fundamentar las investigaciones subsiguientes. En estos estudios se determinan:

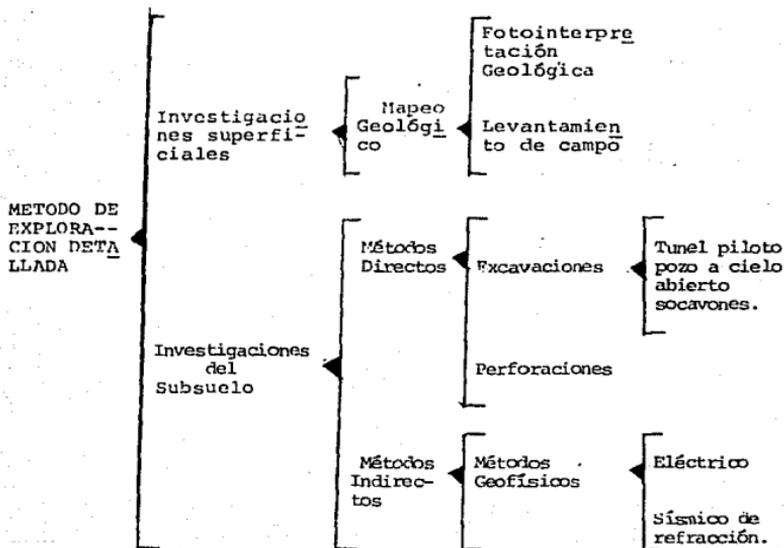
- Procesos activos o potencialmente activos y sus posibles efectos en las obras de ingeniería.
- Estratigrafía regional y la distribución de las principales unidades de roca, sus límites y contactos.
- Condiciones regionales de agua subterránea.
- Posibles bancos de material para construcción.
- Características geológicas importantes.

Esta información resulta ser de gran utilidad para los estudios de factibilidad y para planeación.

## ESTUDIOS DE DETALLE

Esta etapa está enfocada a determinar la factibilidad de un trazo en particular, lo que la hace mas completa. Se consideran las diversas alternativas del trazo del túnel, basándose en la comparación de las condiciones geológicas y geotécnicas obtenidas con las exploraciones dentro de la ubicación general de la ruta.

Los métodos de exploración que pueden apoyar la realización de estos estudios son:



## ESTUDIOS ESPECIALES

Se constituye por investigaciones adicionales, especiales o mas detalladas, una vez elegido el trazo definitivo del túnel, sus datos contribuirán al diseño final, a la estimación de costos del túnel y a la previsión de futuros problemas geológicos. Estos estudios deben ser continuados durante la construcción y operación del túnel, para verificar los estudios anteriores, para proveer problemas futuros y para auxiliar a un mejoramiento del diseño de revestimiento y de los procedimientos constructivos.

Los métodos de exploración son los mismos que los utilizados para estudios de detalle.

Durante la excavación se pueden perforar túneles piloto o galerías en las que se puede hacer investigaciones sobre la naturaleza de las rocas, la cantidad de agua que fluya al túnel y asimismo, realizar ocasionalmente estudios de la resistencia al corte y de los esfuerzos que la roca tenga en sitios donde exista tectonismo.

La información obtenida por la exploración geológica se presenta para su análisis en forma individual e integral, para lo cual deben elaborarse:

- Mapas geotécnicos
- Perfiles geotécnicos individuales
  - Sondeo
  - Socavon
  - Pozo a cielo abierto
  - Geofísico
- Perfiles geotécnicos integrados o sección geotécnica
- Perfil de problemas geotécnicos específicos.

Al conjuntarse lo anterior se constituyen los estudios previos, los que conducen a caracterizar el subsuelo para establecer el modelo geomecánico zonificado para diseño. Apoyado en estos y con el auxilio de las clasificaciones ingenieriles y geomecánicas, se podrá entrar a la fase de diseño.

Dada la importancia que tienen los estudios geológicos y los costos que involucran, es necesario contar con una buena planeación de ellos.

### III.4 METODOS PARA DISEÑO DE TUNELES

El diseño de túneles esta íntimamente ligado con los -- procedimientos constructivos; y a su vez, conjuntamente dependen de las condiciones del terreno donde se va a instalar la obra por lo que requieren del mejor respaldo que les puede proporcionar una investigación geológica completa.

Cabe recordar que a menudo el proyecto final de un túnel se lleva a cabo durante su construcción, debido al grado de detalle de los estudios y a las observaciones de campo que se realizan durante su ejecución. Por esto el prediseño siempre quedará sujeto a cambios.

El diseño de túneles se puede llevar a cabo de acuerdo con cualquiera de los siguientes enfoques:

- a) Analítico
- b) Empírico
- c) Observacional

a) El enfoque analítico, debido a la dificultad que siempre existe para alimentarla con parámetros que realmente sean representativos del macizo, es el menos usado. De este enfoque destacan:

- Soluciones matemáticas cerradas
- Fotoelasticidad
- Método del elemento finito y otras técnicas de simulación.

Estas técnicas analíticas son útiles para determinar la influencia relativa de los diversos parámetros que intervienen y para comparar las distintas soluciones posibles. Generalmente indican las cargas que actuarán sobre la estructura.

b) Enfoque empírico. Este aprovecha la experiencia adquirida en obras similares, por lo que se requiere un sistema de clasificación, en base al cual se podrá extrapolar y aplicar mediante un juicio sano al nuevo caso.

De aquí se deduce, que la clasificación de macizos rocosos constituyen una parte fundamental del enfoque empírico, el cual ha sido muy utilizado en todo el mundo. El sistema de clasificación de rocas mas usado hoy en día a pesar de que cuenta con mas de 30 años de haber sido propuesto, es el de K Terzaghi.

c) El enfoque observacional se basa en la medición del comportamiento del túnel según se construye. Tiene preferencia por el uso de soportes flexibles (instalación de anclas y concreto lanzado) para permitir una deformación controlada de esfuerzos en el entorno del túnel y sea autosoportante. Se

presentan con este enfoque problemas con la contratación de la obra pues el proyecto varia a lo largo del periodo de construcción. Tiene su principal exponente el N.M.A.

En relación con los procedimientos constructivos, en el diseño deben considerarse las posibilidades de utilizar una u otra metodología, teniendo en cuenta que se tienen de manera muy general dos grupos de métodos constructivos: aquellos en los que el frente y las paredes del terreno no tienen problemas de estabilidad en el corto plazo y, aquellos cuyas condiciones presentan problemas de estabilidad en el frente, empuje en las paredes, o simplemente son inestables.

Asimismo, se establece una diferenciación entre el diseño de túneles en suelos y el diseño de túneles en roca, aunque algunos autores preferido hacer una clasificación general.

El uso y diseño de soportes requeridos para túneles, se ha apoyado por mucho tiempo en la observación, la experiencia y el juicio personal de aquellos involucrados en su construcción, esto nos lleva una vez mas a la necesidad de contar con un sistema de clasificación de macizos, que permita combinar los hechos observados con la experiencia y el criterio ingenieril, que sea cualitativa y cuantitativa con respecto a las condiciones de la roca y que arroje como resultado el diseño satisfactorio de un sistema de soporte para dicha obra, así como de los posibles métodos constructivos.

**IV PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS**

## IV PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

La selección del procedimiento constructivo mas idoneo para nuestro proyecto resulta ser de vital importancia, mas aun, que el hecho de conocer lo mas avanzado en métodos constructivos. Conviene entonces, en base a las condiciones de cada proyecto, estudiar cuales son las ventajas que tiene el utilizar una u otra metodología.

Con el fin de establecer una primera idea entre el comportamiento del terreno al ser excavado un túnel y su probable procedimiento constructivo, se presentan para cada concepto; (excavación, estabilización frontal, estabilización de las paredes y revestimiento definitivo) una tabla en la que se relacionan las clasificaciones del tunelero y de Lauffer, con los procedimientos constructivos, segun sean recomendables, moderadamente recomendables o poco reconomendables, (figs. 1, 2, 3 y 4).

FIG. 1 EXCAVACION

EXCAVACION	CLASIFICACION SEGUN LAUFFER										
	A	B	C	D	E	F	F	F	G	F	G
	CLASIFICACION DEL TUNELERO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
EXPLOSIVOS											
HERRAMIENTA MANUAL NEUMATICA											
CHIFLONES DE AGUA											
REJILLAS FRONTALES											
GUILLOTINAS											
TOPO											
FRESADORA											
BRAZO EXCAVADOR											
ESTRELLA CORTADORA											
DISCO CORTADOR											

FIG. 2 ESTABILIZACION FRONTAL

ESTABILIZACION FRONTAL	CLASIFICACION SEGUN LAUFFER										
	A	B	C	D	E	F	F	F	G	F	G
	CLASIFICACION DEL TUNELERO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
POR RESISTENCIA INTRINSECA DEL MATERIAL											
CON AYUDA DE ABATIMIENTO DEL NIVEL FREATICO											
CON AYUDA DE INYECCION EN EL TERRENO											
CON AYUDA DE CONGELACION											
CON NAVAJAS PERIMETRALES EN PLAVE											
CON GATOS FRONTALES											
CON AIRE COMPRIMIDO											
CON LODO A PRESION											
PRESIONANDO AL MATERIAL EXCAVADO											

ESTABILIZACION DE LAS PAREDES	CLASIFICACION SEGUN LAUFFER										
	A	B	C	D	E	F	F	F	G	F	G
	CLASIFICACION DEL TUNELERO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
POR RESISTENCIA INTRINSECA DEL MATERIAL											
ANCLAS											
CONCRETO LANZADO											
CONCRETO LANZADO Y ANCLAS											
MARCOS METALICOS Y BATAJE DE MADERA											
ANILLOS METALICOS Y BATAJE DE MADERA +											
DOVELAS DE CONCRETO +											
DOVELAS DE PLACAS +											
DOVELAS DE ACIARO											
DOVELAS DE FIERRO FUNDIDO +											

FIG. 3 ESTABILIZACION DE LAS PAREDES

REVESTIMIENTO DEFINITIVO	CLASIFICACION SEGUN LAUFFER										
	A	B	C	D	E	F	F	F	G	F	G
	CLASIFICACION DEL TUNELERO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEJANDO EL MATERIAL NATURAL											
CON ANCLAS											
CON CONCRETO LANZADO											
CON ANCLAS Y CONCRETO LANZADO											
CON DOVELAS DE CONCRETO											
CON CONCRETO COLADO											
CON CIMBRA											

FIG. 4 REVESTIMIENTO DEFINITIVO

La selección de un determinado procedimiento constructivo para un material en particular requiere de mayor profundidad en los análisis, por lo que no se pretende que estas tablas sean concluyentes; en ellas se enlistan los procedimientos constructivos mas sobresalientes, lo cual no significa que sean los únicos.

De una manera muy general, podemos decir que existen dos grandes grupos de métodos constructivos, aquellos en los que el frente y las paredes del terreno no tienen problemas de estabilidad en el corto plazo y, aquellos cuyos materiales presentan inestabilidad, ya sea en las parctes o en el frente. Podemos distinguirlos como túneles en suelos firmes y en roca, y túneles en suelos blandos respectivamente.

#### IV.1 EXCAVACION DE TUNELES EN SUELOS FIRMES Y EN ROCA

Varios son los factores que influyen en la toma de decisión con respecto a que procedimiento constructivo se deba utilizar, entre los que resaltan:

- a) Características de la roca
- b) Tipo de sección por excavar
- c) Dimensiones del túnel
- d) Equipo disponible
- e) Programa de construcción
- f) Disponibilidad de mano de obra especializada.

En función de ellos se pueden tener los siguientes métodos constructivos y diversos equipos:

I. Para ataque por barrenación:

Jumbos con brazos de perforación

Brazos hidráulicos de perforación y dispositivos auxiliares.

II Para ataque selectivo:

Por corte

Por impacto

III. Para ataque a sección completa:

**ATAQUE POR BARRENACION**

El ataque por barrenación implica la organización y ejecución de actividades formando un proceso cíclico de trabajo - conocido como Ciclo Básico de Excavación. Este consta de cuando menos las siguientes etapas:

- Trazo y acercamiento del equipo
- Barrenación
- Carga de explosivos
- Petiro de equipos y voladura
- Ventilación
- Amacice de clave y laterales

- Rezaga de material
- Protección de la excavación

En formaciones de roca buena será suficiente con el ciclo básico de excavación. Sin embargo a medida que la calidad de la roca sea peor, mayores provisiones en el sistema de soporte tendrán que tomarse; anclaje con pernos, revestimiento de concreto lanzado, instalación de marcos metálicos, inyecciones, barrenación de exploración, etc.

Es particularmente importante conocer en todo momento la duración efectiva de cada una de las actividades que integran el ciclo, y en su caso, dictar las medidas de corrección- adecuadas. Si se establece un control a base de reportes, el ciclo básico se irá optimizando según se eliminen los defectos y los vicios que contenga mediante el análisis de dichos reportes, de los tiempos y movimientos. Esto es mayormente importante para el ataque de media sección superior y banqueo con uso de explosivos, ya que deben coordinarse las operaciones de tal manera que el avance de la sección superior sea igual al de la sección inferior, para evitar pérdidas de tiempo por causa de ciclos de trabajo desbalanceados.

#### ATAQUE SELECTIVO

Las máquinas de ataque selectivo realizan su trabajo en el frente de manera secuencial. Pueden distinguirse, de --

acuerdo con su procedimiento de ataque, dos tipos principales de ataque: ataque por corte y ataque por impacto.

Las máquinas de ataque selectivo por corte disponen por lo general de una cabeza provista de picas, cuya dimensión es pequeña en relación con la sección de la frente. Esta cabeza está situada en el extremo de un brazo orientable que realiza el barrido selectivo a través de toda la superficie del frente, por lo cual el tamaño y la forma de la sección abierta es muy versátil. Tanto la fuerza de empuje de las picas como la producción de material arrancado es inferior a la de las máquinas de ataque global.

Las máquinas de ataque selectivo por impacto llevan montado un martillo neumático en el extremo del brazo de barrido, y el arranque del material se produce por el golpeteo del útil.

Este tipo de máquinas generalmente van montadas sobre un tren de orugas que les permite una gran facilidad de desplazamiento.

#### ATAQUE A SECCION COMPLETA

El ataque a sección completa se realiza con máquinas -- excavadoras de túneles cuyo trabajo se realiza simultáneamente en toda la cara del frente, un tanto a la manera en que un topo abre su galería, motivo por el cual frecuentemente estas --

máquinas reciben el apelativo de "Topos".

Brevemente un topo consiste de un cuerpo metálico muy robusto que se atraca contra las paredes de la excavación por medio de gatos hidráulicos en número de cuatro u ocho, una cabeza que gira mediante motores eléctricos o hidráulicos con un número variable de cortadores de disco que también giran sobre su propio eje y un sistema de gatos que empujan a los cortadores contra el frente produciendo las fuerzas de corte. El material cortado, que puede llegar a alcanzar fuerzas de roptura hasta de  $2000 \text{ kg/cm}^2$ , generalmente compuesto por esquirlas, es elevado por cangilones existentes en la cabeza hasta una banda transportadora que los conduce a los carros de rezaga.

El ciclo de trabajo de un "Topo" comprende:

- 1) Atraque del topo
- 2) Ataque mediante el giro de la cabeza con los cortadores al mismo tiempo en que estos son empujados - contra el frente mediante los gatos correspondientes.
- 3) Al terminarse la carrera de los gatos de empuje, el topo es desatracaado y mediante la inversión del flujo de aceite se cierran los gatos, jalando al cuerpo del topo que queda en posición para ser alineado y atracaado nuevamente.

Los cortadores son elementos fundamentales en la operación de un topo y su selección depende de las características del material por taladrar. Los hay de varios tipos, entre los que destacan los lisos con filo endurecido y los que tienen -- insertos de carburo tungsteno. Cada cortador puede tener uno, dos, tres o más anillos cortantes.

#### IV.2

#### EXCAVACION DE TUNELES EN SUELOS BLANDOS

A menudo es necesario excavar túneles en suelos blandos, que generalmente están constituidos por gravas y arenas sueltas, limos y arcillas. Muy frecuentemente son localizados bajo el nivel freático. Para el diseño y la excavación de túneles en este tipo de suelos deben considerarse dos aspectos muy importantes, estos son:

- La estabilidad del frente de excavación
- Las deformaciones inducidas a corto, mediano y largo plazo.

Con respecto a la estabilidad del frente, se sabe que -- cuando se excava un túnel se produce una alteración al estado de esfuerzos iniciales, que se produce además un cambio en la presión de poro del suelo en el entorno de la excavación, y -- que la adaptación de las presiones de agua, en suelos de permeabilidad relativamente baja a los nuevos estados de esfuerzos no es instantánea; por lo que el tiempo es un elemento im-

portante en el mecanismo de evolución de los estados de esfuerzos del terreno donde se excava.

En cuanto a las deformaciones del terreno inducidas por el proceso constructivo, conviene que estas sean reducidas a un valor mínimo o permisible con el fin de no dañar construcciones vecinas y tuberías de servicio. Es inevitable que se presenten asentamientos y desplazamientos del suelo por la alteración del estado de esfuerzos y por el flujo de material a los huecos que va dejando el dispositivo de ataque; por esta razón es esencial verificar sistemáticamente que el volumen excavado sea igual al requerido para alojar el túnel.

Otra fuente de deformación es la condición hidráulica, debido a que un túnel generalmente produce abatimiento del nivel freático vecino a él, aumentando por lo consiguiente los esfuerzos efectivos en la masa del suelo, los pesos de esa masa y por lo tanto las deformaciones en la superficie. Esta situación hace indispensable considerar en el diseño las condiciones del revestimiento; si va a ser totalmente impermeable, tendrá que soportar adicionalmente presiones hidrostáticas, en caso contrario, se tomarán todas las medidas necesarias para que el túnel funcione efectivamente como un dren, sin que ello interfiera en su utilización principal.

Cuando se excavan tuneles en arenas finas saturadas o arcillas blandas es necesario utilizar métodos de construcción

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

especiales, debido a que este tipo de suelos requieren de un soporte continuo de las paredes y muchas veces del frente. -- Surge la pregunta: ¿Cómo proceder a excavar un túnel en este tipo de terreno?

Los métodos constructivos mas modernos, diseñados para la perforación de túneles en suelos blandos, se apoyan en el uso de máquinas perforadoras de tuneles, mejor conocidas como escudos. Sin el auxilio de un escudo, los tuneles en suelos blandos solo se pueden excavar si se mejoran radicalmente sus propiedades mecánicas mediante tratamientos tales como inyecciones de lechada de cemento, productos químicos y congelación, cuya aplicabilidad es limitada.

La utilización de los escudos para la perforación de túneles en suelos blandos es relativamente reciente, su perfeccionamiento, forma actual y equipamientos son producto de su evolución de hace pocos años a la fecha.

El escudo moderno consta básicamente de una coraza de acero (sección de cilindro llamada camisa) que protege la zona del túnel que se acaba de perforar y que todavía no tiene ademe. Los escudos de frente cerrado tienen unas cuchillas que excavan el terreno al girar cada una de ellas alrededor de un eje, dentro de la coraza existen en la mayoría de los casos, bandas transportadoras que reciben el material disgregado por las cuchillas y lo transportan hasta la zona ademada fuera del

escudo, para descargarlo en vagonetas, de donde es transportado en la forma usual.

Algunos escudos cuentan con un brazo erector para colocar las dovelas en su posición de proyecto. Inmediatamente -- después de colocado el revestimiento primario deberá colocarse el revestimiento definitivo.

El movimiento de avance del escudo se logra por la reacción de un cierto número de gatos hidráulicos, situados alrededor de la cara posterior del escudo, y que se apoyan en el borde del revestimiento primario ya colocado.

A medida que se procede con un nuevo avance se podrá -- efectuar la inyección de contacto en el espacio que queda entre el revestimiento primario y el terreno, el cual antes estaba -- ocupado por la prolongación de la coraza.

De esta manera, las actividades fundamentales que se -- realizan en la excavación de tuneles con escudo son las comunes a cualquier tipo de tuneles.

- a) Escavación del frente
- b) Rezaga y transporte del material excavado
- c) Colocación del revestimiento e inyección de contacto.
- d) Manteo o eliminación del material excavado.

Sin embargo, dependiendo del grado de mecanización de los escudos, dichas actividades pueden ejecutarse en forma simultánea.

En un concenso general existen dos grandes grupos de escudos, en función de la forma de ataque del frente de excavación:

#### ESCUDOS DE FRENTE ABIERTO

- Escudo manual
- Escudo con rejilla al frente
- Escudo con cabeza cortadora oscilante
- Escudo excavador
- Escudo con cabeza cortadora giratoria y

#### ESCUDOS DE FRENTE CERRADO

- Escudo con cabeza cortadora giratoria
- Escudo con mampara de presión
- Escudo con frente presurizado por lodos
- Escudo con presión de tierra balanceada.

#### TUNELES FALSOS

Otro proceso constructivo que ha sido muy útil es el llamado "Tuneleo Falso", el cual se puede aplicar tanto en su

los blandos como en suelos firmes, este se efectua cuando se quiere dar paso rápidamente a una vialidad importante afectada por un túnel somero.

En términos generales, el proceso de tuneleo falso consiste en construir dos muros de contención laterales con el galibo horizontal que indique el proyecto determinado, hasta una profundidad mayor que la del fondo de excavación con el objeto de dejar un empotramiento, una vez que estos muros alcancen su resistencia de proyecto, se inicia la excavación hasta alcanzar el nivel de la losa de techo, para continuar con la construcción de la losa; posteriormente se coloca el material de relleno y se efectua la restitución del pavimento para dar paso a la vialidad. Una vez que la losa de techo alcanza su resistencia de proyecto, se continua con la excavación del núcleo mediante el proceso de tuneleo extrayendo la rezaga a través de lumbreras o "alcancias" que se dejan en la losa de techo. La excavación se realiza por etapas llevando un talud en el frente de avance hasta alcanzar la profundidad máxima de proyecto y a medida que se profundiza se van colocando puntales en niveles previamente analizados.

En suelos blandos se utilizan como elementos de retención muros tablestaca colocados en sitio bajo lodos dentoníticos; en suelos firmes se emplea también este sistema, aunque puedan usarse muros a base de pilas coladas en sitio, "columnas de suelo inyectado" o bien estructuras de contención a ba-

se de pilas secantes de mortero o una mezcla de suelo-cemento.

#### TUNELES SUBACUATICOS

Es comun que en los cruces de vías terrestres con vías fluviales navegables se utilicen puentes cuya rasante se ubique a varias decenas de metros sobre el nivel del agua, o bien que su tramo central sea capaz de levantarse con respecto al resto del puente para dar paso a las embarcaciones de la vía fluvial.

Por su parte los tuneles ofrecen una solución alternativa que permite el flujo continuo de vehículos terrestres y embarcaciones sin provocar molestas interferencias.

#### PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

En materiales firmes, rocas sanas o moderadamente fracturadas, pueden aplicarse técnicas de tunicado convencionales.- La cobertura de material entre el fondo del río o mar y la clave del túnel generalmente es amplia, del orden de 10 ó mas diámetros, lo cual no implica que se eviten filtraciones de agua al 100%. Nuevas experiencias en inyección para impermeabilización permiten controlar tales situaciones.

Si los materiales por atravesar son moderadamente firmes, es posible construir los túneles con escudos presurizados

con aire comprimido, con lodo o con el propio material de escavación. En estos casos se hace necesario respetar un colchón del orden de 2 ó mas veces el diámetro del túnel entre su clave y el fondo del río.

Si los materiales por excavar son poco competentes y la rasante del túnel no es necesariamente profunda, se puede congstruir el conducto subacuático como un tubo sumergido bajado -- por tramos.

El concepto de sumergir ordenadamente varios tramos de túnel prefabricados, uniendolos entre sí uno a uno asegurando su estanqueidad, no es precisamente lo que se conoce propiamente como tuneleo, sin embargo, dada su innegable conexión con las estructuras subterráneas, es comun encontrar la descripción de esta tecnología en tratados de construcción de tuneles.

Las operaciones que incluye el concepto de tubos sumergidos son:

a) Fabricación de los "n" tramos de tubo en placa de acero, concreto o fibra de vidrio, dentro de un astillero, dique seco o una depresión inundable, desde donde se pueden hacer flotar los tramos.

b) Como cada tramo de tubo es flotante en si, ya que cuenta con tapones estancos en sus extremos, puede remolcarse-

hasta el sitio de su utilización, donde una grua adecuada lo ayudará en su descenso y posicionamiento de acuerdo a la geometría del proyecto.

c) Al mismo tiempo que se fabrican los tramos de túnel se realiza el dragado de fondo, para la recepción futura de -- los segmentos.

d) Se van colocando en forma ordenada y sucesiva cada uno de los tramos del túnel, depositandolos en el fondo de la zanja dragada. Cada nuevo tramo se conecta al inmediato anterior, se impermeabiliza la junta y se procede a remover los tapones provisionales usados para las maniobras de transporte y posicionamiento.

e) Se terminan las juntas entre tramos, cuidando el -- cumplimiento de las especificaciones del proyecto, repitiéndose el proceso hasta la terminación del túnel.

## IV.3 REZAGA DE MATERIAL

Este sistema constituye una fase importante del proceso constructivo, ya que al reducir los tiempos de rezagado o mantenerlos dentro de rangos óptimos se puede tener un ciclo de excavación mas eficiente.

Estos sistemas pueden ser diseñados de acuerdo a las necesidades de cada obra, a su longitud, al área de su sección transversal y a los rendimientos requeridos.

Los equipos utilizados para esta actividad pueden ser de carga, de arrastre y mixtos.

## SISTEMAS DE CARGA:

En tuneles pequeños (3.00 m. ) la carga puede efectuarse a mano (mediante traspaleo), ya que el uso de equipo no se justifica o no es posible por las dimensiones del mismo tunel.

Un sistema sencillo muy simple consiste en una banda transportadora larga, en la que descarga el propio sistema de ataque o algún tipo de cargador, soportada por una estructura bajo la cual entran las vagonetas para ser cargadas.

En tuneles grandes (6.00 m. ) la selección de equipo de rezaga es mas versatil, ya que el sistema se puede diseñar

a través de máquinas individuales o conformarse para ello todo un sistema de desalojo que descargue a la instalación de arrastre, a través de bandas transportadoras, cargadores mecánicos, palas de giro completo con pluma corta o cucharón -- rezagadora sobre oruga o sobre vía, cargador frontal o de -- -- descarga lateral, retroexcavadoras, etc.

**SISTEMA DE ARRASTRE:** Este puede ser desde una simple carretilla de mano, hasta camiones de la capacidad adecuada -- dependiendo de la velocidad de excavación, del sistema de ventilación implementado, etc.

El sistema tradicional empleado es a base de pequeñas vagonetas de rezaga jaladas por locomotoras eléctricas o de diesel.

Pueden implementarse bandas que conduzcan el material hasta el exterior o complejos sistemas de trituración y licuación para desalojo de material por bombeo a través de tuberías

**SISTEMAS MIXTOS:** Pueden considerarse dentro de estos a los sistemas mencionados en el párrafo anterior. Otro sistema muy eficiente lo constituye el método de carga- descarga -- cuya facilidad de maniobra y rapidez de desplazamiento lo sitúa entre los más competentes; estos generalmente son cargadores de diversos tipos.

## IV.4 SISTEMAS DE SOPORTE

Ya que algunos de los fenómenos que se contemplan durante la excavación pueden conducir a situaciones de colapso, es común en la práctica de la ingeniería de túneles, el empleo -- de sistemas de soporte, ademes o revestimientos, los cuales -- pueden actuar como elementos rígidos o flexibles con la finalidad de evitar o controlar el progreso de los desplazamientos.

Estudios y mediciones de laboratorio y campo, indican -- que en el comportamiento de un túnel, el revestimiento puede -- ser satisfactorio para reducir la velocidad de deformación del terreno en la venciencia del túnel, aunque no afecta sensiblemente el comportamiento del resto de las masas de material, que -- tienden a proseguir su lento movimiento hacia el túnel, incrementando las presiones que se generan en la zona de contacto -- con el revestimiento.

En función del tipo de terreno, con apoyo en alguna metodología de diseño, se hacen predicciones de los esfuerzos y -- del refuerzo que necesitará una excavación subterránea, y hasta cierto punto se prevén los procedimientos constructivos.

Este paso completa el ciclo de avance: Barrenación voladura, rezaga y ademe.

Los sistemas de soporte pueden ser divididos en:

a) Ademes primarios o provisiones: aquellos cuya función principal es mantener la estabilidad de la excavación durante la construcción y

b) Ademes secundarios o definitivos; con los cuales se da un acabado o una protección final a la excavación.

Sea provisional o definitivo el ademe, se pueden considerar los siguientes tipos de ademes:

- Marcos metálicos y retaque de madera
- Concreto lanzado
- Marcos metálicos y concreto lanzado
- Anclas
- Dovelas metálicas o de concreto reforzado.

Los marcos metálicos con retaque de madera, se emplean principalmente en excavaciones donde no existen problemas entre el terreno y su separación ó cuando se usa concreto lanzado, normalmente se define en el proyecto; sin embargo la decisión final para su uso se define en el campo, ya que las condiciones de la roca y la presencia de agua son muy variables; estas dos condiciones definen el uso de los marcos metálicos y del concreto lanzado.

Concreto lanzado: Cuando los terrenos son bastante cementados, con problemas de intemperismo pero prácticamente autoportantes, se usa en espesores de 10 a 15 cm, principalmente para lograr que el terreno conserve sus características. - Su calidad depende en gran medida de la habilidad del lanzador y de la cantidad de agua, por lo que su aplicación requiere de personal especializado.

Marco Metálicos y Concreto Lanzado: Se usa normalmente cuando no existen problemas de aportaciones de agua importantes, en terrenos que pudieran ser arenosos pero compactos, los que al intemperisarse se vuelven deleznable al perder humedad. El concreto lanzado en espesores de no mas de 10 cm. soluciona ese problema y puede funcionar como bóveda, transmitiendo los empujes terreno a los marcos metálicos.

Anclas: Se emplean casi exclusivamente en las excavaciones donde existen rocas relativamente sanas; para su cálculo se determinan los mecanismos de falla de la roca y se calcula el número y la capacidad de las anclas para evitarlo. Su principio general es hacer que estas formen parte de la estructura de soporte, dando al suelo mismo una mayor resistencia y haciéndolo trabajar para su autoporte. También sirven para anclar al concreto lanzado y a las mallas de acero.

Dovelas metálicas o de concreto reforzado: Se forman anillos dentro de la coraza de los escudos y se inyecta el es-

pacio anular que antes ocupaba el escudo, con gravilla y lechada, obteniéndose así un contacto suelo-estructura. Existen -- además ademas de este tipo que son diseñados para expandirse - hasta hacer contacto con el suelo.

Para revestimientos definitivos, existen además de los- anteriores: el concreto convencional y una combinación de este con el concreto lanzado.

## IV 5 INYECCIONES Y TRATAMIENTOS ESPECIALES

Como ya se mencionó algunos suelos requieren de ser tratados para mejorar sus propiedades y facilitar así la perforación. Estos procesos también se han usado en combinación con el uso de escudos. Destacan las inyecciones de suelos y el método de congelación en esta fase del proyecto.

## INYECCIONES

La inyección de suelos utilizada como procedimiento constructivo tiene por objeto impermeabilizar, consolidar los cuerpos sólidos porosos y permeables o sin cohesión, servir de contacto entre la estructura y el suelo circundante, o bien para rellenar oquedades grandes. Para conseguir estos resultados se rellenan los huecos del medio a tratar con un producto líquido que se solidifica mas o menos con el tiempo.

Para la inyección de suelos en un proyecto en particular se debe considerar la estructura y características de los suelos por tratar, así como las propiedades de los materiales disponibles a utilizar en la inyección.

Desde 1886 se viene utilizando el silicato de sodio patentado en aquella fecha y mejorado después. En 1910 surge la patente de un mortero basado en la mezcla de una sustancia lignosulfática y bicromato, aunque a la fecha su empleo esta

poco extendido. Posteriormente y debido al desarrollo de los plásticos, aparecieron los morteros constituidos por resinas orgánicas, las cuales son muy caras en comparación con los silicatos.

Una mezcla de silicato de sodio con una cantidad conveniente de reactivos (electrolito, ácido u otra solución coloidal), se convierte en un gel al cabo de un tiempo, el cual puede ser duro o plástico, según lo requieran las condiciones de sulo.

Por lo que respecta a la inyección de contacto entre dovelas y terreno normalmente se efectúa con un volumen de aproximadamente 2.6 veces del teórico de ese anillo anular. En algunos casos se ha utilizado una proporción como la siguiente:

Cemento -----	200 Kg.
Bentonita -----	50 Kg.
Arena -----	200 Kg.
Agua -----	400 L
Aditivo acelerante -----	5 cm <sup>3</sup> . por litro de mortero.

#### METODO DE CONGELACION

El enfriamiento de suelos puede producir una disminu-  
ción en su resistencia, al aumentar la repulsión entre las par-  
ticulas y causa el movimiento del agua interparticular por ---

efecto del gradiente térmico. Generalmente los métodos de estabilización por enfriamiento llegan a la congelación que queda exenta de los defectos señalados, pues en ella el agua de los poros se congela y el suelo se transforma en un conjunto rígido de considerable resistencia.

En suelos arenosos, el agua se congela con temperaturas del orden de los 0°C, pero en los arcillosos pueden requerirse temperaturas bastante menores.

La congelación se logra haciendo circular un refrigerante por una serie de tubos dobles introducidos en el suelo que se trata de estabilizar.

Cada tubo doble consta de una cubierta exterior, dentro de la cual se bombea el líquido frío, y de un tubo interior -- por el cual regresa. De esta manera el suelo más blando se puede convertir en un sólido fuerte, impermeable e incompresible.

Durante el proceso de congelación de suelos es muy importante el control de temperaturas.

Este procedimiento resulta muy costoso debido al tiempo necesario para efectuar la congelación del suelo, y debido también al costo del equipo refrigerante. No obstante en la actualidad, dados los progresos que se tienen en cuanto a equipos y materiales para esta técnica, ha aumentado su utilización.

## IV.6 INSTRUMENTACION

Al afectarse una formación geológica por una obra subterránea, ocurre una respuesta de la masa rocosa que el Ingeniero debe conocer e interpretar con la máxima exactitud posible. Esa respuesta, llamada comunmente comportamiento deformacional, puede conocerse mediante un programa de instrumentación, y depende principalmente de los siguientes factores:

- Condiciones estructurales, deformacionales y resistencia del macizo rocoso.
- Estado de esfuerzos residuales.
- Forma y dimensiones de la excavación.
- Procedimiento constructivo y sistemas de soporte.

En los dos primeros factores se plantea el mayor número de incógnitas, que se pueden responder mediante reconocimientos de campo, fotografías aéreas, sondeos, así como exploraciones geofísicas y pruebas de campo y de laboratorio. El estado inicial de esfuerzos en el interior del macizo, útil para calcular los tensores de esfuerzos, puede ser conocido mediante pruebas de campo como son las de roseta, gato plano, gato goodman, medidores de esfuerzo o de deformaciones en el interior de un sondeo y otros. Estos equipos forman parte del programa de instrumentación.

Los métodos de medición presentan ciertas limitaciones y sobre todo hay que recordar que generalmente el macizo rocoso es una estructura heterogénea y anisótropa. El criterio y la experiencia personal de ingeniero, juegan un papel muy importante en la interpretación de la información obtenida de la instrumentación. Puede observarse como se comporta la estructura subterránea, y si esta se apega a las predicciones hechas a partir de dicha instrumentación. Las mediciones en el interior del túnel indicarán si las medidas adoptadas son suficientes o deficientes, y podrá irse modificando el diseño teórico original en busca de una solución óptima.

El diseño de una excavación subterránea es por tanto, como ya se dijo, un proceso dinámico que se inicia antes de comenzar la excavación y se concluye hasta tiempo después de terminada la obra.

En resumen, puede decirse que los propósitos de las mediciones son:

- Antes de la excavación: recabar la información necesaria para el diseño de las excavaciones. Esta información incluye los módulos de deformación de la roca, sus parámetros de resistencia in situ y el estado inicial de los esfuerzos.
- Durante la construcción: confirmar el diseño y propor

cionar las bases necesarias para su adecuación; el control de los desplazamientos tiene un papel importante en la información que se necesita para garantizar la seguridad de las obras subterráneas.

- Después de la construcción. Vigilar el comportamiento general de la excavación durante su operación.

El programa de instrumentación deberá cumplir con esos propósitos, por lo cual, para cada obra en particular y de acuerdo a las circunstancias específicas del proyecto y de la definición de los aspectos críticos por vigilar, se diseñará de tal forma que en sus observaciones se midan, entre otras cosas, las siguientes cantidades físicas:

- Desplazamientos relativos (sin puntos fijos).
- Desplazamientos absolutos (con puntos fijos).
- Cambios de curvatura (en el soporte o revestimiento).
- Esfuerzos en el revestimiento o en el macizo rocoso.
- Presión de la roca o suelo sobre el revestimiento.
- Fuerzas en el sistema de anclaje.

Con el fin de obtener los mejores resultados de este proceso conviene seleccionar un buen programa de instrumentación.

## IV.7 SISTEMAS DE APOYO

Estan constituidos por las instalaciones que se realizan en el túnel y fuera de él, con el fin de que el ataque en el frente pueda realizarse de la manera mas continúa posible. - Deben ser acordes con las características de la maquinaria, de los métodos constructivos, con la naturaleza del terreno, con la producción esperada, etc.

Su diseño se realizará teniendo como metas entre otras cosas un acceso rápido al frente, manejo eficiente del material de excavación, suministro de recursos materiales (Agua, Aire, Energía Eléctrica, Equipos, Refacciones) y colocación de ademes y recubrimientos.

V OPERACION DE TUNELES DE TRANSITO

## V OPERACION DE TUNELES DE TRANSITO

Con el fin de garantizar al usuario las condiciones de seguridad y comodidad que le den confianza para transitar en un ambiente ajeno a su costumbre, es necesario que los túneles sean previstos del equipamiento adecuado. De esta manera, la ventilación, la iluminación y el control adquieren una gran importancia en la operación del túnel, y como consecuencia, del proyecto mismo.

Es importante señalar, que los costos de operación son un parámetro fundamental para la evaluación de este tipo de obras, ya que adicionalmente a los costos de conservación normales de sistemas al aire libre, el túnel debe ser continuamente ventilado, iluminado y vigilado por el personal encargado de su operación, lo que hace sus costos considerablemente mayores.

## SEGURIDAD.

Por lo general, dentro de un túnel, las condiciones de circulación presentan una serie de aspectos diferentes con respecto a los sistemas al aire libre. Unos favorecen la circulación y otros en cambio la dificultan.

Las condiciones que favorecen la seguridad y comodidad

del usuario, son entre otras: la exigencia de una mayor atención de usuario al entrar al túnel, menores distracciones por el medio ambiente, mayor control de la velocidad permitida, - la inexistencia de cruces y desviaciones en general, y la no-circulación de peatones y ciclistas. Sin embargo, los factores que dificultan la operación en el túnel también son importantes, entre estos sobresalen: menor iluminación mayor opacidad, mas ruido, sensación de estrechez, etc.

La presencia de un accidente dentro de un túnel, representa mayores consecuencias que un accidente al aire libre, - ya que puede provocar reacciones en cadena difíciles de prever y controlar, por lo que es indispensable que en todo proyecto se contemplen las medidas de seguridad adecuadas de acuerdo a la magnitud de cada obra en particular y sobre todo el volumen y tipo del tránsito esperado.

Estas normas de seguridad estan estrechamente ligadas a las diversas actividades del proyecto y deben contemplarse desde su origen, principalmente en lo que respecta a la ingeniería de Tránsito., al proyecto geométrico, a la iluminación y a la ventilación.

La Ingeniería de Tránsito debe reglamentar la circulación tanto en los accesos y terminales como en el interior del túnel.

El proyecto geométrico debe proveer las facilidades para realizar eficientemente las labores de limpieza de piso y paredes del túnel y de mantenimiento de equipo de iluminación y ventilación sin entorpecer la operación de la obra. En casos particulares de gran longitud, deben establecerse zonas para refugio temporal de vehículos accidentados, y cuando además -- sean tuneles unidireccionales separados, deben preverse galerías de liga o intercomunicación entre ambos ductos a cada determinada distancia para que en casos de incendio o cualquier anomalía, se puedan desalojar los vehículos por el otro túnel. Para túneles bidireccionales es conveniente considerar siempre los dispositivos necesarios para dar vuelta o cambiar de vialidad.

Los proyectos de iluminación y ventilación, deberán prever características en los materiales que garantice resistencia mecánica de acuerdo a las condiciones de trabajo a que va a estar sometido el equipo; resistencia a la corrosión, al viento, al agua, etc. La distribución de circuitos se planteará de tal forma que una falla local no anule todo el sistema, y para casos especiales, como un túnel largo, es conveniente -- que los circuitos propuestos se conecten de ser posible a diferentes fuentes de abastecimiento de energía.

## V.1 ILUMINACION DE TUNELES DE TRANSITO

La Iluminación de Túneles como una importante medida de seguridad, debe especificarse con base en criterios y normas - que consideren la longitud del túnel, la velocidad de operac---ción, los niveles de luminosidad en los accesos del túnel, y - el tipo de vehículos que circulen ya sea en un sentido o en --ambos, y los tiempos de adaptación residual de la retina a los cambios de luz; los cuales requieren de un mayor tiempo al pasar de luz a oscuridad que el necesario en el caso inverso.

La intensidad del tráfico en los tramos de los túneles- y las variaciones en las condiciones exteriores de la obra, --determinan el nivel de adaptación del ojo humano al momento de entrar el conductor en el túnel; puede crearse inclusive el --efecto psicológico de entrar a un agujero negro. Por esta ra--zón, es recomendable que los proyectos de iluminación de túne-les, sean realizados con mucha atención por ingenieros especia-listas en iluminación, conocedores de las normas y criterios - que sobre el particular existen.

El proyecto de iluminación de un túnel puede dividirse- según las necesidades de iluminación, en cinco etapas:

1. Zona de Acceso.
2. Zona de Umbral.

3. Zona de Transición.
4. Zona Interior.
5. Zona de salida.

Cada una de estas zonas tienen criterios específicos para su iluminación, y varían según el propósito a que se va a destinar el túnel.

Cabe mencionar; que los proyectos que requieren de mayor atención en cuanto a su iluminación se refiere, son los -- túneles carreteros, en los que las variaciones de los niveles de luz alcanzan su mayor importancia por la necesidad de adaptación de la retina a los diferentes grados de iluminación de dichas zonas del túnel. Dada la importancia de los grados de iluminación en este caso, a continuación se anotan los niveles de luminancia recomendables en cada zona.

Zona de acceso	-	Sin alumbrado longitud 250 m.
Zona de umbral	-	Nivel de luminancia 600 $\text{cd/m}^2$ longitud 100 m.
Zona de transición	-	Nivel de luminancia 600-15 $\text{cd/m}^2$ longitud 250 m.
Zona central	-	Nivel de luminancia 15-10 $\text{cd/m}^2$
Zona de salida	-	Nivel de luminancia 15-10 $\text{cd/m}^2$

Vale la pena mencionar que en la noche la situación es-

distinta, la mayoría de las autopistas fuera de las ciudades - no son iluminadas, y el nivel de luminancia se puede bajar a -  $5 \text{ cd/m}^2$  en todo el tramo de túnel, y hay que instalar una zona de adaptación a la salida del túnel y señalización a la entrada.

## V.2 VENTILACION DE TUNELES DE TRANSITO

La combustión de gasolina o diesel produce gases nocivos a la salud o nubes de humo negro, cuyos efectos son la toxicidad y la falta de visibilidad, aunque el túnel en cuestión puede requerir de ventilación solo por el consumo humano.

Se hace necesarios entonces la ventilación del túnel con el fin de diluir los gases nocivos, muy particularmente el de monóxido de carbono.

Este sistema de ventilación se diseña considerando los volúmenes de tránsito y las condiciones de circulación, así como las características del túnel.

Basicamente existen dos formas de ventilación: La natural y la forzada o artificial. La primera provocada exclusivamente por efecto de los vientos dominantes en la zona y de la diferencia de altura y temperatura entre los portales del túnel, lo que genera una diferencia de presiones que varía en intensidad a lo largo del tiempo y no puede ser controlada. En condiciones favorables puede esperarse una velocidad de 2 a 5 m/s. La ventilación artificial puede realizarse con cualquiera de los tres sistemas siguientes:

- Sistema Longitudinal
- Sistema Semitransversal.

- Sistema Transversal.

Cada uno de estos sistemas es recomendable para una determinada longitud de túnel y sus características, en función de sus costos de construcción y mantenimiento, así como de la eficiencia del sistema; siendo los mas económicos los sistemas de ventilación natural y siguiendo los otros en el mismo orden en que fueron mencionados.

El equipamiento de un túnel largo con elevados volúmenes de tránsito, requiere de dispositivos de detección de monóxido de carbono y de humos, que determinen su concentración en la atmosfera del túnel y transmitan esa información a una sala de control de operación, donde a través de una computadora de regule la inyección de aire fresco.

## V.3 CONTROL

El Control, como parte de la operación del túnel, resulta indispensable para el logro de una fluidez en la circulación que sea compatible con la demanda máxima del tránsito para evitar embotellamientos en caso de descomposturas o accidentes, y para proporcionar seguridad y comodidad al usuario -- a través de un sistema de información adecuado. Otra función que tiene, es controlar y reducir los gastos de la energía que requieren los equipos para la operación del túnel.

El control reviste varios aspectos, que en los casos -- mas complejos puede comprender:

- Integración de la información proveniente del túnel -- como lo es la velocidad y densidad, procesada por computadora para proporcionar datos sobre la velocidad -- necesaria para mantener un nivel de servicio compatible con la demanda máxima de tránsito.
- Detección automática de las paradas o de las reducciones de velocidad.
- Vigilancia por monitores de todos los espacios disponibles para la circulación.

- Sistemas de control automatico de ventilación y de iluminación.
- Enlace por radio y/u otros sistemas con el personal que debe intervenir en cada caso.
- Un sistema eficaz de alarma.
- Un sistema eficiente de información a los usuarios -- señalamiento, alto parlantes y radio con el fin de -- influir en su comportamiento.
- La individualización de los carriles a nivel de señalamiento, (en los casos en que sea necesario, túneles carreteros por ejemplo).

Es evidente que un sistema como el descrito, resulta -- costoso desde el punto de vista de la instalación y de la conservación, por lo que su uso se puede limitar a túneles de importancia; en túneles cortos o de poco tránsito, estos equipos deben limitarse, y se recomienda realizar aforos para conocer la evolución de los volúmenes de tránsito con la intención de -- preveer la operación futura.

## VI CONCLUSIONES

## VI CONCLUSIONES

El éxito que puede alcanzar la tecnología de vías terrestres se ve ampliamente incursionado por la construcción de túneles y este a su vez, está condicionado por las diversas características del suelo de nuestro territorio. El análisis económico del túnel conduce a una toma de decisiones muy importantes, ya que de esta manera se justifica su construcción.

Los avances tecnológicos con que se cuenta hacen ver la posibilidad de la construcción de túneles como una alternativa de solución que optimiza nuestros recursos al reducir costos, al minimizar el tiempo de construcción y al mejorar su operación.

Es conveniente que el diseño y construcción de túneles sea llevado a cabo retroalimentando constantemente cada una de las fases considerando siempre las características geométricas, mecánicas, estructurales, etc., los datos que el mismo avance de la obra pueda aportar y la experiencia propia del constructor. Esto conducirá a una mejor y más fácil ejecución de cada una de las etapas no solo del túnel, sino también del sistema del que forma parte.

Se puede aseverar, sin lugar a dudas, que se cuenta con la tecnología y los recursos necesarios para realizar una obra de esta especie, donde cada una de las condiciones re-

requerimientos de seguridad y funcionalidad pueden ser solucionados con eficiencia y economía.

## COMENTARIOS.

El incremento en la demanda de tránsito y transporte - ha generado un constante desarrollo de la tecnología de vías terrestres en el mundo entero. Nuestro país con sus condiciones geográficas y demás, presenta un panorama similar en ese sentido, por esta razón, la construcción de túneles puede ser considerada como una muy importante alternativa de solución.

Atendiendo a esta necesidad de conocimientos y difusión de la tecnología y el panorama general que envuelve a estas estructuras, en el presente documento se pretende conjuntar y estudiar de manera genérica e informativa las diferentes fases del proyecto túnel de tránsito. No se busca profundizar el desarrollo de cada una de las etapas dado que cada uno de los temas, e inclusive varios de los apartados, podría constituir en si mismo un tema de muy amplia discusión.

## BIBLIOGRAFIA

## "INSTRUMENTACION Y MEDICIONES EN TUNELES"

MEMORIA DE LA REUNION TECNICA 1981  
SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE SUELOS  
DIVERSOS AUTORES  
OAXTEPEC MOR. MAYO DE 1981.

## "TUNELES CARRETEROS 1989"

MEMORIA DE LA REUNION TECNICA 1982  
SEMINARIO DE TUNELES CARRETEROS ORGANIZADO POR  
SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE SUELOS. A.C.  
DIVERSOS AUTORES  
MEXICO D.F. OCTUBRE DE 1982.

## "TUNELES EN SUELOS BLANDOS Y FIRMES"

SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE SUELOS  
DIVERSOS AUTORES  
1a. REIMPRESION 1985.  
MEXICO 1982.

## "LOS TUNELES CARRETEROS"

MEMORIA DE LA REUNION CONJUNTA 1985  
AMITOS. AMIYTAC, SMIE, SMMR, SMMS.  
DIVERSOS AUTORES  
MEXICO D.F. SEPTIEMBRE DE 1985.

"EXPERIENCIAS SOBRE ALGUNOS TUNELES CONSTRUIDOS  
EN LA REPUBLICA MEXICANA"

MEMORIA DE UNA REUNION TECNICA 1986

SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE SUELOS

DIVERSOS AUTORES

GUADALAJARA JALISCO OCTUBRE 3 DE 1986.

"LOS TUNELES PERFORADOS EN LAS ARCILLAS  
BLANDAS DE LA CIUDAD DE MEXICO"

MEMORIAS Y COMENTARIOS DE DICHOS TUNELES

DIVERSOS AUTORES

SECRETARIA GENERAL DE OBRAS, DGCOH.

EDITADA EN 1988.

"ESCUDOS Y TOPOS"

DESCRIPCION, MEMORIA Y COMENTARIO DE ALGUNOS  
EQUIPOS DE PERFORACION.

DIVERSOS AUTORES

SECRETARIA GENERAL DE OBRAS DGCOH

EDITADA EN 1988.

- CURSO VICTOR HARDY 1985

TOMOS I Y II

AMITOS

DIVERSOS AUTORES

MEXICO 1985.

←CURSOS VICTOR HARDY 1987

TOMOS I Y II

AMITOS

DIVERSOS AUTORES

MEXICO 1987.

ROCK MECHANICS DESIGN IN MINING AND TUNNELING.

A.A. BALKEMA

BOSTON 1984.

-TECNICA MODERNA DE VOLADURAS DE ROCAS

V. LANGEFORS Y B. KIHLSSTROM

URMO S.A. DE EDICIONES 1976.

ENGINEERING CLASSIFICATION OF ROCK MASSES FOR THE

DESIGN OF TUNNEL SUPPORT

ROCK MECHANICS, SPRINGER VERLAG

BARTON N., LIEN R Y LUNDE.

ROCK MASS CLASSIFICATION IN ROCK ENGINEERING

PROCEEDING SIMPOSIUM ON EXPLOTATION FOR ROCK

ENGINEERING ED. 2.T.

BIENIAWSKI, A.A. BALKEMA.

ROTTERDAM.

MANUAL DE OBRAS CIVILES, GEOTECNIA

FASCICULOS B.I.I. A B.I.5

CPE, S. I. URMO MEXICO D.F.

INTERACCION SUELO ESTRUCTURA DE SOPORTE  
EN TUNELES

LEONARDO REYES S.

TESIS ING. CIVIL 1984.

INSTRUCTIVO PARA REALIZAR LAS OPERACIONES EN EL  
CICLO DE EXCAVACION DE UN TUNEL POR EL PROCEDI-  
MIENTO CONVENCIONAL.

ING. VICTOR HARDY CONTRERAS 1973.

TRASCENDENCIA FUTURA, ESTADO DEL ARTE Y DESA--  
RROLLO HISTORICOS DE LAS OBRAS SUBTERRANEAS EN  
MEXICO. AMITOS SEPTIEMBRE DE 1983.