



***Innovaciones en el Diseño y Construcción de
Túneles.***

ESPECIALIDAD: Ingeniería Civil

Clemente Poon Hung
Maestro en Administración de la Construcción.

5 de Diciembre del 2013
México, D.F.

CONTENIDO		Página
	Resumen ejecutivo	3
1	Introducción	4
2	Desarrollo del Tema	5
	Objetivo	5
	Ubicación del Proyecto	5
	Concepción del Proyecto y Selección de Ruta	6
	Caminos de acceso en tramos	7
	Seguimiento y control de la obra	8
	Estudios Previos	9
	Geológicos	9
	Geofísicos	10
	Geotécnicos	10
	Integración de los resultados	11
	Condiciones Geotécnicas básicas para diseño.	12
	Características Generales los Alineamientos Horizontales y Verticales	13
	Proyecto Geométrico	13
	Análisis y Diseño	15
	Definición de Procesos Constructivos de Túneles	17
	Trazo	17
	Barrenación	18
	Carga de explosivo y voladura	21
	Rezaga	21
	Obras de acceso	22
	Emportalamientos	22
	Excavación	23
	Concreto lanzado	25
	Diseño Estructural del Revestimiento Definitivo	27
	Obras Complementarias	29
	ITS (Sistemas Inteligentes de Transporte)	36
	Túneles Falsos	42
3	Conclusiones	44
4	Referencias	46
5	Reconocimientos	47

RESUMEN EJECUTIVO

En el Presente documento se muestra las principales innovaciones aplicadas en el diseño y construcción de los Túneles de la Carretera la Durango-Mazatlán, La obra tiene 115 estructuras, con longitudes que van de los 15 a los 1,124 metros, así como 61 túneles en total, con longitud de 90 a 2,794 metros; 222 kilómetros son de dos carriles y ocho, de cuatro. El túnel Sinaloense, que es el más largo tiene una longitud de 2,794 metros, cuenta con dos carriles de circulación y un túnel lateral que funciona como galería de emergencia.

Nueve túneles tienen un sistema altamente avanzado de seguridad y monitoreo, que los coloca en la categoría de túneles inteligentes. Al formar parte del corredor Matamoros-Mazatlán, todo esto coloca a la autopista Durango-Mazatlán como la obra pública más grande en la historia de las carreteras en México. Por todo lo anterior, presento las actividades desarrolladas del proyecto y la construcción de los túneles. A través de textos e imágenes que narraron la labor que día a día desarrollaron los ingenieros y trabajadores de la obra, el legado de la experiencia de la ingeniería mexicana, mostrando que está a la vanguardia en la aplicación de nuevas tecnologías en la ejecución de carreteras, puentes, viaductos y por supuesto túneles, que es el tema central de este ensayo.

Palabras clave: Túneles, Proceso Constructivo, Análisis y Diseño, Obras complementarias, Durango-Mazatlán y Túneles Falsos.

1. INTRODUCCIÓN.

Los caminos a lo largo de la historia han sido parte fundamental del desarrollo económico, político y cultural de las naciones, y México no es una excepción. En el nuevo siglo el Gobierno Mexicano ha puesto particular interés en hacer posible la comunicación mediante un sistema de carreteras de altas especificaciones que conecte de manera eficiente a los estados de la República Mexicana y reduzca significativamente los tiempos de traslado.

Antiguamente, para ir de una ciudad a otra, el cruce de la sierra se hacía en mula o a caballo. En la década de 1950 se trasladaba a pasajeros entre Durango y Mazatlán en camionetas cerradas, con cupo para 10 personas; posteriormente, se utilizaron autobuses con capacidad de 30 pasajeros. Los viajes eran muy largos, además de incómodos y peligrosos, ya que el camino era de terracería, generalmente en malas condiciones, aunado a los deslaves y derrumbes durante la época de lluvias. Por lo que respecta a mercancías, desde Mazatlán se transportaba tomate, papa, ejote y sandía a Durango, Monterrey, Chihuahua, Torreón, Gómez Palacio y otros pueblos y ciudades de la Comarca Lagunera.

Después de 10 años fue inaugurada la carretera federal “Matamoros-Mazatlán” en el tramo. Durango-Mazatlán anhelada por 117 años, que en su tiempo cubrió las necesidades para lo que fue creada. Frente a esa realidad y superando todos los obstáculos, decididos a encaminarnos a las nuevas tendencias de la modernidad se propone una autopista que permitiera la libre comunicación entre Durango- Mazatlán.

El proyecto por fin se cumplió pese a los obstáculos y dificultades se creó una de las mayores infraestructuras carreteras ,entre sus asombrosas construcciones se realizo el túnel Sinaloense, que tiene una longitud de 2,794 metros, cuenta con dos carriles de circulación y un túnel lateral que funciona como galería de emergencia. Nueve túneles tendrán un sistema altamente avanzado de seguridad y monitoreo, que los coloca en la categoría de túneles inteligentes.

Los beneficios inmediatos de la construcción han sido empleos directos creados, del orden de 3,500 y 10,500 indirectos. Pero se pronostica que el detonante comercial y turístico será trascendental al formar parte del corredor Matamoros-Mazatlán. Todo esto coloca a la autopista Durango-Mazatlán como la obra pública más grande en la historia de las carreteras en México.

2. DESARROLLO DEL TEMA

Los grandes retos que se ha planteado México son continuar e iniciar programas y acciones específicas que impulsen el desarrollo de la sociedad, el crecimiento económico y la integración del país; para ello una de sus prioridades ha sido invertir en Infraestructura Carretera.

Al iniciar el nuevo siglo, se proyectó que para cumplir con dicho desarrollo social y su base obligatoria de progreso económico era necesaria la construcción de un eje carretero que iniciara en la ciudad fronteriza de Matamoros y llegara al puerto de Mazatlán.

Como un antecedente al proyecto de la Autopista Durango-Mazatlán se realizó la Carretera Federal Durango-Mazatlán, inaugurada en 1960 con una extensión de 322 km, la cual atraviesa la sierra madre occidental cuya orografía es sinuosa, de grandes acantilados y de un escenario espectacular.

Frente a esa realidad, superando el temor y atendiendo con decisión a las necesidades de un país que inicia una etapa de modernidad, se construye la Autopista, la cual permite una comunicación libre entre Durango y Mazatlán.

OBJETIVO

- Atravesar la Sierra Madre Occidental mediante una autopista de altas especificaciones
- Reducir el tiempo de recorrido.
- Proporcionar velocidades entre 90 y 110 km/h.
- Conservar la flora y fauna del lugar, así como restaurar el impacto ambiental
- Ofrecer seguridad y confort.
- Conformar el corredor carretero Mazatlán – Durango – Torreón - Gómez Palacios – Saltillo – Monterrey -Reynosa y Matamoros.



(Fig. 1) Sierra Madre Occidental

UBICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de construcción de la Autopista Durango-Mazatlán, (Fig. 2) forma parte del corredor Matamoros-Mazatlán que atraviesa , Tamaulipas Nuevo León ,Coahuila, Durango y Sinaloa, en la región noroeste de México con una longitud de 1,241 kilómetros,



(Fig. 2) Ubicación de la Autopista Durango-Mazatlán

CONCEPCIÓN DEL PROYECTO Y SELECCIÓN DE RUTA.

Esta carretera fue concebida como una autopista de tipo A4, aunque en una primera etapa se planteó una sección de tipo A2, que sería ampliada posteriormente. En la primera fase, la vía cuenta con 12.0 m de ancho de corona, dos carriles de circulación de 3.5 m cada uno y acotamientos laterales de 2.5 m. No obstante se planteó que un tramo de 8 km, se construyera en su inicio con una sección de tipo A4, de cuatro carriles de 3.5 m de ancho cada uno y 21 m de ancho de corona.

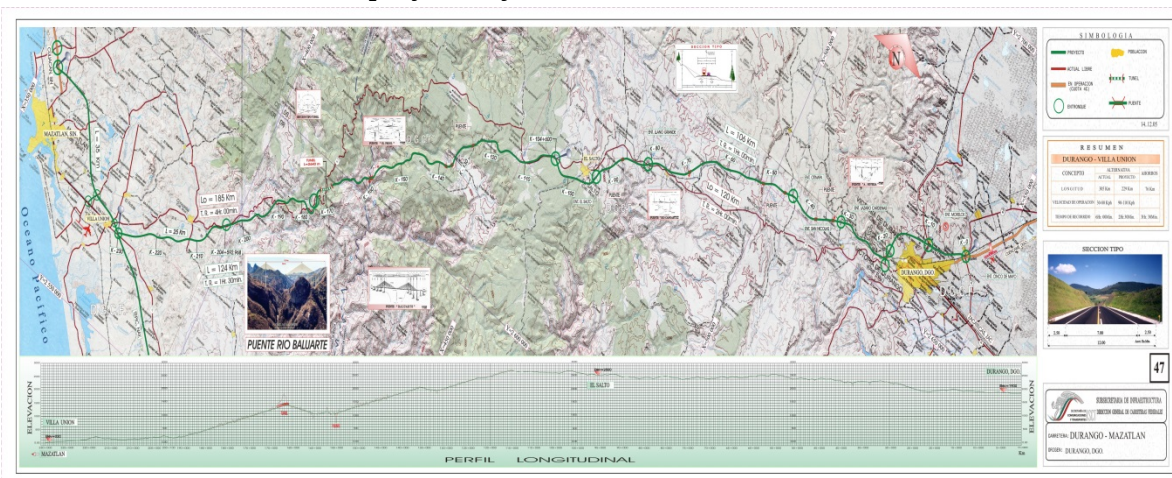
Esa sección se definió en relación con la zona más accidentada del tramo donde se encuentran los puentes especiales Baluarte y Carrizo que, por su importancia y condiciones propias de diseño, se proyectaron para una sección de cuatro carriles y así evitar una ampliación de la autopista en la zona más accidentada del proyecto.

Dentro del desarrollo del proyecto se realizaron diferentes estudios como levantamientos topográficos, estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos para conocer el tipo de terreno sobre el cual se construiría la carretera.

De los estudios geotécnicos, se obtuvieron sondeos, los cuales permitieron obtener muestras que llevamos a laboratorios para determinar a su vez las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos y rocas, con las que se obtuvo un modelo geotécnico, que permitió efectuar el diseño adecuado con el que se trabajó y así proyectar la obra.

Posteriormente se planteó el proceso constructivo más adecuado para cada proyecto de acuerdo con los estudios y análisis previos, se llevó a cabo la ejecución de la obra así como la supervisión y seguimiento técnico durante la construcción.

Dentro del proyecto geométrico, se analizó varias opciones de trazo, para finalmente seleccionar la solución más adecuada desde el punto de vista económico, técnico y funcional afín de realizar el proyecto ejecutivo. (Fig. 3)



(Fig. 3 Selección de ruta)

Entre las ventajas detectadas para esa opción de diseño destacan la mejora en el nivel de seguridad, en la comodidad, así como en la disminución del tiempo de recorrido y el bajo

costo de inversión. La opción elegida y la que se consideró como la mejor en todos los aspectos, fue la construcción de una nueva autopista de altas especificaciones entre Durango y Mazatlán.

Partiendo de la consideración primordial para seleccionar la ruta de esta magna obra, fue el conceptualizar una carretera de altas especificaciones, para proporcionar a los usuarios seguridad y confort, con el mejor alineamiento tanto horizontal como vertical, hubo la necesidad de adoptar criterios dependiendo de las características de los suelos y rocas, para decidir las alturas máximas de cortes y terraplenes ,para tomar en cuenta dentro del proyecto y la ejecución de túnel o de viaductos, con el objeto de lograr una vía lo más recta posible.

En las vías terrestres es aplicable el dicho popular de que la distancia más corta entre dos puntos es la línea recta. En regiones con condiciones orográficas difíciles, la aplicación stricto sensu de esa regla llevaría a construir numerosos túneles, pero en el pasado las dificultades técnicas encontradas y el correspondiente alto costo limitaron la construcción de ese tipo de obras, excepto en el caso de las vías de ferrocarril. Esa situación ha cambiado debido a las estrictas especificaciones aplicables al diseño de las carreteras modernas, a las restricciones en materia de afectación al impacto ambiental y a los avances considerables que se han presentado en el arte de construir túneles.

Lo anterior coadyuvó en gran medida en el cuidado del medio ambiente, ya que se evitó modificar la superficie original del terreno en todos estos tramos donde se construyeron viaductos y túneles, y con ello se aseguró mantener intacto los corredores biológicos que utiliza la fauna propia del lugar y por supuesto se mitigaron los efectos ambientales que pudieran haber causado movimientos de material producidos por los cortes y terraplenes.

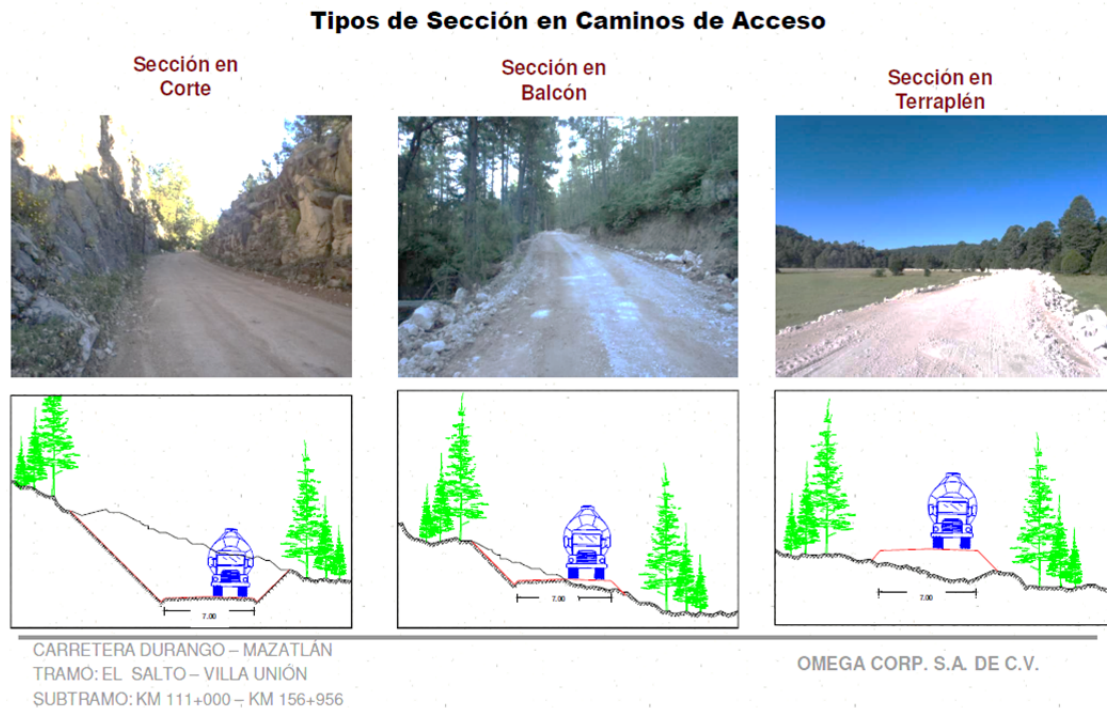
Ya que en la ejecución de los túneles se trabajó simultáneamente, se eligió emplear el método austriaco, ya que presentaba un mayor beneficio a la construcción que utilizar una tuneladora, el proceso por medio de tuneladora es muy costoso y tendríamos que colocar una en cada acceso del tramo, por lo que se decidió trabajar con un método que nos permitiera realizar el proceso constructivo de manera eficiente y ajustándose a las necesidades de la construcción.

Caminos de acceso en los tramos

Durante la construcción de la carretera fue necesario construir más de 60 km de caminos de acceso. Se establecieron convenios económicos con los comisariados ejidales para realizar dichos caminos o en su caso dar mantenimiento a los ya existentes.

Se utilizó la carretera federal número 40 y caminos vecinales próximos al trazo de la autopista. Asimismo, se tuvieron que construir nuevos caminos para tener acceso a puntos específicos en la obra, buscando condiciones aceptables de tránsito, mantenimiento, así como establecer el menor daño posible al sistema ecológico.

Por la topografía irregular fue común la construcción de caminos para cada tramo (Fig. 4) debido a las barreras naturales que presentan las montañas o los profundos barrancos. En un principio, se estimó que los nuevos caminos de 3 a 5 m de ancho tendrían una longitud total de más de 60 km, pero conforme avanzó, esa longitud se incrementó considerablemente, por las dificultades que representó la topografía en la zona. Esos caminos debieron mantenerse en condiciones operables durante todo el tiempo que duró la construcción.



(Fig. 4) Tipos de Sección en Caminos de Acceso

La Autopista Durango-Mazatlán, (Fig. 5) en su tramo El Salto-Concordia, fue el mayor desafío en este enorme Proyecto Carretero Nacional que desde su concepción considero esquemas eficaces para la protección de los recursos naturales y del ambiente.



Fig. (5) La Autopista Durango-Mazatlán,

Seguimiento y control de obra

El seguimiento y control de la Residencia de Obra, en gran medida es el auxilio técnico y administrativo en la etapa de construcción. Es un servicio relacionado con la obra pública que supervisa día con día los volúmenes de obra ejecutados.

Comprueba los avances reportados por las constructoras sean correctos y pueda corroborarlos; adopta procedimientos constructivos aceptables; establece los sistemas de higiene y de seguridad necesarios para evitar accidentes o daños al personal de la obra, la maquinaria, al equipo de construcción y a los usuarios que, en su caso, puedan ser afectados por la ejecución de los trabajos.

Otra función es vigilar que se realicen las acciones de mitigación al impacto ambiental y que se disponga oportunamente de la documentación que permita la conducción efectiva de la obra.

Se contrató la prestación de servicios para el monitoreo remoto en tiempo real de las estructuras más importantes de la obra, el puente Baluarte y el túnel El Sinaloense, el cual tuvo un óptimo funcionamiento.

Se utilizaron cámaras IP inalámbricas colocadas en sitios estratégicos que dieron una visión general de las actividades en tiempo real, desde cualquier parte del país que pudieron ser visualizadas por medios electrónicos.

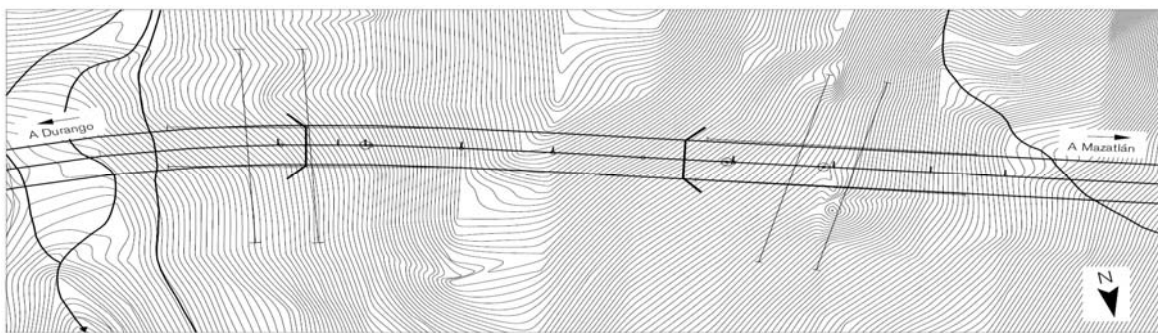
ESTUDIOS PREVIOS

Para establecer el marco geológico estructural y determinar las características de resistencia y calidad de la roca por excavar en cada uno de los 61 túneles de la autopista Durango-Mazatlán se realizaron estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos apoyados con levantamientos topográficos en los distintos sitios.

Estudios Geológicos

Se realizó un levantamiento fotogeológico regional básicamente orientado a la identificación de las principales discontinuidades (fracturas, seudoestratificaciones e hidrología del sitio, entre otros). A partir de ese estudio, se detectaron las estructuras geológicas mayores, tales como megafallas y sistemas de fracturas regionales.

Se realizó entonces el acopio de la información de todos los túneles, la cual se organizó, sintetizó y estructuró para poder visualizarla e interpretarla (Fig. 6). Se procuró uniformar los términos y simbologías aplicables a las unidades litológicas identificadas en cada túnel, para lograr una correlación litoestratigráfica y geotécnica coherente.



(Fig. 6) Plano topográfico del túnel Santa Lucía, para indicar la ubicación de los sondeos geotécnicos realizados.

Geofísicos

El estudio geofísico con enfoque geotécnico se realizó con el propósito de conocer de manera indirecta las características del subsuelo mediante la aplicación de métodos geofísicos de resistividad en su modalidad de sondeo eléctrico vertical (SEV).

La aplicación del método de prospección eléctrica permite evaluar la variación de la resistividad con la profundidad asociada, por una parte, con respecto al contenido de agua que se aloja entre los poros y fracturas internas de la roca y, por otra, a la presencia de minerales formadores de rocas (conductores o resistivos).

Con estos estudios, se correlacionó la información geofísica de las unidades estratigráficas de superficie, para establecer un modelo geológico conceptual, determinando la calidad de roca de los horizontes detectados. Previamente a la modelación de los datos geofísicos de campo, se revisaron los cálculos de la resistividad aparente y la coherencia de las curvas obtenidas.



(Fig. 7) Equipo sondeo eléctrico vertical

Posteriormente, se proporcionaron valores suavizados al software Resix Plus, para obtener un modelo estratificado de cada uno de los sondeos. Los valores de resistividad y de espesor verdaderos se correlacionaron con la geología de superficie para definir las unidades u horizontes geoelectrónicos. Con esa información, se llevó a cabo sondeos exploratorios directos en sitios necesarios, con la finalidad de obtener muestras de los materiales de las zonas a construir los túneles. Para esos sondeos se emplearon diversos equipos rotatorios, como el Winkie GW- 15”.

Para el muestreo continuo, en cada uno de los sondeos se emplearon barriles IAW, con diámetro interior de 35 mm. El motivo por el que se empleó equipo ligero para la ejecución de los trabajos fue la inaccesibilidad a los sitios donde se llevó a cabo las perforaciones, así como por las condiciones climatológicas existentes en el área. Una vez realizados todos los

trabajos de campo, las muestras obtenidas de los sondeos geotécnicos se llevaron al laboratorio con el fin de realizar los ensayos correspondientes y posteriormente la clasificación geomecánica.

Geotécnicos

Los ensayos geotécnicos consistieron en pruebas índice y mecánicas. En las Primeras se obtuvo el peso y módulo volumétrico de la roca. En la segunda, su resistencia a la compresión simple y en pruebas triaxiales se determinaron los parámetros de resistencia y deformabilidad de la roca intacta; así mismo se efectuaron ensayos de resistencia por compresión diametral (prueba brasileña) y se determinó el índice de calidad de la roca (RQD, por sus siglas en inglés). Las pruebas de resistencia a la compresión simple se realizaron con carga controlada, con capacidad de hasta 500 t de carga.



(Fig. 8) Estudio Geotécnico.

Se ensayaron muestras con un diámetro medio de 34.9 mm y una relación de esbeltez media de 2.61. Los ensayos de tensión brasileña se realizaron sobre discos de 3.5 cm de diámetro y 2.0 cm de espesor, aproximadamente. Los ensayos triaxiales se realizaron para presiones de confinamiento de $s_3 = 7.5, 15$ y 30 MPa, aumentando la presión axial S_1 hasta la falla. Ese proceso se repitió con tres probetas similares para los distintos S_3 aplicados.

Integración de Resultados

Para integrar los estudios, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos de los levantamientos topográficos, los estudios geológicos y geofísicos y las pruebas de laboratorio y la integración geotécnica. De este modo, se llegó a un prediseño adecuado de la excavación y de los sistemas de soporte y estabilización del terreno que aloja a cada uno de los túneles.

Una vez recabada y procesada la información de campo y laboratorio, y con base en la litología definida para cada uno de los túneles, se caracterizaron las unidades en términos cualitativos y cuantitativos. Las unidades de roca por excavar en cada uno de los túneles se denominaron, según convino, de acuerdo con alguno de los sistemas más usuales de clasificación de masas rocosas para tuneleo.



(Fig. 9) Clasificación de rocas obtenidas en sitio

Las caracterizaciones geomecánicas utilizadas en los proyectos de todos los túneles son Rock Mass Rating (RMR) de Z.T. Bieniawski y la del Instituto Geotécnico Noruego, o sistema Q, desarrollada por Barton, Lien y Lunde. Ambas clasificaciones se basan en los datos de recuperación de núcleos, número de familias de discontinuidades, rugosidad y estado general de las juntas, presencia de agua y, adicionalmente, pueden considerar la resistencia de la roca matriz, la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación y el tipo de obra.

De dicha clasificación se desprendieron las recomendaciones preliminares para el soporte de la excavación, tiempos de autoaporte y tamaño máximo del claro que no lo requiere. Se elaboró un perfil geotécnico integrado que muestra la distribución de las unidades geotécnicas e indica las clasificaciones geomecánicas a lo largo del eje de cada uno de los túneles. Los resultados de esos estudios permitieron determinar que, en la mayor parte de los túneles de la carretera, se excavaría en macizos rocosos duros y rígidos con distintos grados de fracturamiento.

Por otro lado, la profundidad de los túneles es menor a los 200 m, salvo el túnel El Sinaloense que tiene una cobertura máxima de 400 m aproximadamente.

Condiciones Geotécnicas básicas para diseño.

La mayoría de las condiciones geotécnicas que atraviesan los túneles corresponden, por tanto, al caso en el que las solicitaciones de carga sobre los elementos de soporte temporal son del tipo de presión de aflojamiento, con bloques o cuñas potencialmente inestables y zonas de material degradado sobre la zona de clave y/o hastiales. Es así que se propusieron a priori siete condiciones geotécnicas básicas para fines de diseño (Tabla 1); de acuerdo con las escalas de calidad propuestas respectivamente por Bieniawski y por Barton.

De la tabla 1, las condiciones geotécnicas A y B se caracterizan por macizos rocosos compuestos por una roca matriz maciza compacta y resistente, donde prácticamente no existen discontinuidades. Algunos ejemplos de ese tipo de macizos son las formaciones de andesitas e ignimbritas poco alteradas.

En el caso de la condición geotécnica C, se encuentra en macizos rocosos compuestos por una roca matriz regular, con espaciamiento entre discontinuidades pequeño y/o estratos muy delgados. Las juntas de las discontinuidades son lisas y se encuentran abiertas, alteradas y en ocasiones rellenas de arcilla con contenidos de humedad altos.

Además, cuando la roca matriz presenta poca resistencia, existe una mayor tendencia a generarse zonas de material plastificado o en estado de rotura de mayor extensión. En estas rocas, prácticamente no hay trabazón entre bloques. Ejemplos de rocas de ese tipo de macizos son las formaciones de riolitas, andesitas y tobas que se encuentran muy alteradas y/o fracturadas.

Las condiciones geotécnicas D y E corresponden a las peores condiciones geotécnicas previsibles y, además, a los primeros 15 m de excavación en aquellos túneles en los que la calidad del macizo en la zona de portales es muy mala. Se trata de macizos de roca completamente descompuesta o alterada, en los cuales el material se puede comportar más como un suelo que como una roca. También incluye zonas de depósitos de talud con matriz arenosa o limosa que contienen boleos o bloques angulosos de distintas dimensiones.

(Tabla 1)
Clasificación geotécnica para túneles/Geotechnical classification for tunnels

Condición geomecánica Geomechanical condition	Calidad de la roca (RMR) Rock quality (RQD)	Calidad del macizo Quality of the rock mass
A	≥ 81	Muy buena/Very good
B	61 A 80	Buena/Good
C(+)	51 A 60	Buena a regular/Good to Regular
C(-)	41 A 50	Regular/Regular
D(+)	31 A 40	Mala a regular/Bad to Regular
D(-)	21 A 30	Mala a muy mala/Bad to Very Bad
E	≤ 20	Muy mala/Very Bad

La clasificación geomecánica para cada túnel se estableció al definir unidades que tuvieran propiedades de deformabilidad y resistencia similares, creando un modelo con el que se prepararon las bases para los análisis teóricos y numéricos del comportamiento tenso-deformacional de la excavación en sus distintas etapas, y de la interacción con los elementos estructurales que se emplazan dentro de los túneles.

Con base en esos trabajos se definieron las ubicaciones más convenientes de los portales, las propiedades mecánicas de las distintas unidades geológicas, el estado tensional inicial (geostático y/o tectónico), los diferentes modelos geomecánicos a lo largo de cada uno de los túneles y los modelos de análisis.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ALINEAMIENTOS HORIZONTALES Y VERTICALES (TABLA 2)

(Tabla 2)

Concepto	Alternativa		Ahorros
	Actual	Proyecto	
Longitud	305 km	230 km	75 km
Velocidad de operación	30-80 km/h	90-110 km/h	
Tiempo de recorrido	6 h	2 h 30 min	3 h 30 min
Ancho de corona	7 m	12 y 21 m	
Pendiente máxima	10%	6%	
Grado de curvatura máxima	30°	4°	

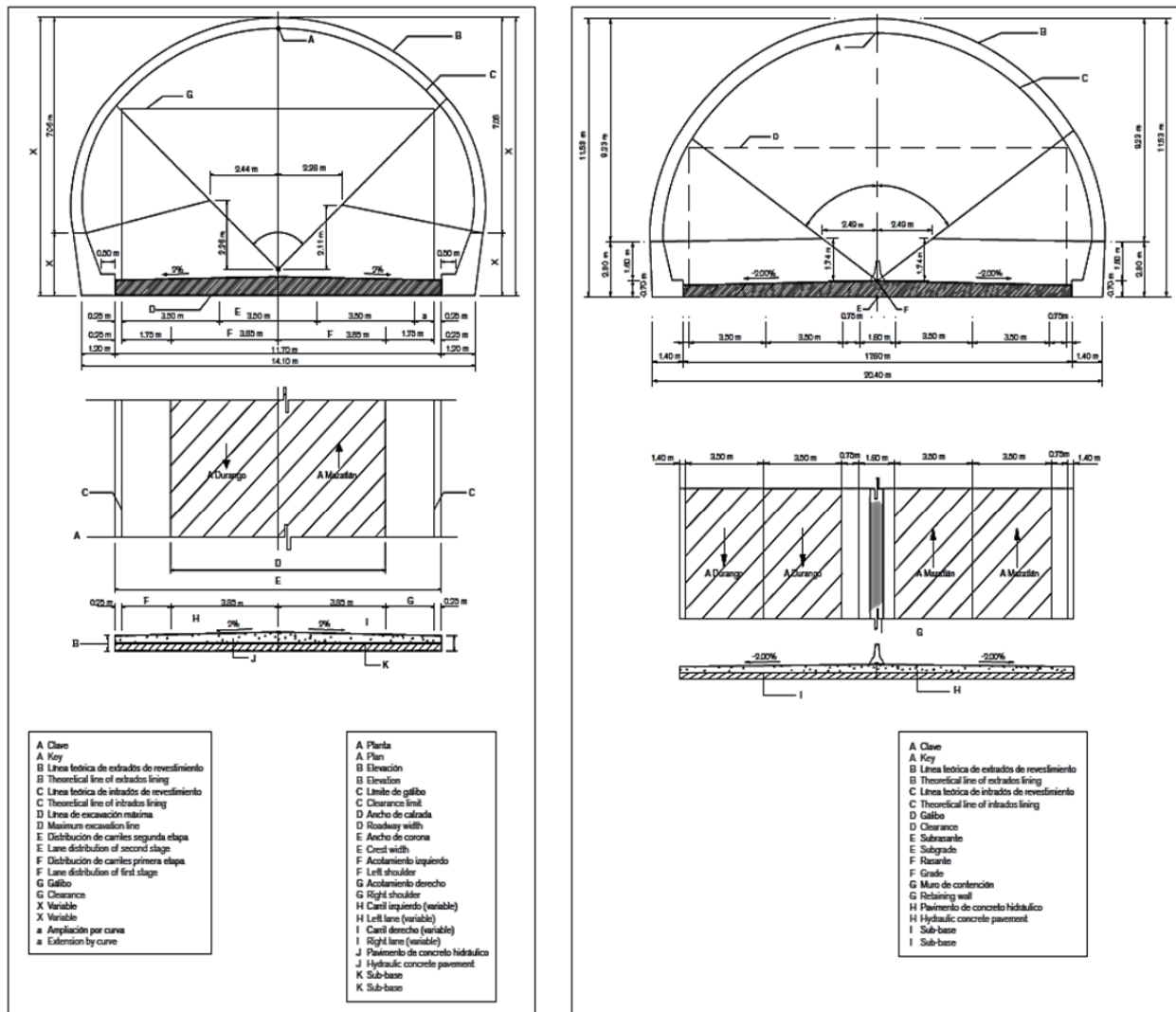
PROYECTO GEOMÉTRICO.

Uno de los aspectos más importantes en el diseño y construcción de un túnel es su geometría. Su definición requiere la coordinación de todas las especialidades que intervienen en el diseño y de los requerimientos marcados por cada una de ellas. Básicamente, el proyecto geométrico del túnel define la sección en función del uso al que estará destinado, es decir que las características geométricas de los túneles dependen de las especificaciones particulares de necesidades impuestas por el trazo de la autopista, así como del procedimiento constructivo por utilizar.

Algunos de los principales aspectos considerados fueron las propiedades geomecánicas de la roca, las condiciones hidráulicas y la estabilidad durante el proceso de excavación, así como el procedimiento constructivo del revestimiento definitivo.

El espacio requerido para el tránsito está definido por el ancho de los carriles y la máxima altura de vehículos de carga considerados en el proyecto. Los túneles tienen una sección geométrica simétrica en toda la parte superior, hasta la junta de colado en las zapatas. Ocho túneles fueron diseñados para albergar cuatro carriles. Esos túneles se definieron a partir de la geometría de los puentes especiales Baluarte y Carrizo, los cuales por sus condiciones propias, se proyectaron geoméricamente con características de carretera tipo A4.

El gálibo de diseño para todos los túneles es de 5.5 m, para lo cual es necesario mantener constantes los arcos de la bóveda y las paredes en los tramos de tangente y curva. Los ajustes correspondientes a la sobreelevación se hacen al variar la altura de las zapatas, hasta alcanzar la pendiente requerida. De esa forma, tanto el ancho de corona, como el gálibo se mantienen constantes.



(Fig. 10) Planos de la sección trasversal de dos carriles y de cuatro

Los túneles, de dos carriles, constan de una banquetta con altura de 20 cm, que es suficientemente alta para cuestiones de seguridad. También cuenta con dos zapatas de 50 cm de base superior y 1.2 m de base inferior.

Los túneles de cuatro carriles cuentan con una base inferior de 1.4 m. y en los túneles en los que hay curva, las zapatas tienen alturas variables para dar las pendientes requeridas por la superficie de rodamiento.

La sección transversal para los túneles de dos carriles, en su línea de extrados, está compuesta por tres arcos, y la línea de intradós, por un arco central. Las zapatas tienen un ancho constante de 1.2 m, un peralte de 0.7 m y una altura variable formada por dos rectas inclinadas, donde se localiza la junta constructiva.

En lo que se refiere al alineamiento vertical, algunos de los túneles se ubicaron en tangente vertical, como Tortuga Nuevo y Carrizo II, mientras que otros, como Papayito III, tienen una curva vertical en el interior del túnel. El alineamiento horizontal de los túneles varía según el caso. Algunos se encuentran en curva, otros con un tramo en curva y otros en tangente, mientras ciertos túneles se encuentran en su totalidad en tangente, como El Sinaloense.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE TÚNELES

El diseño de todos los túneles proyectados obedeció las necesidades impuestas por el trazado, el tipo de carretera y la velocidad de proyecto, entre otros. Y lógicamente, a los aspectos geotécnico-estructurales propios de cada situación particular. Fue necesario aplicar el método de elemento finito (MEF) para él como un método de análisis estructural aproximado (Fig. 11). Éste permitió analizar las deformaciones y los esfuerzos en el medio y el revestimiento para las diferentes etapas de excavación.

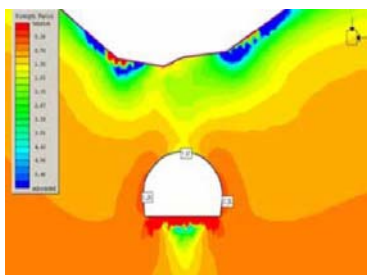


Fig. (11)

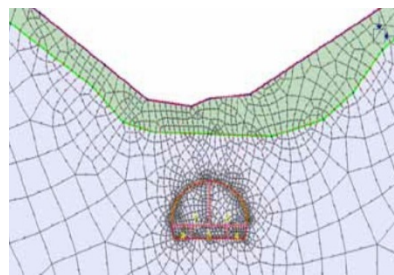


Fig. (11)

En el proceso de análisis y diseño es importante considerar innumerables aspectos, resaltando entre ellos: geometría y longitud de túnel, perfil geológico, contactos y fallas, propiedades de los suelos o de las rocas, buzamientos, estratificaciones y fracturación, nivel freático y flujos subterráneos y localización de la obra.

Para establecer las etapas de excavación de cada túnel, fue necesario evaluar la estabilidad del mecanismo de falla del frente de la excavación, estableciendo la relación entre las

fuerzas actuantes y resistentes que se desarrollan en dicho frente. El factor de seguridad se expresa como la relación entre la suma de momentos de las fuerzas resistentes y la de momentos de las fuerzas actuantes, tomados respecto de un eje horizontal que pasa por un punto en la clave del frente de excavación y es perpendicular al eje del túnel. Los túneles de esta autopista se diseñaron con un factor de seguridad mayor o igual a dos. Las variables que intervienen en el análisis de estabilidad son la altura de la clave, las dimensiones de la sección, la longitud de avance sin apoyo temporal, el peso volumétrico y los parámetros de resistencia. El análisis estructural y geotécnico de un túnel se enfoca a la solución del problema de interacción suelo-soporte y a la definición del estado de esfuerzos inducido por la excavación.

En los análisis, para el concreto lanzado con un espesor de 0.05 m se consideraron dos módulos, uno de Poisson de 0.15 y uno de elasticidad de 221,000 kg/ cm². Para la roca, los parámetros se determinaron a partir de los resultados de las pruebas de laboratorio y se evaluaron de acuerdo con los sistemas de fracturamiento. En cuanto al módulo de elasticidad de la roca, éste depende del tipo de roca y de su sistema de fracturamiento. Para determinarlo, fue necesario realizar ensayos de corte directo en escalas que permitieron tomar en cuenta la rugosidad, relleno y características del sistema de fracturamiento, o bien recurrir a correlaciones empíricas. Para el proyecto estructural de los túneles se usaron programas como Phase2 y Plaxis, que fueron calibrados mediante la fórmula de Einstein y Schwartz.

Para estimar el peso de la cuña de roca que se pudiera deslizar hacia el interior del túnel y que debió ser soportada por el revestimiento, se aplicaron las fórmulas de Terzaghi y de Protodyakonov.



(Fig. 12) La modelización numérica permite determinar el tipo de revestimiento primario por utilizar en los túneles según la calidad de la roca.

La primera considera, como parámetros para el cálculo de la carga de roca en la clave, el ancho del túnel, el peso volumétrico de la roca, la cohesión en el sistema de fracturas inmediato superior a la clave del túnel, la relación de esfuerzos horizontales a verticales, la profundidad del túnel y el ángulo de fricción en la parte inmediata superior de la clave del túnel. La segunda está en función del peso volumétrico de la roca y del ancho del túnel. El soporte temporal estará destinado a resistir las cuñas inestables que el sistema de fracturamiento desarrolla. Para establecer el soporte necesario en los diferentes túneles de la autopista, se tomaron en cuenta las experiencias publicadas y confiables en otros túneles. Al igual que el análisis de la excavación de los túneles, el cálculo estructural del revestimiento definitivo consistió en obtener la solución de un problema de interacción suelo-soporte y el estado de esfuerzos inducido por la excavación.

El revestimiento está sujeto principalmente a esfuerzos de flexo-compresión, por lo cual se propusieron secciones formadas de concreto con una resistencia $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, con espesores entre 0.35 y 0.60 m, armado en dos lechos de varillas de diferentes calibres. Se analizó la resistencia de una sección de 1.0 m de ancho y se calculó el diagrama de interacción a flexo-compresión, determinando la máxima resistencia de la sección a compresión pura, el momento y la fuerza normal en la sección balanceada, el momento máximo que puede soportar la sección, así como otras combinaciones.

DEFINICIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS DE TÚNELES

Los resultados de los estudios permitieron determinar, en la mayoría de los túneles de la carretera, la excavación en macizos rocosos duros y rígidos con distintos grados de fracturamiento. Para ello se representa los siguientes puntos establecidos en el proceso constructivo de los túneles carreteros de la Autopista Durango-Mazatlán.

a). Trazo: Los túneles dependen de las especificaciones particulares de necesidades impuestas por el trazo de la autopista, para esto se integró una carpeta para cada uno de los túneles, que contiene los registros del trazo y sus referencias, el cálculo de coordenadas y la nivelación de perfiles.

De acuerdo con el alineamiento vertical proyectado, el “túnel Sinaloense” tiene una entrada en tangente vertical + 6% seguida de una curva vertical de 260 m; continúa con una tangente de 1,800 m y pendiente de + 2.6% , para finalmente salir en una curva vertical de 620 m de longitud con pendiente de salida de -5.98 por ciento.

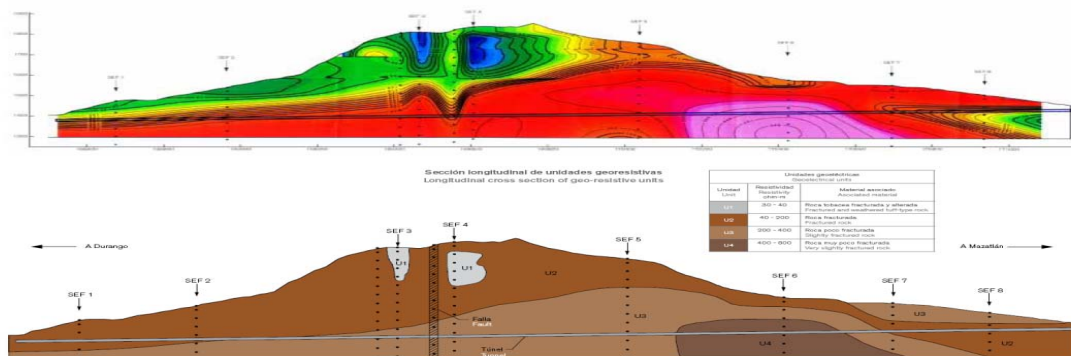
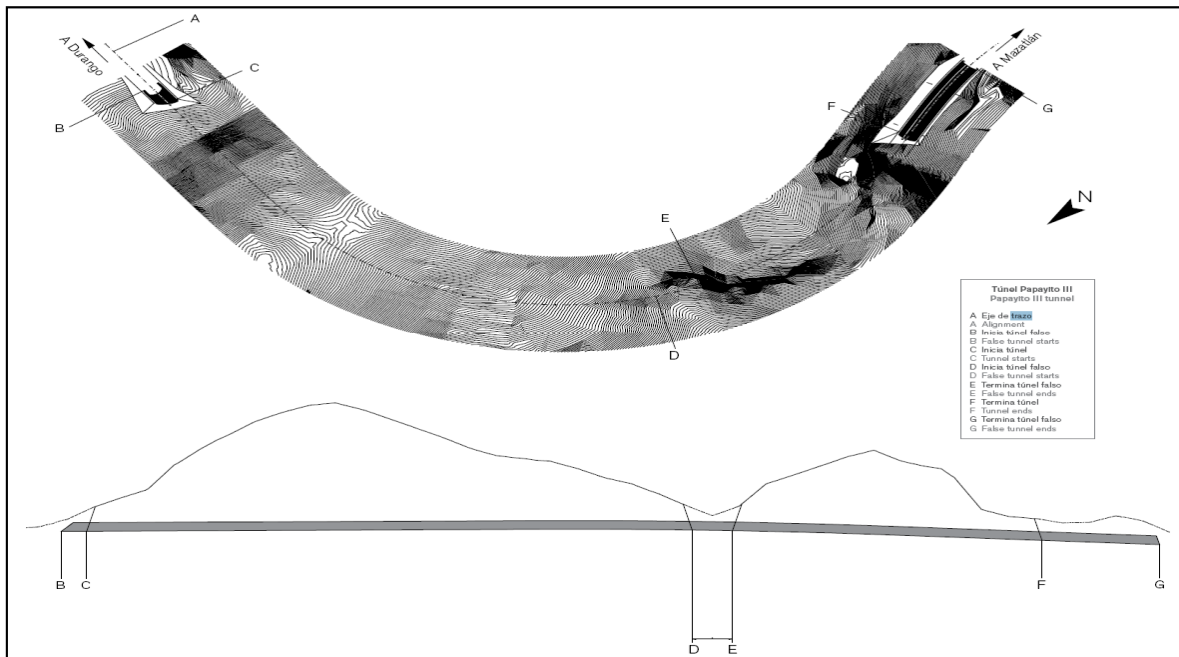


Fig. (13) Trazo del Túnel sinaloense



(Fig. 13) Trazo del eje túnel Papayito III

b). Barrenación: El primer paso realizado en la excavación de los portales es el desmonte, ubicado dentro de los límites del derecho de vía del proyecto. Posteriormente, se hizo el trazo en el que se ubica la línea que delimita el talud, ceros de corte, y se marcó la plantilla de barrenación de acuerdo con la planeación de barrenación. Para la excavación en gran parte de las secciones ha sido necesario elaborar una plantilla de barrenación como se muestra en las figuras (Fig. 14 - 17) en el frente de la excavación. Los barrenos se hicieron con un diámetro de 3" y de acuerdo con un patrón de 3×3 m en tresbolillo.

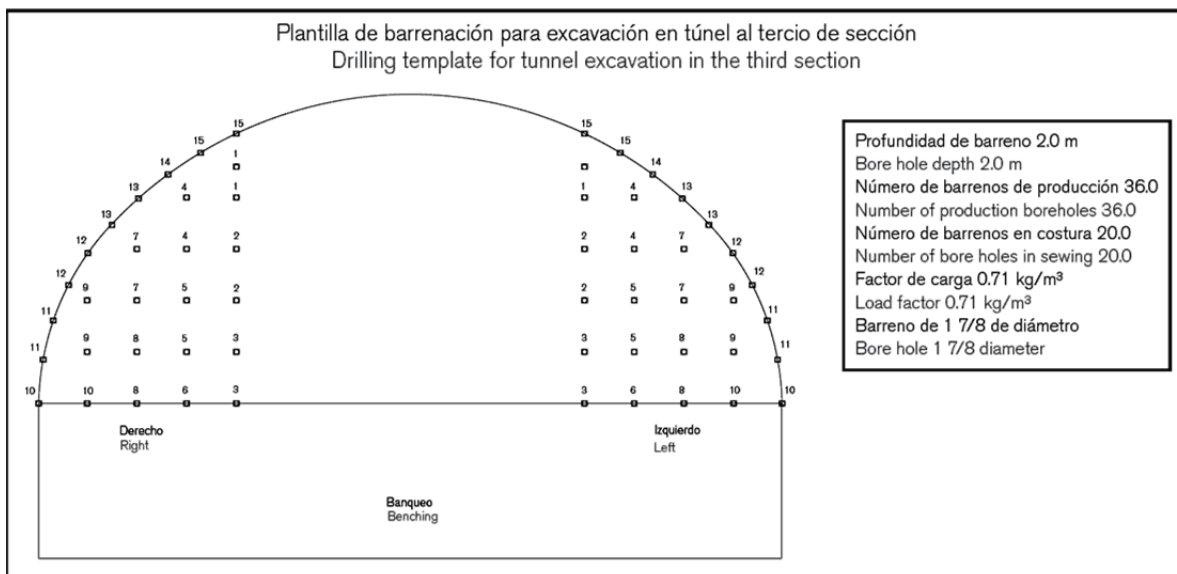


Fig. (14) Planilla de Barrenación

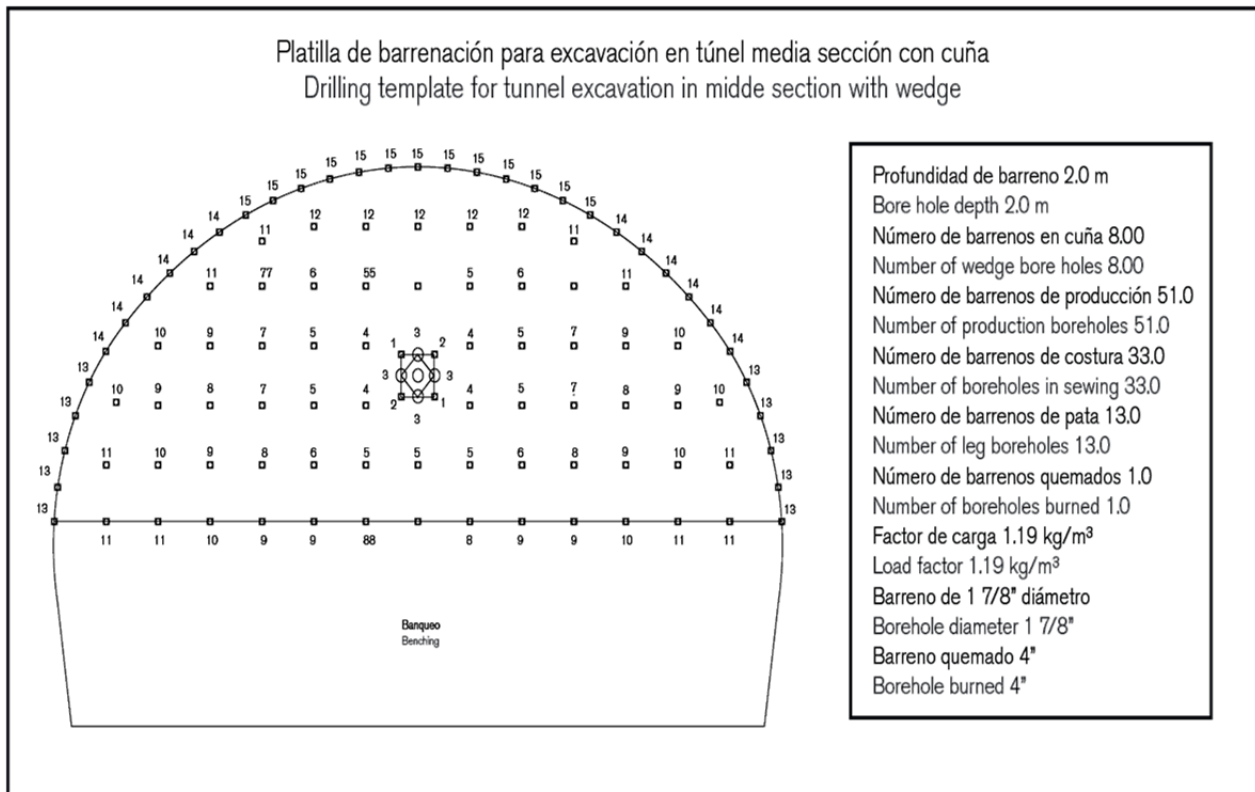


Fig. (15) Planilla de Barrenación

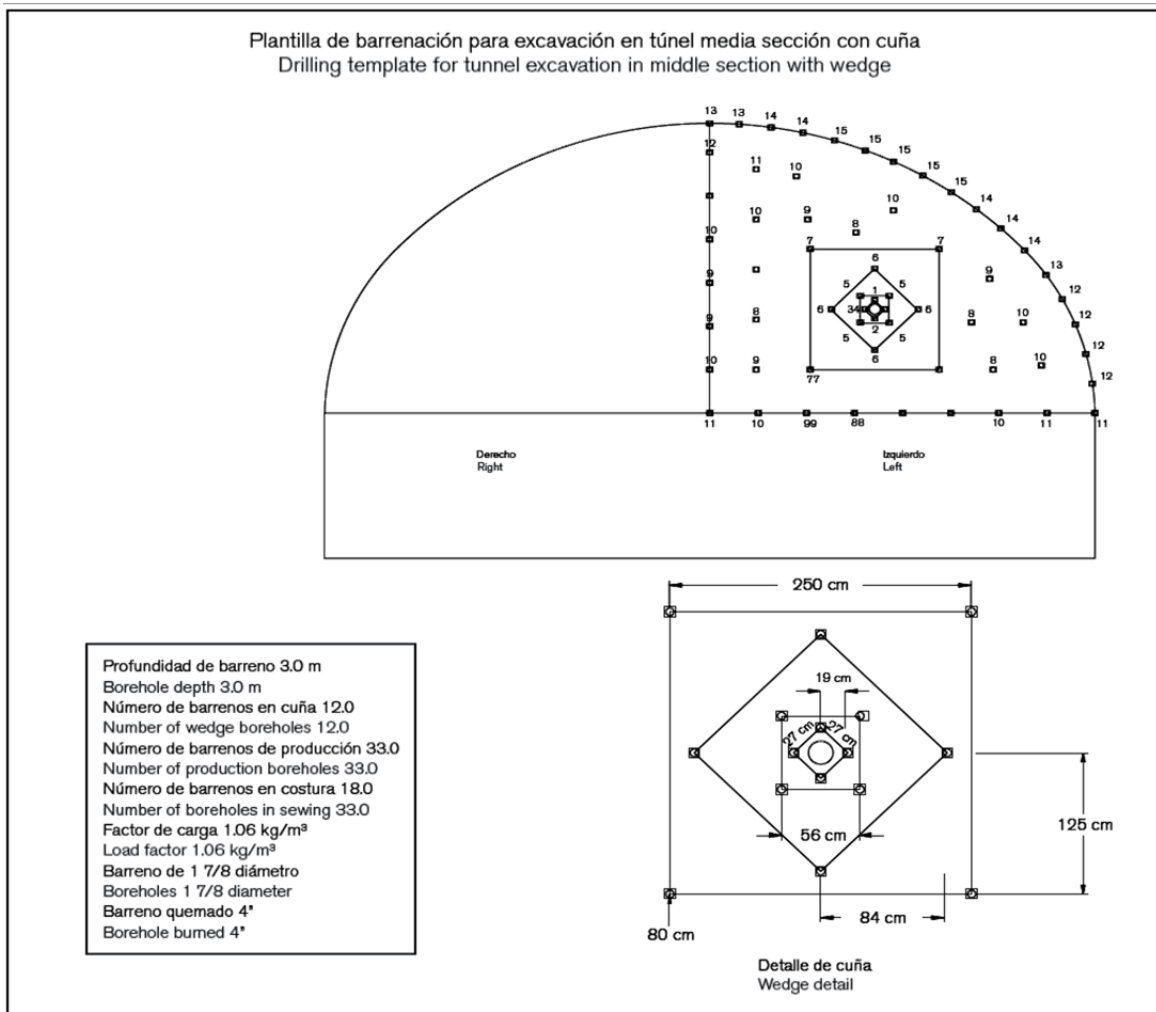


Fig. (16) Planilla de Barrenación

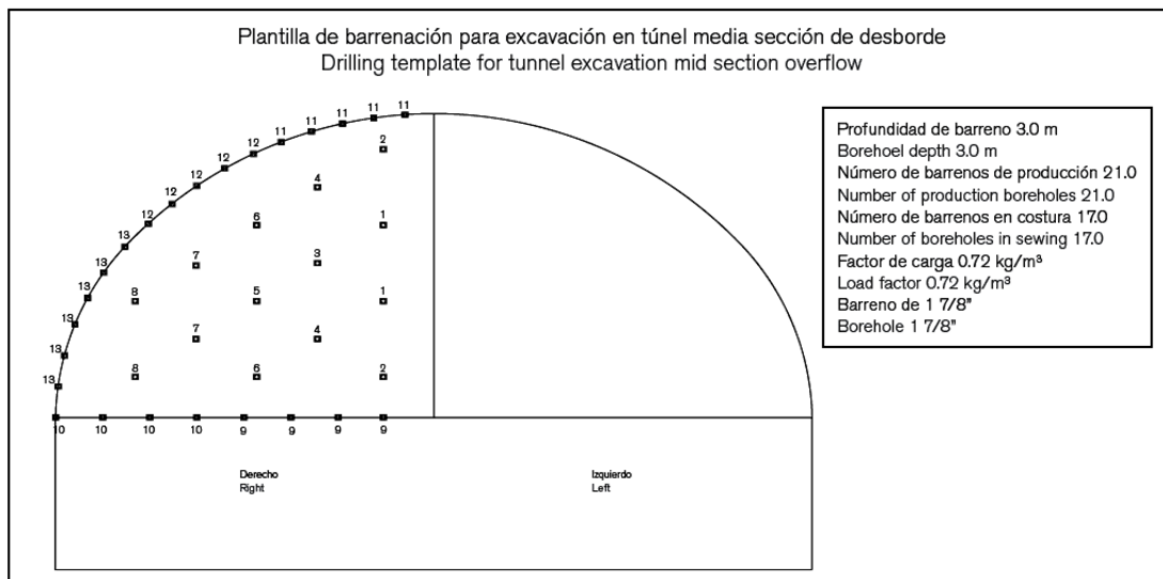


Fig. (17) Planilla de Barrenación

c). Carga de explosivo y voladura: Durante el desarrollo de la obra, se asignó una persona que sea responsable de los reportes, manejo y cuidado de los explosivos. Dependiendo de la magnitud del proyecto pueden existir dos o más personas con el mismo fin.

El supervisor de explosivos debe poseer los suficientes conocimientos (Fig. 18) y experiencia, así como ser responsable de la actividad encomendada. Contando en todo momento con el equipo de comunicación para interactuar con los diferentes frentes en la obra, a fin de llevar a cabo la buena coordinación y operación del desplazamiento del personal y equipo durante y después de cada evento, que se necesiten explosivos. Por esta razón el supervisor y responsable de los explosivos ya que es fundamental en cada evento para la designación o autorización de los trabajos.



(Fig. 18) Colocación de explosivos

Para la excavación en gran parte de las secciones ha sido necesario elaborar una plantilla de barrenación en el frente de la excavación. Los barrenos se hicieron con un diámetro de 3" y de acuerdo con un patrón de 3 × 3 m en tresbolillo. (Fig. 14-17) En la excavación del túnel se utiliza explosivo Riomex E20/40. El inicio de la explosión en cada barreno se hizo en el cartucho instalado en el fondo del barreno y que contiene un detonador. La activación de los explosivos se realizó mediante detonadores de iniciación no eléctrica, tipo Nonel.

d). Rezaga: Inmediatamente después de la voladura se ventilo el frente, con el propósito de continuar con el proceso. Posteriormente, se efectuó una inspección dentro del túnel, parte fundamental para proceder al amacice del frente y continuar con el ciclo correspondiente [rezaga, soporte primario que necesite el frente (marcos, ademe, concreto lanzado, anclas etc.)] No se debe de avanzar sin que dicho soporte haya sido instalado esto para evitar riesgos.



(Fig. 19) Cargador frontal realizando la rezaga de material en el interior de la galería de escape.

e). Obras de Acceso: Las primeras obras de la construcción de un túnel son los accesos. Para el comienzo de la excavación de los túneles por necesidades de plazo de la obra, no siempre existen accesos por el trazo de la autopista, ya que en general, fue necesario comenzar la ejecución de los túneles antes de tener acabados los terraplenes o cortes de terracerías. Por ello, fue necesario construir caminos de acceso al portal de entrada de cada túnel.



(Fig. 20) Camino de acceso

La posición de los portales de cada uno de los túneles se planteó y analizó considerando diversas alternativas, se modificaron los cadenamientos de entrada, de salida y las pendientes de los taludes en los cortes, adecuando a esos cambios la longitud de los túneles por excavar, los emportalamientos y los túneles falsos, así como la altura de los cortes. Entre las posibles soluciones analizadas, se eligieron aquellas que arrojarán las condiciones constructivas y de estabilidad más favorables para la obra. Para la solución definitiva, se tomó en cuenta la geometría, volumetría y estabilidad de las excavaciones a cielo abierto, así como los tratamientos requeridos en ellos.

g). Emportalamientos: fue la actividad inicial en la construcción de un túnel y consistió en hacer un corte en tajo del terreno natural, a fin de construir el portal, es decir, una cavidad homogénea donde se inició la perforación del túnel.

Para su construcción en los diferentes túneles de la autopista, se tomó en cuenta diversos factores que intervienen en la estabilidad de los taludes, como la geometría de la excavación, los elementos para reforzar el talud y en caso necesario garantizar su estabilidad y procedimiento constructivo

La excavación de los portales presenta una condición diferente a la de un corte en terracerías, ya que la entrada del túnel boquilla debilita el talud frontal, por ser la parte inferior, la cual representa un punto crítico con el que se pierde la ventaja tridimensional de un frente de túnel. Las voladuras que se realizan en los primeros metros del túnel, “dentro de la zona del talud”, pueden ser fuentes de inestabilidad.



(Fig. 21) Emportalamiento

Se ha reconocido, que durante y después de la excavación de los portales, se debe garantizar la estabilidad de los taludes. Por lo anterior, prácticamente en todos los taludes frontales de los portales se realizó un tratamiento que, dependió de la calidad geotécnica del macizo, estuvo formado por alguno o varios de los siguientes componentes: anclajes (de fricción y tensión), concreto lanzado, visera de protección y drenaje.

Anclas

Los anclajes comúnmente utilizados son de fricción, en donde el anclaje se realiza por adherencia con lechada de cemento, al aplicar en la cabeza una ligera tensión para que la placa la transmita a la superficie del talud y prevenir así la descompresión superficial.



(Fig. 22) Drenes y anclas de fricción

La longitud nunca es inferior a un décimo de la altura del talud, medida sobre la rasante. La mayoría de los túneles contaron con un talud frontal y dos laterales, aunque pocos tuvieron únicamente un talud frontal, como el portal Durango del túnel Guamúchil y otros con un talud frontal y uno lateral, como los túneles Baluarte y Carrizo II.

Respecto a las alturas de éstos, variaron desde los 25 m (túnel Lambedero) hasta los 108 m de altura, como fue el caso del túnel Santa Lucía en el portal Mazatlán. Otros túneles con taludes grandes fueron el Cerro La Reforma con 104 m de altura en el portal Durango y por otra parte, Leonera II con 65 m de altura en el portal Mazatlán.

f). Excavación: Históricamente, la selección del método utilizado para perforar un túnel fue impuesta por el tipo de formación de roca y sección de la obra.

Para el caso de los túneles de esta autopista, se optó por utilizar el método convencional mediante métodos mecánicos y voladura, ya que fue el adecuado para las características de los terrenos afectados. El método consiste en aceptar las deformaciones que ocurren hacia el interior del túnel no se deben impedir por medios directos como lo son elementos de soporte, sino que se deben permitir en forma controlada, propiciando el autosoporte de la excavación mediante el uso de elementos básicos (concreto lanzado, marcos metálicos y anclas).

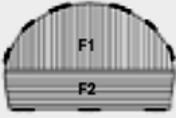
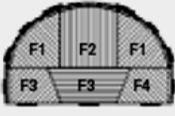
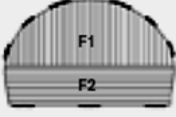
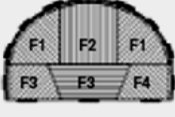
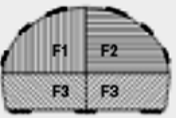
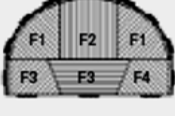
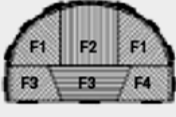


(Fig. 23) excavación de la sección inferior o banqueo

Esto permite la disipación de gran parte de la energía potencial del macizo que se libera tras la apertura de la perforación. La excavación de los túneles de la autopista Durango-Mazatlán se realizó frecuentemente por barrenación y voladura, recurriendo a técnicas de precorte y/o postcorte. En algunos casos, como el túnel Santa Lucía fue necesaria la utilización de métodos mecánicos para la excavación debido a que se encontró material muy suave y con baja resistencia.

Para la excavación de túneles se propusieron diversos procedimientos constructivos, dependiendo de la condición geotécnica del macizo rocoso (A, B, C+, C-, D+, D- y E) (Tabla 3). Los procedimientos constructivos consisten en dividir la sección en dos o más etapas de excavación, para mayor seguridad y productividad. En gran número de túneles se ha empleo más de un método, ya que las condiciones del macizo variaron longitudinalmente.

(Tabla 3)

Fases de excavación y sostenimiento del túnel según condiciones geotécnicas Excavation stages and tunnel support according to geotechnical conditions			
Condición geotécnica Geotechnical condition	Fase de excavación Excavation stage		
A		D(+)	
B		D(-)	
C(+)		E	
C(-)			

Debido a la mala o pésima calidad geotécnica de los materiales del terreno, algunos de los túneles requirieron de un procedimiento constructivo especial. De acuerdo con las tendencias actuales de construcción de túneles carreteros en Europa, una opción atractiva es la aplicación de un sistema de protección o presostenimiento, mediante enfilaje frontal o paraguas de micropilotes, que es un sistema de presostenimiento primario provisional ideado para la fase de excavación del túnel.

Enfilaje

Se trata de un conjunto de elementos estructurales lineales subhorizontales perforados en el terreno e inyectados con un mortero, y que a su vez se encuentran apoyados sobre los marcos de soporte. Éstos constituyen una prebóveda formada por material resistente, cuya misión es proporcionar el autosostenimiento primario al terreno situado en la parte superior del túnel, siguiendo la geometría de éste; asimismo, se utiliza para soportar las deformaciones del terreno en algunos casos. El enfilaje se suele colocar antes de iniciar la

excavación del talud frontal del emportalamiento, para garantizar la estabilidad de éste durante la excavación de los primeros metros del túnel.

El enfilaje más utilizado en los túneles de la autopista fue el método llamado jaula de ardilla, el cual consiste en barras de acero de 1" de diámetro y 4 m de longitud. Éste se usó en los túneles Las Labores, Carrizo III, Tortuga Nuevo y Frijolar Nuevo. En los túneles Piedra Colorada, El Varal y El Guineo, se empleó un enfilaje con tubos de acero de 4" de diámetro y 12 m de longitud. En otros túneles, debido a las malas condiciones

geotécnicas, se requirió de más

líneas de enfilaje, como es el caso del túnel El Chirimollos con tres enfilajes con barras y tubos de acero de diámetro de 4" y 8 m de longitud o el túnel Trópico de Cáncer en el que se colocaron dos enfilajes largos.

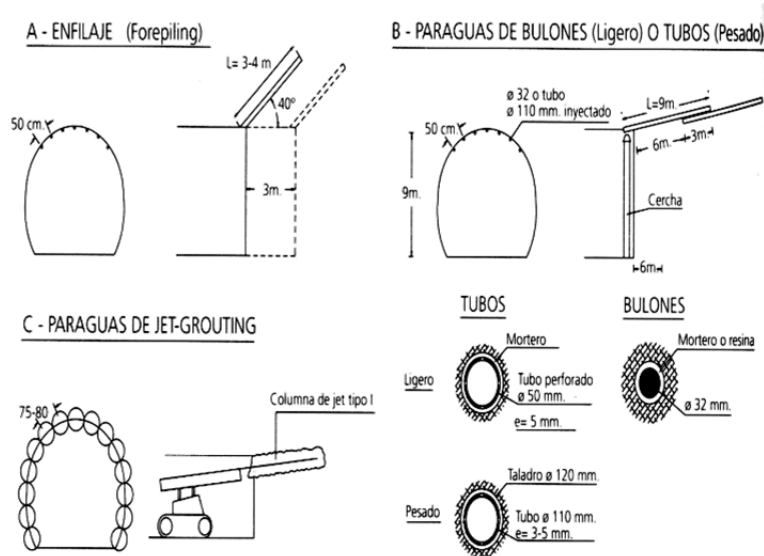
Un caso especial es el túnel Santa Lucía en el que se usó, a lo largo de todo el túnel, enfilajes con tubos de acero de 6" de diámetro y 6 m de longitud espaciados radialmente a cada 75 cm. Posteriormente se colocaron marcos metálicos a cada metro para mantener estable el macizo y conservar la seguridad de la excavación en todo momento

En el túnel Papayito I tuvo que introducirse una modificación en el proyecto, ya que se presentó un caído durante la construcción del frente Durango. Eso obligó a mover 12 m el trazo del túnel hacia la derecha del eje. La oquedad producida por el caído se rellenó con concreto y para dar continuidad a la excavación tuvieron que emplearse enfilajes medianos, una vez terminado de excavar el túnel, se colocó en la oquedad un emparillado de varillas y se hizo una perforación desde la superficie hasta el nivel del caído. Por último, se colocó el revestimiento final inyectando 30 m³ de mortero para rellenar dicha oquedad y evitar cualquier caído que pudiera dañar el revestimiento de concreto.

g). Concreto Lanzado: El concreto lanzado reforzado con fibras de acero (CRFA) (Fig. 25) es un mortero o concreto que contiene fibras de acero discontinuo, las cuales son proyectadas neumáticamente a una superficie.



(Fig. 25) Concreto reforzado con fibras de aceros



(Fig. 24) Métodos de Enfilaje

El concreto lanzado reforzado con fibras sintéticas (CRFSn) (Fig. 26) es un concreto rociado que contiene fibras de plástico discontinuas que son proyectadas neumáticamente a altas velocidades a una superficie.

El objetivo de un concreto lanzado es el de estabilizar las deformaciones requeridas derivadas del movimiento inherente a las fuerzas del terreno. Esto nos proporciona un refuerzo homogéneo de espesor uniforme.



(Fig. 26) Concreto reforzado con fibras de sintéticas

Las fibras de acero son incorporadas en el concreto para mejorar la ductilidad, la absorción de energía, la resistencia al agrietamiento y la resistencia al impacto.

La duración del tiempo de fraguado es considerablemente menor que al utilizar una mala electrosoldada. En cuanto a las fibras de acero solo necesitan un recubrimiento de concreto de 1 a 2 mm en comparación con varilla de refuerzo normal y la malla.

Después de la excavación se colocó una capa de concreto lanzado de 10 cm de espesor reforzado con fibras de acero. La dosificación de concreto fue de 40 kilogramos por metro cúbico.

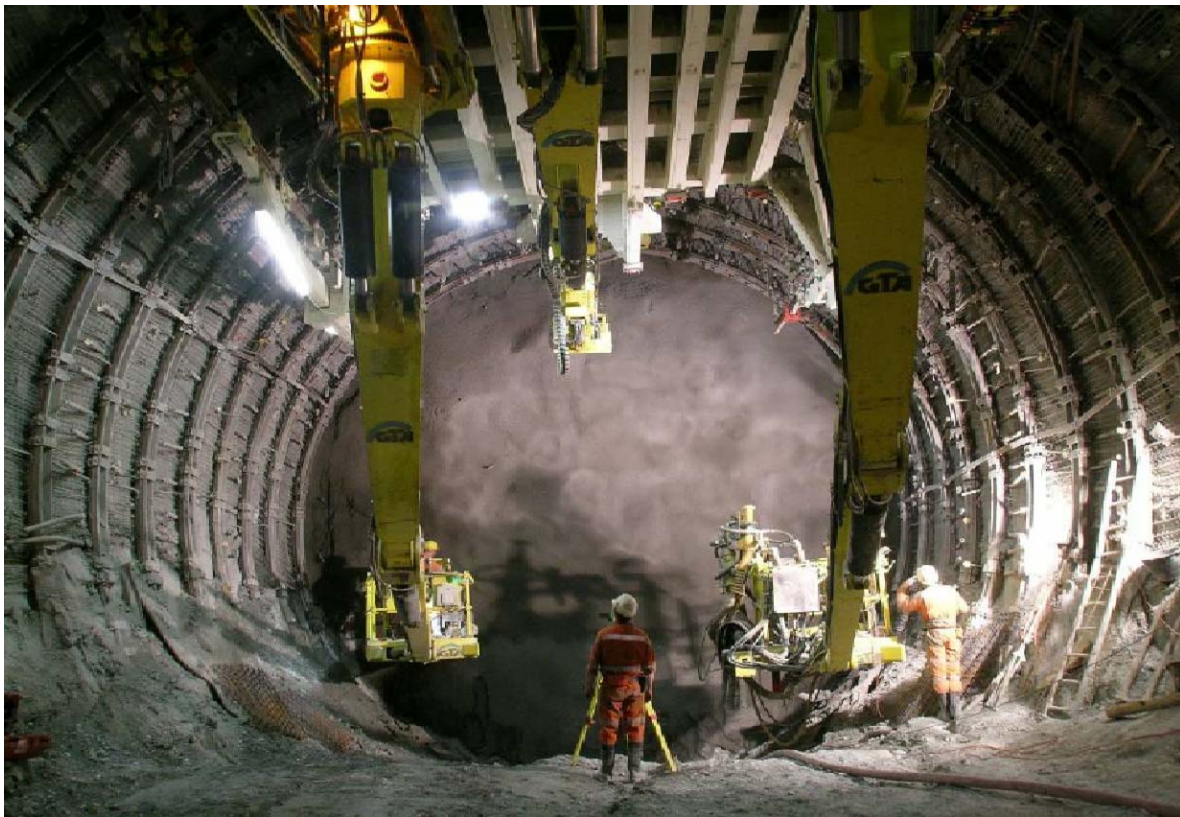


Fig. 27) Lanzado de concreto

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

La colocación del revestimiento definitivo, tuvo diversas funciones, entre las cuales se encuentra la parte estructural construida, a corto plazo, apoyado por el sostenimiento. Lo anterior aportó un factor de seguridad adicional en cuanto a la estabilidad de la excavación. A largo plazo, el revestimiento es capaz de absorber las deficiencias estructurales del sostenimiento, que es un elemento en contacto directo con el terreno y por tanto, debido a los altos contenidos de humedad puede presentar una degradación por corrosión. Otra función consistió en evitar labores de mantenimiento que serían crecientes con la edad del túnel, asociados a los costos altos de ejecución y que además interferirían con la explotación de la carretera al entorpecer el tránsito de vehículos. Asimismo, la superficie interior lisa del anillo de concreto del revestimiento ayudaría en gran medida la circulación del aire a lo largo del túnel; por tanto, colaboró con los sistemas de ventilación aumentando de ese modo la seguridad funcional del túnel.

Impermeabilización

Para el caso de los túneles de la autopista Durango-Mazatlán, se diseñó el revestimiento como una protección de concreto reforzado de 35 cm de espesor y con varillas de diferentes calibres.

El proyecto de impermeabilización constó de 4 fases dentro de la etapa de análisis:

La fase Preliminar, trabajos provisionales de taponamiento o recogida y conducción de aguas, para permitir la ejecución de la intermedia y principal.

La fase intermedia, aplicación de concreto lanzado por mortero para sostenimiento provisional y regularización del soporte.

La fase principal o definitiva, compuesta de la instalación de un geotextil y una lámina sintética (geomenbrana) impermeable de PVC-P VLDPE.

Y la fase posterior, trabajos complementarios a la impermeabilización principal.

La fase en la construcción de impermeabilización de los túneles de esta autopista que se considero fue la principal o definitiva que consistió en colocar una capa impermeable que protegiera a los túneles del agua. Para ello, primero se instaló un geotextil no tejido punzonado de fibra corta de poliéster, el cual tiene una densidad de 500 g/m². Dicho geotextil sólo tiene la función de captar el



(Fig. 28) Geotextiles impermeable

agua proveniente del macizo y dirigirla al drenaje del túnel. Posteriormente, se coloca una geomembrana impermeable, que es una lámina de pvc flexible sin armadura, de 1.5 mm de espesor, que se fija con arandelas del mismo material y clavos de acero o taquetes de expansión. Esta geomembrana impermeable evita que el agua se infiltre en el túnel y dañe el concreto del revestimiento. Cada tira de la membrana se une a otras, vulcanizándola con una pistola de aire caliente que se calibró con anterioridad y las juntas de los paños son colocadas en sentido transversal. Previamente al inicio del proceso de soldadura, se hacen ajustes de los parámetros de velocidad y temperatura en función de las condiciones ambientales y del estado superficial de la membrana.

La geomembrana por su versatilidad y ligereza funcionó para hacer frente a condiciones adversas, como filtraciones de agua, bajas temperaturas y se adapta a las irregularidades del terreno o a cualquier obra independiente del sistema de excavación y revestimiento empleado.

Fases de revestimiento

La construcción del revestimiento de concreto constó de tres fases. En la primera, se construyeron las zapatas laterales con concreto reforzado de 250 kg/cm², las cuales se diseñaron con alturas variables para dar las pendientes requeridas por la superficie de rodamiento en zonas de curvas. En la segunda, se realizó el armado del acero de refuerzo donde se colocó la cimbra metálica conformada por moldes individuales de 3m de longitud, que se adaptaron a las dimensiones de las zapatas a lo largo del trazo de los distintos túneles.

En la tercera fase se colocó el armado de acero para el revestimiento superior del túnel. El



colado de esta sección

se realizó con una
deslizable y

(Fig. 29) Revestimiento definitivo

cimbra metálica especial
colapsable, la cual se ajustó a

las variaciones del peralte en curva de los túneles, permaneciendo sin cambios la forma del intradós en toda la longitud de los túneles.

Revestimiento definitivo

Desde su diseño, se consideró para la cimbra la fabricación y el suministro de equipos especializados para el revestimiento definitivo mediante el uso de concreto hidráulico; por lo tanto, no se trató de un equipo de línea o estándar. Cada cimbra constó de tres elementos: guarnición, transportadores electrohidráulicos y moldes de colado del túnel.

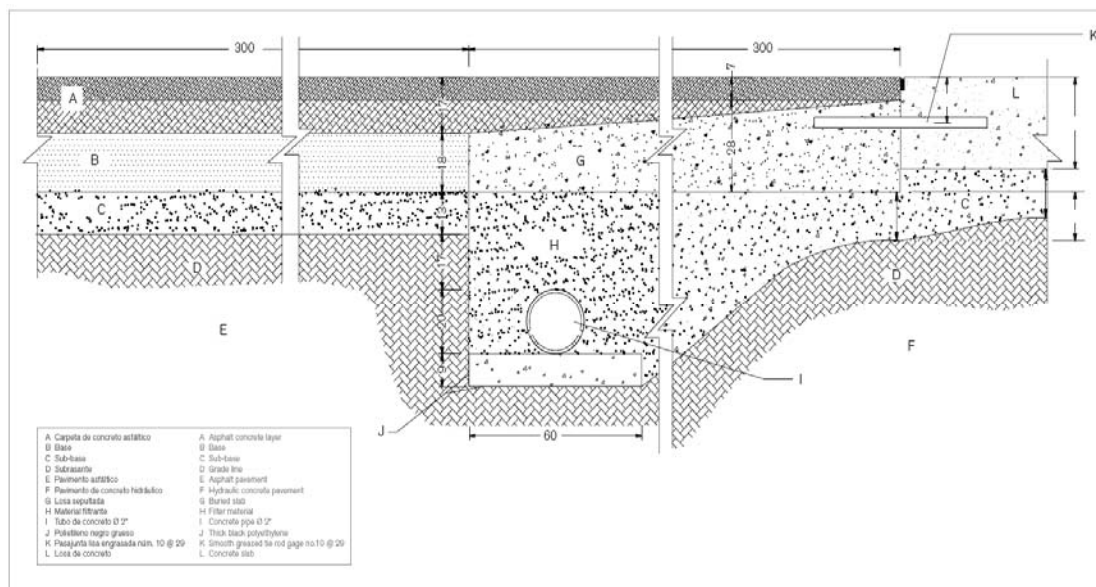
Para la obra se utilizó un total de doce cimbras durante la construcción de los 61 túneles, tres cimbras con dimensiones para cuatro carriles utilizadas en ocho túneles y nueve cimbras con dimensiones de dos carriles para el resto de los túneles

OBRAS COMPLEMENTARIAS EN TÚNELES.

Pavimentos

Para el diseño de *pavimentos* en los distintos túneles se aprovechó la capacidad de carga de la roca y su uniformidad desde el punto de vista del valor relativo de soporte, es decir, su capacidad para soportar cargas de tránsito.

Todo el desarrollo de la vialidad corresponde a los pavimentos desplantados prácticamente en la misma roca. El pavimento en cada uno de los túneles está constituido por una capa de subbase de 22 cm de espesor y una de concreto hidráulico de 300 kg/cm² con 28 cm de espesor. La construcción del pavimento de concreto hidráulico permitirá un comportamiento eficiente de acuerdo con las cargas de tránsito de diseño. Su mantenimiento será mínimo y, por lo tanto, la relación costo-beneficio será mejor que para otro tipo de pavimento. (Fig. 30)



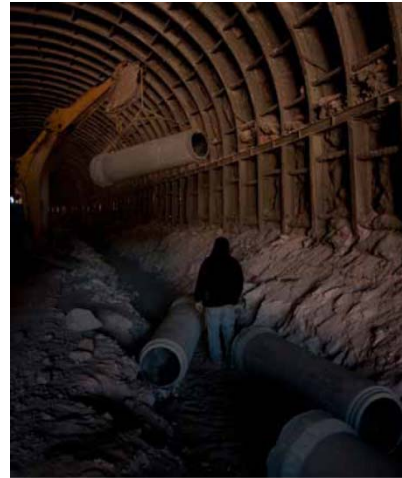
(Fig. 30) Esquema de un corte longitudinal que detalla la transición entre el cuerpo del terraplén y el pavimento de los túneles.

Los criterios empleados en el diseño de los pavimentos se basaron en el método AASHTO para pavimentos rígidos. Se determinó el número de repeticiones de carga de un vehículo estándar de un peso nominal de 8.2 t, denominado carga axial equivalente única (ESAL, por sus siglas en inglés).

El Drenaje y Subdrenaje

El drenaje y subdrenaje en una obra vial, el agua juega un papel importante durante su fase de construcción, pero además, puede originar perjuicios a su estructura. Por lo tanto, se debe contar con un buen drenaje en la construcción de una carretera, pero más aún dentro de un túnel, donde deben preverse los elementos de drenaje necesarios.

Si el agua circula en cantidades excesivas por la vialidad, puede destruirla por erosión o reblandecimiento, lo que ocasiona deformaciones que inducen un mal comportamiento del tránsito que circula por la superficie de rodamiento y puede ser causa de accidentes. Es, por tanto, necesario disponer de un sistema de drenaje que conduzca las aguas hasta el exterior del túnel.



(Fig. 31) drenaje al interior del túnel el sinaloense)

El agua tiene procedencias diversas como la que circula por las cunetas en el exterior del túnel, las filtraciones del terreno entre otras. Lo anterior pone de manifiesto la importancia de tener un buen drenaje en la construcción de los túneles, donde deben preverse los elementos necesarios para que, en su etapa operativa, no haya problemas inducidos por la presencia de agua.

Debido a que se transportarán mercancías peligrosas en el proyecto carretero, se ha determinado colocar alcantarillas de ranuras bien diseñadas, situadas dentro de las secciones transversales de los túneles, para el drenaje de líquidos tóxicos e inflamables. Además, el sistema se diseñó para evitar que el fuego y los líquidos inflamables y tóxicos se propaguen dentro de los tubos de drenaje.

Partes del drenaje

El drenaje exterior en cada túnel está constituido por las contra-cunetas, cunetas y lavaderos de los portales de entrada y salida, así como por una obra captadora, ubicada transversalmente, en la entrada o salida, según la pendiente de los mismos. Este drenaje captará las aguas pluviales que escurran por los taludes y la superficie de rodamiento, dirigiéndola al subdrenaje del túnel o a alguna barranca cercana.

En el interior de los túneles, la protección impermeable (geomembrana) desvía cualquier filtración proveniente del macizo hacia los extremos de las zapatas laterales del revestimiento, en donde dos drenes laterales (uno en cada zapata) de pvc de 4" de diámetro, canalizan el agua hacia el subdrenaje, el cual está conformado por dos tuberías de concreto de 45 cm de diámetro enterradas a un metro de profundidad, respecto de la rasante. En caso de que algún vehículo derrame líquidos en el interior del túnel, se han colocado en las banquetas bocas de tormenta distanciadas a cada 50 m y sobre el eje de las tuberías se han construido pozos de visita espaciados a cada 100 metros.

Ventilación

La ventilación en túneles carreteros es de suma importancia para la seguridad de los usuarios, ya que permite disminuir los niveles de gases tóxicos y limpiar partículas suspendidas que pudieran reducir la visibilidad en su interior. Los sistemas de ventilación se dividen en tres grandes tipos: la ventilación natural, la de efecto de pistón y la mecánica.

El primer tipo de ventilación ocurre como resultado de diferencia de presiones causadas por las condiciones climáticas y la diferencia de temperatura entre los extremos del túnel o diferencias de presión atmosférica del aire entre los extremos, generando un movimiento de la masa de aire que depende de la estación del año.



(Fig32.) ventilación que provee aire fresco al túnel

El segundo, se da cuando un vehículo se mueve a lo largo de un túnel con una velocidad diferente a la del aire en el interior, provocando una diferencia de presiones. Dependiendo de si el túnel tiene tránsito en una o dos direcciones y de su densidad, puede producirse una ventilación cuyo efecto puede ser apreciable.

Por último, la ventilación mecánica está basada, principalmente en el uso de ventiladores de impulso controlado, de los cuales hay dos tipos: la ventilación longitudinal, en el que se colocan ventiladores en dirección del eje del túnel y la ventilación transversal, mediante lumbreras que inyectan aire desde la superficie.



(Fig. 33) ventilación mecánica

El sistema mecánico más utilizado es el de ventilación longitudinal mediante un impulso controlado montado en el techo del túnel.

Cuando los gases expulsados por los motores de los vehículos permanecen dentro del túnel, es necesario determinar los límites superiores para concentraciones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). Asimismo, se encuentran presentes otros gases tóxicos que son riesgosos para la salud, cuando no se asegura una dilución suficiente de CO y NO₂

Es necesario conocer las temperaturas medias del aire dentro del túnel para obtener los volúmenes de aire fresco necesarios para diluir el CO, así como asegurar la reducción de humo y polvo que permita mantener buenas condiciones de visibilidad dentro del túnel.

Para ganar eficiencia en el control de las corrientes de aire se requirió de un equipo para regular su volumen y dirección. El volumen de aire usualmente es controlado variando el número de ventiladores en operación. Los controles automáticos de los ventiladores son generalmente equipados de instrumentos que miden las concentraciones de CO presentes en el túnel.

En la mayoría de los túneles de la autopista Durango-Mazatlán se adoptaron sistemas de ventilación natural, ya que sus longitudes son relativamente cortas. Para los túneles más largos como El Sinaloense, Carrizo III, Carrizo II, El Varal, Baluarte, Piedra Colorada, Tortuga Nuevo, Picachos I y Papayito III, se consideró necesaria la colocación de sistemas mecánicos longitudinales mediante la instalación de ventiladores reversibles.

Los frentes de ataque de todos los túneles contaron con sistemas de ventilación que se colocaron cuando el avance correspondía a una longitud de 60 m medidos desde la boca del túnel. El aire que se suministra es fresco y limpio, lo cual se logra prolongando la toma de la tubería de ventilación 15 m fuera de la boca del túnel, a una altura aproximada de 5 m del nivel de la subrasante o nivel de la excavación de la primera fase. La boca de las tuberías de ventilación queda a una distancia de 20 m del frente de ataque, manteniendo condiciones aceptables para los trabajadores que laboran en el interior de los túneles.

Iluminación

El objetivo del alumbrado en el túnel fue garantizar que los conductores de los vehículos puedan atravesar el túnel durante el día y la noche a una velocidad de 90 km/hr, con una máxima seguridad y confort.

Las características fotométricas del túnel son totalmente diferentes en el día a las características que se tienen en la noche.

Existen efectos visuales en túneles como, el de *agujero negro* ó *efecto de inducción*, (Fig. 34) que consiste en que durante el día los ojos del conductor, específicamente la pupila junto con la retina, están adaptadas a una luminancia elevada que puede alcanzar hasta los 100,000 luxes, al acercarse al túnel se observa que la boca de entrada tiene una luminancia bastante menor, y da la apariencia de un agujero negro en el que no se ve ningún detalle, aunque el sistema visual del ojo se puede adaptar rápidamente a la reducción de los niveles de iluminación, tal como ocurre cuando se pasa de la luz del día a la oscuridad de un túnel, estos ajustes no son instantáneos.



Fig.(34)efecto del agujero negro

Este cambio extremo entre niveles altos y bajos de iluminación produce una ceguera momentánea que obviamente es muy peligrosa.

Otro efecto que se trato de combatir fue el de *adaptación*, es el tiempo que tarda la pupila y la retina en sensibilizarse al cambio en la distribución de luminancias. El proceso de adaptación del ojo requiere de cierto tiempo, dependiendo de la diferencia de luminosidad. A mayor diferencia, mayor tiempo de adaptación.

Para una velocidad determinada, significa que entre mayor sea la diferencia de luminancias, mayor será la distancia dentro del túnel en el que el ojo del conductor se adaptará. Sistema visual del ojo se puede adaptar rápidamente a la reducción de los niveles de iluminación, tal como ocurre cuando se pasa de la luz del día a la oscuridad de un túnel, estos ajustes no son instantáneos. Este cambio extremo entre niveles altos y bajos de iluminación produce una ceguera momentánea que obviamente es muy peligrosa.

La *luminancia de velo*, Fig. (35) es el conjunto de luces parásitas en el conductor, y que son debidas a los reflejos del parabrisas, la luminancia atmosférica (polvo, contaminantes, humedad, etc.), que se combinan para formar un velo luminoso que reduce la visibilidad de los obstáculos a la entrada del túnel.



(Fig.35)Efecto de la luminancia de velo

Por último el efecto Flicker La sensación del flicker que se tiene cuando manejamos a lo largo de un tramo del túnel en donde existen cambios de luminancia, debido a una separación de las luminarias mayor a la especificada. Este causa molestias que afectan al conductor, causándole en casos extremos dolor de cabeza y mareo, por convertirse en una luz estroboscópica. El grado de molestia causado por el efecto flicker depende de: el número de cambios de luminancia por segundo (frecuencia flicker), la duración, la diferencia de intensidad entre la parte iluminada y la oscura en cada período.

Estos tres primeros fenómenos: el de inducción, adaptación y luminancia de velo afectan la visibilidad del conductor para poder percibir los obstáculos que se le presentan al frente, ya sea un objeto, un animal ó un vehículo.

Estos factores dependen de la velocidad del vehículo y de la separación de las luminarias y de las características fotométricas de éstas. La frecuencia flicker se puede calcular dividiendo la velocidad en metros/segundo, entre la separación de las luminarias medidas de centro a centro en metros.

Para contrarrestar estos efectos se colocaron los siguientes sistemas de alumbrado:

Sistema simétrico es un sistema en el que las luminarias tienen una distribución de la intensidad luminosa que es simétrica en relación al plano C 90°/270°, es decir, a un plano perpendicular al eje del túnel. (Fig. 36)

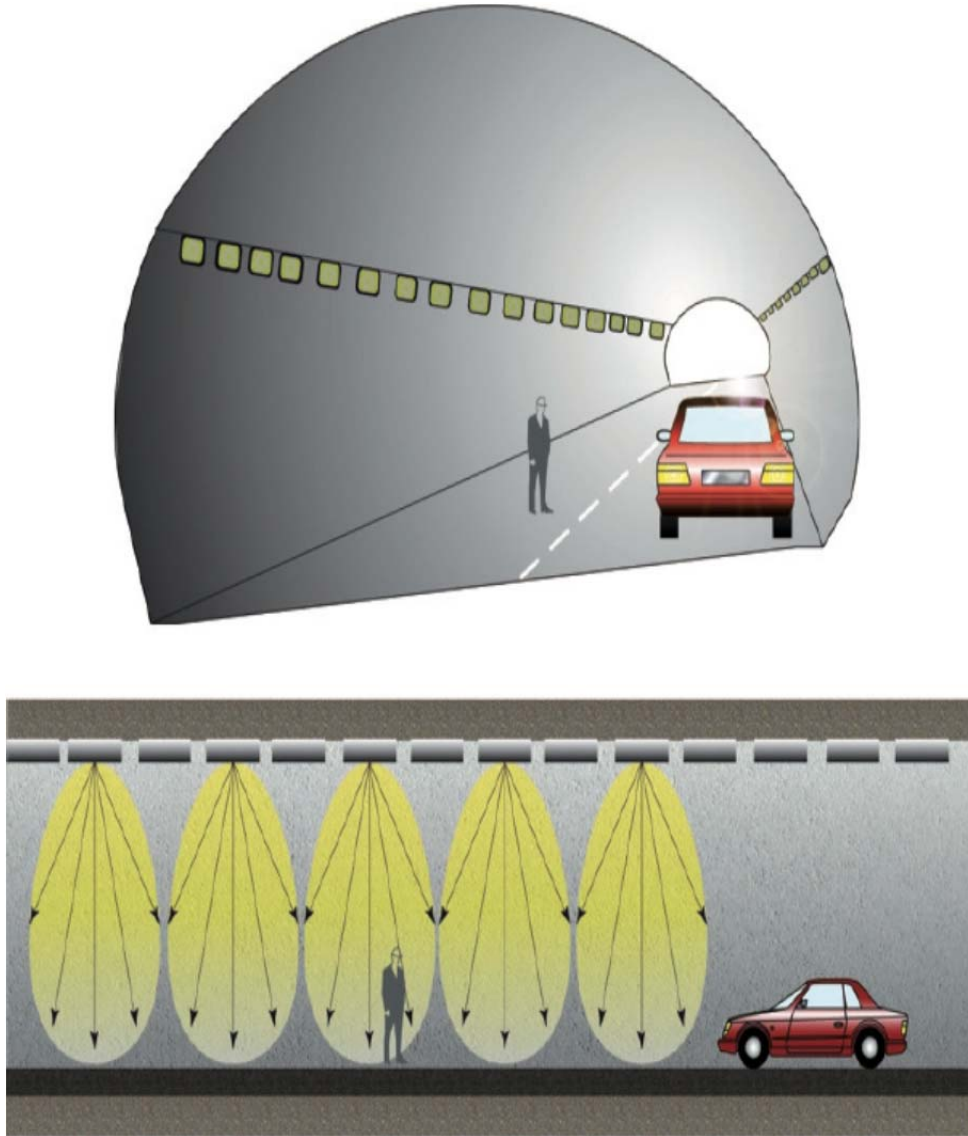
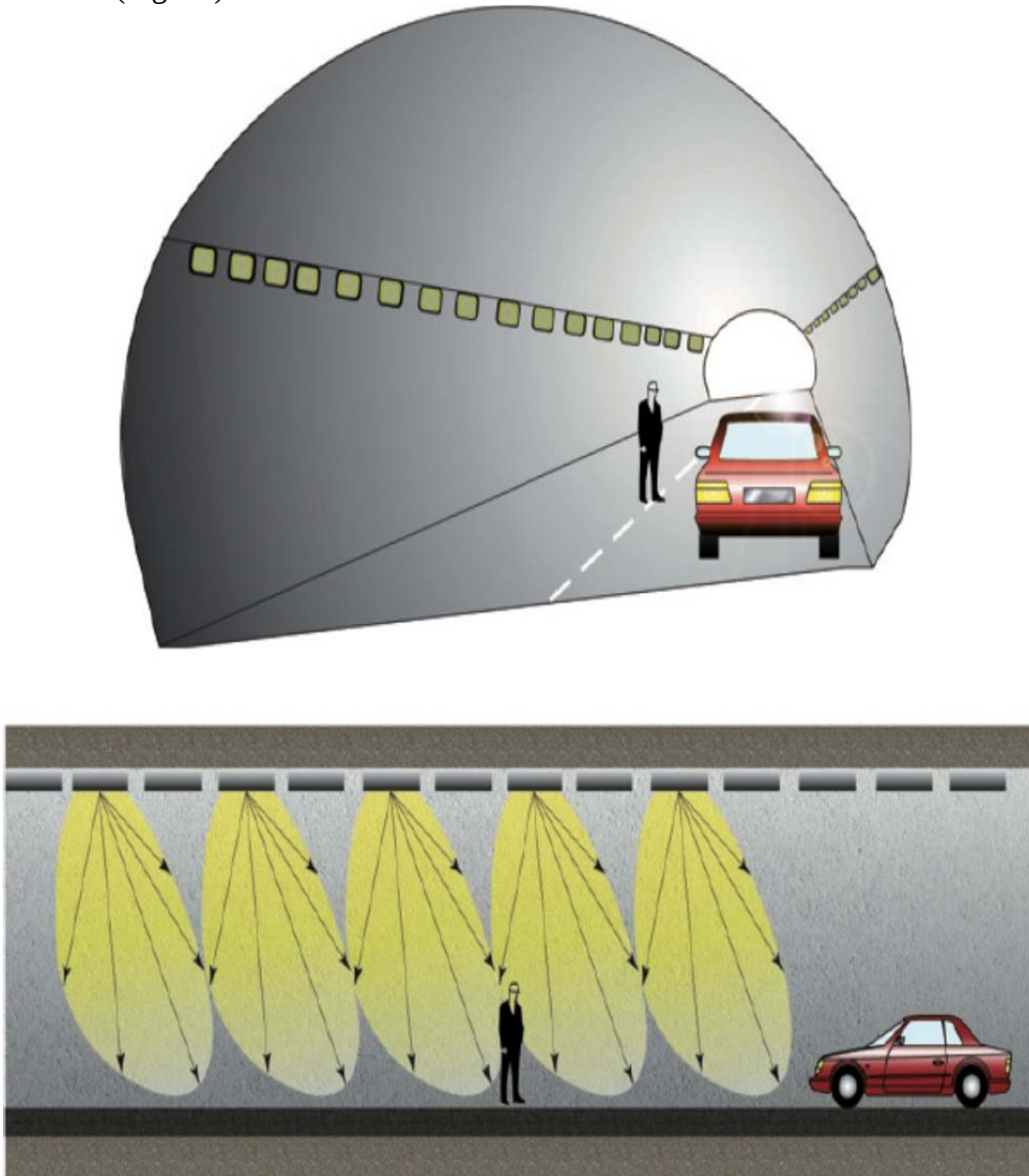


Fig. (36) *Sistema simétrico*

Sistema asimétrico

Es el sistema de alumbrado a contraflujo en el que las luminarias tienen una distribución de la intensidad luminosa asimétrica, que esta dirigida contra sentido de circulación del tráfico de vehículos. (Fig. 37)



(Fig. 37) Sistema asimétrico

ITS (Sistema Inteligente de Transporte)

Los sistemas ITS son una nueva tecnología que se está implementando y se encuentran presentes en los túneles carreteros largos (de más de 400 m), el factor de seguridad debe ser mayor, debido a que los peligros aumentan por la longitud. En el proyecto de la autopista Durango-Mazatlán se consideraron nueve túneles inteligentes que, por su gran longitud, se diseñaron con sistemas de alta tecnología que asegurarán la operación eficiente y segura de los usuarios de la carretera.

Los túneles cuentan con 5 sistemas inteligentes de iluminación, comunicación, ventilación, contra incendios y señalización los cuales se controlan a través del Centro de Monitoreo, edificio adyacente a la boca de entrada del túnel, cercano a los servicios de la ciudad

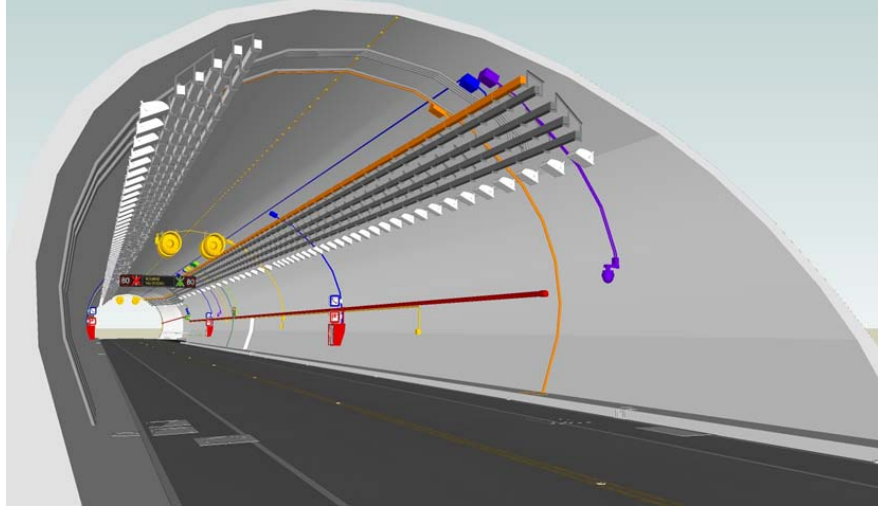
Entre sus funciones principales del Centro de Monitoreo se encuentra el seguimiento de los túneles inteligentes a lo largo de la troncal de fibra óptica. Cuenta con dispositivos de nueva tecnología en túneles y esto permite tomar decisiones en situaciones de emergencia tanto de los túneles como de la carretera. Así como brinda una comunicación directa con autoridades estatales y federales.



(Fig. 38) Centro de Monitoreo de Túneles

Sistema de Iluminación en Túneles

Otro de los nuevos sistemas empleados fue el de iluminación que proporciona un *alumbrado diurno* dotado de luminarias de vapor de sodio distribuido en las zonas de umbral, transición, central y salida.



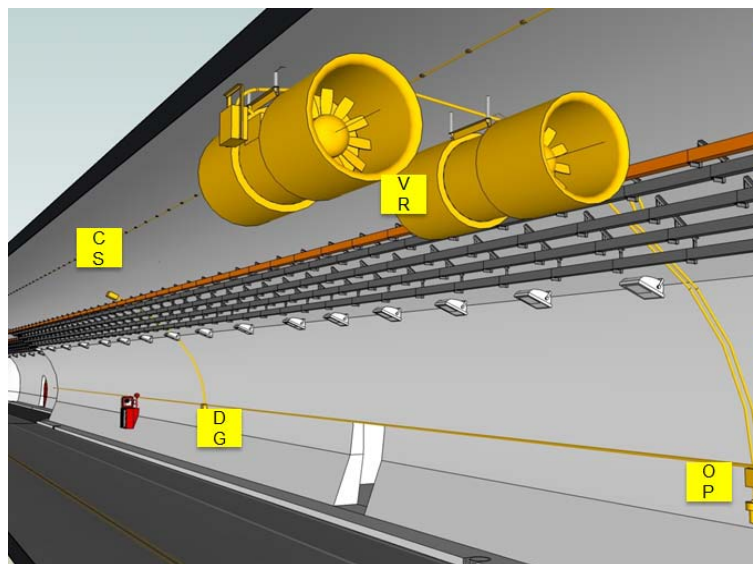
(Fig. 39) Interior de túnel inteligente

Sistema de Ventilación de Túneles

Este sistema cuenta con *ventiladores reversibles* (VR) tipo longitudinal, que brindan buena calidad del aire, y ofrecen una operación económica. Contiene *Opacímetros* (OP) que son los equipos de medición de partículas sólidas en suspensión que dificulta la visibilidad, este sistema garantiza la visibilidad y calidad del aire durante la fase de evacuación de usuario o posterior de algún suceso.

El detector de gases (DG), es el equipo de detección de Monóxido de Carbono y Óxido Nitroso, que permite detectar algún problema dentro de nuestro túnel.

El Cable sensor de temperatura (CS) es el responsable de la detección de temperatura lineal en toda la longitud del túnel.

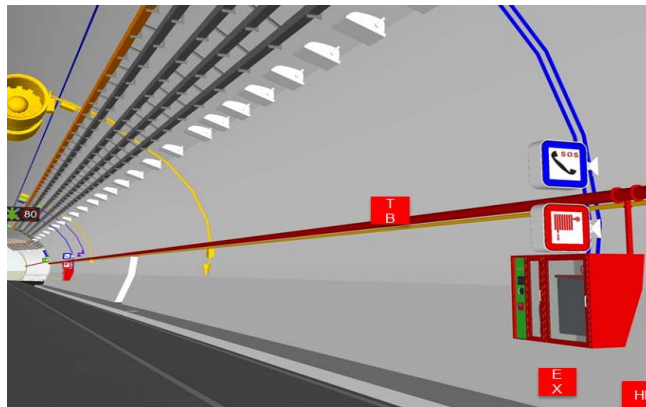


(Fig. 40) Sistema de ventilación en túneles inteligentes

Sistemas de Control de Incendios (HI)

Este sistema necesario en cualquier construcción, cuenta con *Hidrantes* y mangueras de 30 m de longitud, disponibles para los usuarios y centros de emergencias. *Extintores* (EX) de polvo seco, ubicados estratégicamente para cubrir las zonas del túnel en caso de emergencias. *Cuarto de Bombeo* (CB) que brinda un suministro de agua para 120 minutos con un depósito de 120 m³, una *Bomba Eléctrica* de apoyo y una *Bomba Sumergible* de 1.5 hp, y Tubería (TB), de acero inoxidable, para resistir cualquier imprevisto.

El alumbrado nocturno esta constituido por luminarias distribuidas a todo el largo del túnel. Estos sistemas son controlados por su propio centro de control, que es el encargado del control de los niveles de iluminación en la zona de umbral.



(Fig. 41) Sistema de control de incendios de túneles inteligente

Sistema de Comunicación en Túneles

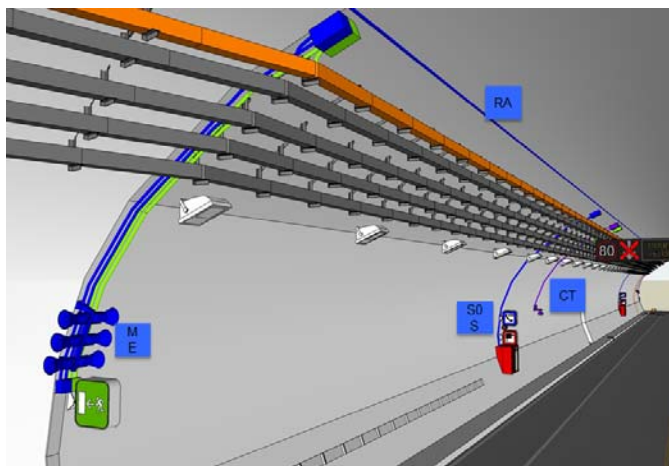
Dentro de los sistemas de comunicación se encuentra el de *teléfonos* (SOS), permite atender las necesidades de comunicación que se generen en el interior de los túneles entre el usuario y el Centro de Control. El operador decidirá comunicarse con sistemas de seguridad propios del túnel, bomberos, policía, y otros dependiendo del evento registrado.

Uno de los complementos del sistema son los *Megáfonos* (ME), permite la comunicación entre el personal de operaciones de la sala de control centralizado con los usuarios del túnel para instruir en evacuaciones, congestión, emergencias u otros. Sólo como apoyo y en combinación con otros sistemas, esto permite la sonorización de señales de aviso de emergencia.

El cable radiante (RA) es el emisor de estación de radio FM, que proporcionara comunicación a través de señal de Radio – Frecuencia, entre el centro de operaciones, servicios de carretera, unidades de seguridad y mantenimiento proporcionando información del túnel como es el tránsito, emergencias, incidencias, etc. El usuario deberá sintonizar la frecuencia indicada para informarse.

En cuanto a las Cámaras (*Circuito Cerrado de Televisión CT*) supervisa a través de un puesto operador que permite la verificación de cualquier accidente o incidente producido

dentro o fuera del túnel. Emplea tecnologías de procesamiento digital de la señal de video “Detección de incidencias”, así como uso de cámaras de última tecnología y con protección adecuada para las zonas exteriores con humedad, lluvia o luminancias extremas.

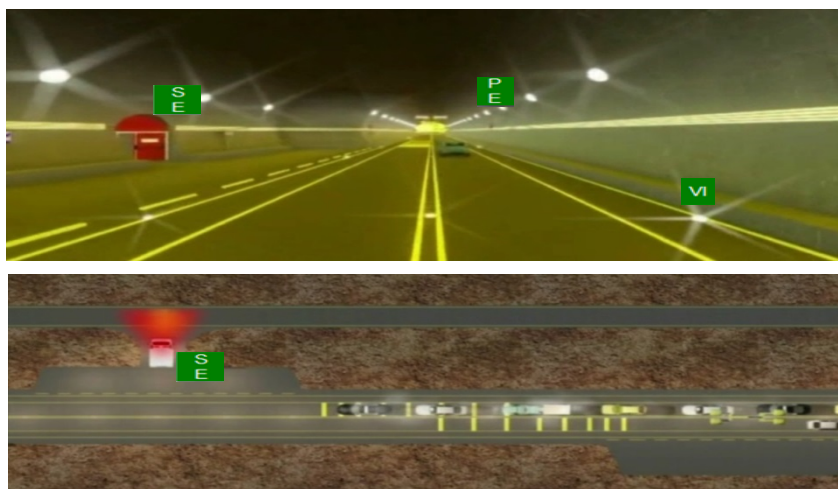


(Fig. 42) Sistema de comunicación en túneles inteligentes

Sistema de Señalización

Esto permite al operador gestionar la circulación e informar a los usuarios de las condiciones de uso del túnel a través de una *Pizarra Electrónica (PE)*, formada por un panel de LEEDS con dos líneas de 12 caracteres y 20 cm de altura y *Rótulos luminosos*, así como *Salidas de emergencia (SE)* y Vías de evacuación en caso de emergencia.

En cuanto al señalamiento horizontal para guía y control de tráfico. Contamos con *Violetas (VI)*, que sirven para separa los carriles de los túneles.



(Fig. 43) Sistemas de Señalización de Túneles inteligentes

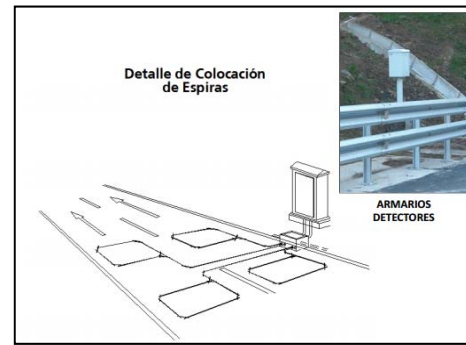
Complementando estos sistemas se tienen otros como es el de *Detección y Clasificación de Vehículos*, este permite conocer la intensidad, la velocidad y la longitud de los vehículos que transitan por la autopista, así como la distancia medida entre vehículos, podremos conocer la congestión, y clasificara de los vehículos de acuerdo a sus dimensiones.

En cuanto a las Estaciones Meteorológicas nos permite conocer las condiciones medioambientales que permitan o posibilite la información a los usuarios de la existencia de condiciones adversas para que éstos puedan modificar su conducción de forma adecuada.

El sistema de Reconocimiento de placas es una forma de seguridad en la que la detección y clasificación de los automóviles detecta y clasifica el vehículo enviando una imagen con la placa al Centro de Control.

El control de Gábildo tiene como función evitar que aquellos vehículos con exceso de altura circulen por el interior de los túneles y puedan ocasionar daños en la infraestructura y/o instalaciones, además de causar una situación de riesgo para la seguridad vial.

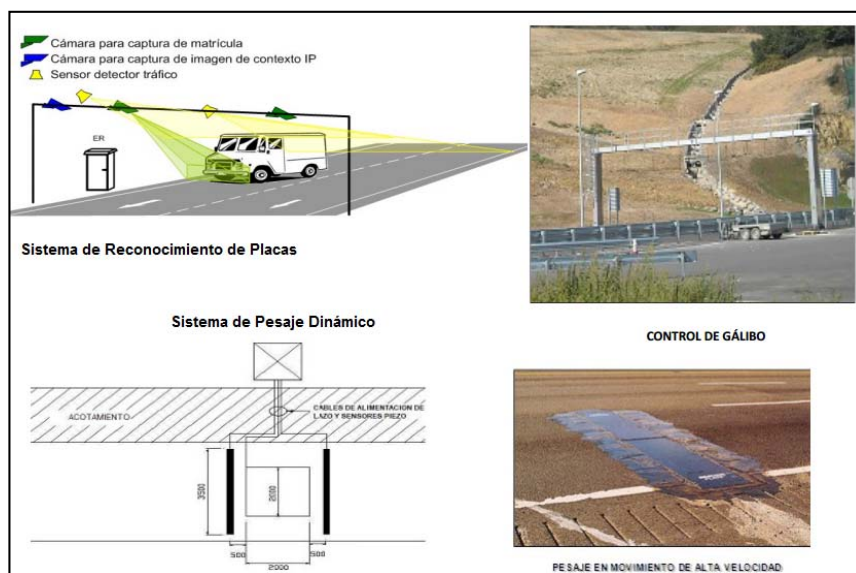
El Sistema de Pesaje Dinámico determina las cargas del tráfico que soporta un firme de carretera. Calcula el facto de equivalencia de los vehículos en ejes tipo, así como la obtención de la silueta del tráfico pesado.



(Fig. 44) Detección y Clasificación de Vehículos.



(Fig. 45) Estación Meteorológica.



(Fig. 46) Sistemas Complementarios.

Los túneles que cuentan con sistemas ITS son: El Sinaloense, Carrizo II, Carrizo III, El Varal, Baluarte, Piedra Colorada, Tortuga Nuevo, Picachos I y Papayito III, que están conectados mediante una línea troncal de fibra óptica a su centro de control respectivo.

La autopista Durango- Mazatlán cuenta con 2 centros de control desde donde se monitorean los túneles inteligentes a lo largo de la troncal de fibra óptica. Uno se ubica en Durango y otro en Mazatlán.

Se instalaron 49 casas de maquinas colocadas estratégicamente, equipadas con un transformador, un sistema de energía ininterrumpida para emergencia y tableros de fuerza para los sistemas, Astronic, No Break que mantienen la corriente regulada sin cortes de energía, y un cuarto de servidores de cada sistema de control.



(Fig. 47) Centro de Control

Solo el Túnel Sinaloense cuenta con 2 casa de maquinas, colocados a la entrada y salida de este para brindar mayor seguridad.



(Fig. 48) Cuarto de Maquina

Túneles Falsos

Por lo general, es conveniente realizar una transición de la plataforma de terracerías al inicio del túnel, construyendo una estructura con la misma sección útil que el revestimiento definitivo, como medida de seguridad. Esa estructura es la que se conoce como túnel falso y del cual se decidió diseñar y construir en cada uno de los 61 túneles de la autopista. La construcción de un túnel falso se realizó por módulos, de la misma longitud que la cimbra que se utilizó para su construcción. El carro de cimbrado es el mismo que se usó para la ejecución del revestimiento del túnel. Al ser un túnel falso una estructura, su construcción se realizó, como casi todas, en dos fases. En la primera se construyeron las zapatas sobre las que se levanta la bóveda del túnel falso. Una vez construidas éstas, se coloca el carro de cimbrado entre ambas y, sobre él, el acero de refuerzo del concreto de la bóveda. Posteriormente, se construye la bóveda con la cimbra exterior, que no cierra completamente dicha bóveda, siendo suficiente con que la cimbra llegue hasta el ángulo de reposo del concreto. Para la colocación de la cimbra exterior es necesario que la excavación realizada para el portal tenga un sobreancho hasta los taludes laterales, que servirá para el apoyo de la cimbra y para que los operarios tengan un espacio de trabajo. Una vez colocadas las cimbras, se da paso al colado del concreto.

En algunos casos particulares fue necesaria la construcción de túneles falsos intermedios para unir dos obras subterráneas, debido a que en ciertos tramos de dichos túneles la cobertura es menor de 20 m, lo cual obligó a excavar zonas inestables.



(fig. 49) Túnel del Cantil portal Durango.

El túnel Papayito II cuenta con dos túneles subterráneos de 450 y 230 m, respectivamente, unidos por un túnel falso intermedio de 30 m de longitud. Este caso representó realizar un corte máximo de 50 m de altura y un mínimo de 15 metros. Otros túneles con la misma situación fueron: Los Morillos, con dos túneles subterráneos de 154 y 67 m unidos por un túnel falso de 98 m; Carrizo II, con dos obras subterráneas de 123 y 95 m unidos por 59 m de túnel falso, y La Piedra, con dos túneles subterráneos de 50 y 130 m unidos por un túnel falso de 70 metros. También hay que mencionar que, en algunos casos, se construyeron túneles falsos muy largos, como el Guamúchil, de 174 m en el portal Mazatlán; el Carrizo II, de 134.5 m en el portal Durango o Las Palomas, de 103 m de largo en el portal Durango.

La SCT ha dado mucha importancia a la instrumentación de los túneles. El objetivo es observar el comportamiento del medio en el que se excavan los túneles, así como verificar la validez de los análisis realizados y detectar a tiempo una posible situación de riesgo.



(fig. 50) Panorámica del Túnel Santa Lucía I,

Las mediciones se realizaron en secciones de convergencia, las cuales sirvieron para medir las deformaciones de la sección del túnel. Se establecieron tres líneas de medición, dos entre los hastiales y la clave y una entre los hastiales. Se miden las variaciones de las distancias entre los puntos de referencia colocados en la pared de los hastiales y clave, las lecturas fueron efectuadas con un equipo suizo llamado distometer. Las referencias para las mediciones de convergencia se fijan a la roca, lo más cerca posible del frente de excavación. La resolución y precisión de los aparatos es de 0.01 mm y ± 0.03 mm, respectivamente.

3. CONCLUSIONES.

Entre 1980 y 2006 se construyeron 16 túneles con una longitud de 6.4 km, por lo cual el desarrollo en México de esta especialidad durante ese tiempo quedó un tanto estancado.

Esto motivó a continuar con estos trabajos, ya que la ingeniería de túneles mexicana ha sido fundamental para dar soluciones seguras y oportunas a los retos de las diferentes obras de infraestructura de nuestro país y a las difíciles condiciones del subsuelo que se nos han planteado.

Otro factor importante en la creación de túneles es el aumento de los habitantes, congregados en su mayoría en megaciudades, lo que nos plantea enormes desafíos en los años por venir, y nos da la posibilidad de crear nueva infraestructura, particularmente los túneles representan un opción que ofrece posibilidades de eficiencia, sustentabilidad y reducción importante del impacto al medio ambiente.

Conocer a lo largo de un túnel, las características de las formaciones por atravesar y las condiciones de movimiento del flujo subterráneo del suelo. El principal reto geotécnico de un proyecto subterráneo, es conocer las condiciones geológicas regionales a lo largo del túnel.

Hacer realidad la construcción de túneles implica verificar cotidianamente las hipótesis consideradas en el proyecto para ratificarlas o rectificarlas. Y mantener medida de seguridad apegadas a proyecto en todo momento.

La implementación de nuevas tecnologías, como maquinaria material y procesos constructivos permitieron construir túneles en cualquier clase de suelo o rocas, dentro de este proyecto se utilizaron nuevas tecnologías de la construcción como fueron las anclas de fricción, bulbones, el perfil omega y Th, la chapa bernold o poligonal el enfilage y las membranas, por mencionar algunos. Al igual que los nuevos sistemas ITS, que se implementaron de los túneles inteligentes, Cada túnel es diferente pero la constante es identificar las necesidades del momento para proveer condiciones de operación segura. (Túnel inteligente)

Dado que las condiciones climáticas del medio ambiente varían constantemente durante el día y durante el año, para la adecuada operación de un túnel es necesario modificar a cada momento las condiciones ambientales dentro del túnel.

Los constructores de esta autopista y de muchas obras que se hacen en México son hombres y mujeres comprometidos con su labor, construyen el país y son parte de la historia, gracias a ellos se pudo lograr la construcción de la autopista.

En los últimos años se ha desarrollado la necesidad de proyectar y construir Túneles de longitudes considerables. Durante este y los próximos cinco años se contempla la construcción de más túneles dentro de los proyectos carreteros.

En México, se apuesta por nueva infraestructura, con una gran inversión donde se contempla a los túneles.

La construcción de la nueva carretera Durango-Mazatlán, fue una detonación económica de la zona norte del país, generó empleos y está agilizando el flujo vehicular entre el Golfo y el Pacífico, la reducción de tiempo en recorridos es menor, esto permite que el tránsito se incremente por lo menos al doble, facilitando la transportación de todo tipo de artículos, mejorando la interconexión.

Fue una gran experiencia, un gran aprendizaje, ya que implicó un reto constructivo para todos aquellos que se involucraron en el proyecto. Fue grato para mí ver concluido este proyecto y estar presente en la inauguración de la etapa final de la construcción que se llevó a cabo este 17 de Octubre del presente año.

“La autopista Durango-Mazatlán fue un reto, una enorme responsabilidad y un gran orgullo”.

4. REFERENCIAS.

1. SCT. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes). Expedientes en centros SCT y oficinas centrales
2. TEXSA SYNTHETICS, México 2011, “Membranas”. Disponible en http://www.texasynthetics.com/es/fichas/f_vinitex_sl_15.pdf.
3. Diseño y Conservación de Pavimentos Rígidos *AASHTO* 93. UNAM. Disponible en <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/504/A6%20Dise%C3%B1o%20de%20Pavimentos%20R%C3%ADgidos.pdf?sequence=6>

5. RECONOCIMIENTOS.

Quiero agradecer a las personas que colaboraron indirecta y directamente en la construcción de la autopista, ingenieros, técnicos, obreros y operadores, que durante 10 años trabajaron para que este proyecto se pusiera en operación al igual que a los que colaboraron en la recopilación y síntesis del presente.

A la SCT, por siempre brindarme su confianza y apoyo para la culminación de los proyectos.

Y definitivamente a mi familia, Mamá, Hermanos, Esposa e Hijos, gracias por su apoyo.