



CAPÍTULO 2.
DISEÑO DEL TRAZO Y DE LA SECCIÓN TIPO



DIRECCIÓN GENERAL DE
SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL TRAZO Y DE LA SECCIÓN TIPO



Túnel Pánuco, Carretera Durango - Mazatlán

2.1. TRAZO EN PLANTA Y PERFIL

Los túneles de carretera se diseñan para favorecer el paso continuo y seguro de vehículos motorizados, a través de los obstáculos topográficos que impone la naturaleza al trazado del camino, siendo los más comunes, las montañas. Lo anterior implica que en la mayoría de los casos, los túneles de carretera atraviesan macizos rocosos.

Su diseño además de seguro, cómodo y funcional, debe ser estético. Este tipo de obras requiere de características geométricas particulares que obedecen a las necesidades del tráfico vehicular; sus excavaciones, de entre 100 y 140 m² de área, no son ni simples ni tienen la forma y dimensiones convencionales que suelen adoptar otros túneles, (hidráulicos, ferroviarios, etc.).

Los túneles de carretera se caracterizan por su trazado y sección, definidos por criterios geométricos de gálibos, pendiente, radio de curvatura y espacios necesarios para instalaciones.

El trazado en planta y perfil del túnel dependen de los alineamientos de la carretera y de las características de ésta, con la que tiene que mantener una cierta homogeneidad; estos datos suelen ser más bien parámetros de entrada al diseño de la sección interior.

El trazado en planta generalmente viene determinado por el alineamiento horizontal de la carretera y normalmente no puede variarse de forma sustancial. No responde a un planteamiento único, ya que depende de la longitud, ubicación e incidencia sobre las laderas donde se alojan las obras de emportalamiento.

El proyecto de trazado de un túnel debe tomar en cuenta ciertas consideraciones importantes respecto a la visibilidad, como evitar su pérdida a la salida, ya que el cambio de las condiciones de luz dificulta la percepción de la vía, pudiendo causar que el conductor disminuya de forma abrupta la velocidad. Por tanto es de suma importancia una buena coordinación entre la orientación del túnel y la iluminación.

En el caso de túneles cortos (longitud < 200 m), se recomienda que tengan un trazo en tangente: es conveniente que al entrar pueda verse la salida (la percepción de la luz natural al otro lado ayuda a no tener deslumbramientos) por las siguientes razones:

- 1) El conductor percibe el cambio de condiciones brevemente (200 m a 80-90 km/h =7 s).
- 2) El conductor puede percibir la existencia de objetos en la calzada por contraste.

Si el túnel es más o menos largo (1,000 a 1,500 m), es importante disponer de curvas en las bocas para evitar el deslumbramiento, facilitando una transición adecuada de las condiciones de luz.

Para túneles de más de 1,500 m de longitud, se recomienda disponer de curvas de radios amplios para facilitar una adecuada distancia de visibilidad.

Para el diseño del alineamiento vertical del túnel, deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Una primera condición para un buen alineamiento vertical del túnel es el drenaje, por lo que debe asegurarse una pendiente mínima de 0.5% para desalojar adecuadamente el agua que pueda recibir el túnel.
- b) Se requiere una pendiente mínima para drenar las aguas procedentes del macizo rocoso que son captadas por el sistema de impermeabilización y conducidas por el colector del túnel hacía el drenaje exterior.
- c) Evitar curvas verticales, tanto convexas muy pronunciadas que no permitan la visibilidad, como cóncavas que provoquen puntos bajos que obliguen a requerir equipos de bombeo para desalojar el agua acumulada.
- d) Es conveniente contar con una pendiente longitudinal (entre 2 y 5 %) en túneles bidireccionales, mientras que en unidireccionales, ascendente menor al 2% y descendente menor al 5%.
- e) Ventilación natural en caso de túneles cortos y, pendientes adecuadas para favorecer un óptimo funcionamiento de la ventilación de los túneles que lo requieran.
- f) Tipo y composición de vehículos que circularán.

2.1.1. Topografía.

La topografía es el elemento más importante para el trazado de un túnel carretero. Es fundamental que la configuración topográfica no tenga errores significativos. Una mala definición del terreno se reflejará en los costos (mal cálculo del movimiento de tierras), o en que durante la obra se requieran cambios en la posición de los portales o en la geometría de los cortes o lo más grave, en un cambio en la longitud del túnel. Además, estos errores pueden llegar a afectar tiempos de ejecución, la construcción de estructuras anexas como puentes, viaductos y terraplenes, así como dañar, casas, edificios, caminos o instalaciones (gasoductos, líneas eléctricas, etc.).

Al inicio de los trabajos debe realizarse la recopilación de información que proporcione la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para iniciar con los trabajos de campo del proyecto. La información consistirá principalmente en la obtención de las *plantas de kilómetro*¹ que contienen el alineamiento horizontal y vertical del camino y del túnel, así como la *matematización*² correspondiente. Asimismo se deberá recopilar la información del tipo de carretera, velocidad de proyecto, el tránsito diario promedio anual (TDPA) y composición vehicular que transitará por la carretera.

Con base en la recopilación de la información, deberán realizarse visitas de inspección y reconocimiento al sitio del proyecto con objeto de verificar que la información proporcionada corresponda con la que está planteada en campo.

Adicionalmente el proyectista deberá recopilar la información disponible de la zona en estudio, tanto en las diferentes Direcciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes como en las oficinas del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM). Esto es: planos topográficos, geológicos, fotografías aéreas, plantas y perfiles, bancos de nivel, referencias de estudios y todo lo necesario que pudiera ser útil para el proyecto.

El levantamiento topográfico (situación actual del sitio) debe incluir altimetría, planimetría y toponimia que servirá de base para la elaboración del anteproyecto del trazado tanto del túnel como de la liga de los accesos, incluyendo los tajos de entrada y salida; deberá apoyarse en el mismo sistema de coordenadas y nivel del eje de la carretera aprobado y trazado en campo, debiendo dejar referencias de ese eje, las cuales se utilizarán posteriormente en el replanteo del proyecto aprobado.

2.1.2. Delimitación del área de estudio

El ancho del levantamiento topográfico en planta tendrá como mínimo 125 m a cada lado del eje longitudinal del túnel en proyecto. Para definir el ancho del área de estudio cuando sean túneles gemelos se considerarán los 125 metros para cada lado a partir de cada uno de los ejes. Debe tomarse en cuenta el límite del derecho de vía; en ocasiones está determinado de un lado mayor longitud que del otro, en tal caso el levantamiento topográfico deberá cubrir como mínimo hasta el derecho de vía.

Para definir la longitud del levantamiento topográfico se considerarán 100 m a partir de la intersección del terreno con la rasante en cada uno de los accesos del túnel. En caso de que el terreno continúe paralelo o semiparalelo a la rasante, deberán levantarse por lo menos 100 m delante del portal marcado en las plantas de kilómetro. Sí durante el estudio se plantea la posibilidad de mover los portales, en ese caso el levantamiento topográfico deberá cubrir el área necesaria para proyectar los tajos de acceso al túnel.

2.1.3. Grado de precisión

La planta topográfica del área definida para elaborar el proyecto, deberá contener la configuración con curvas de nivel a cada 1 m, así como el eje de trazo del camino principal cadeneado a cada 20 m, la localización de caminos secundarios, las referencias del trazo, construcciones aledañas (indicando el tipo de construcción de que se trate), líneas de energía eléctrica, telegráficas y telefónicas, ductos, cercas o muros, caminos, simbología, etc. y todos los datos que se consideren necesarios para la elaboración del proyecto.

¹ En México se conocen como plantas de kilómetro a los planos (divididos por kilómetro), aprobados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes que incluyen la topografía y los alineamientos vertical y horizontal.

² Matematización es la definición matemática de la geometría de los alineamientos, que incluye todos los puntos característicos de las curvas y las rectas, así como radios, ángulos, pendientes, etc.

2.1.4. Levantamiento topográfico de detalle para diseño de portales y obras exteriores (cuartos o edificios de control)

Los portales del túnel suelen ser un componente crítico de la obra debido a que, por lo general, se excavan en las partes más descomprimidas (y de peor calidad) del macizo y/o en zonas de depósitos de talud que incluyen espesores importantes de suelo.

Los portales son sin duda las obras más complejas de todo el proyecto. Lo anterior debido a que no se limitarán a la excavación de los tajos de acceso y a la estabilización de sus correspondientes taludes, sino que requerirán de todo un proceso de planeación previo a su definición geométrica, que incluya la disposición óptima de los espacios destinados a albergar las instalaciones de control y en su caso la salida del túnel de escape o emergencia (túneles mayores de 1500 m). Además, los tajos deben estar planeados, cuando sea el caso, para ser compatibles con la obra de un segundo túnel a futuro.

Los levantamientos topográficos en las zonas de los portales tienen que contar con un alto nivel de detalle, con curvas de nivel a cada metro y deberán dibujarse secciones transversales considerando, como ya se mencionó, las áreas destinadas a los cuartos o edificios de control.

2.1.5. Replanteo en campo previo a la construcción

Antes de iniciar la construcción del túnel se realizará el trazado en campo del eje de proyecto, que consistirá en el replanteo de los puntos principales del alineamiento horizontal (PST, PI, PC, PT, TE, EC, PSCC, CE y ET) y estacas a cada 10 m en los portales y a cada 20 m en túnel, además de los intermedios que se requieran por topografía. La colocación de estacas sobre el terreno del trazo deberá iniciarse fijando en campo la ubicación del eje del proyecto con la finalidad de que pueda comprobarse que no existen obstáculos en el área de construcción, tales que puedan obligar a modificar el trazo. En caso de que no existan obstáculos en el área, se llevará a cabo la colocación de estacas en el eje conforme al proyecto entregado por la SCT; en caso contrario se deberá notificar a la dependencia la problemática en específico.

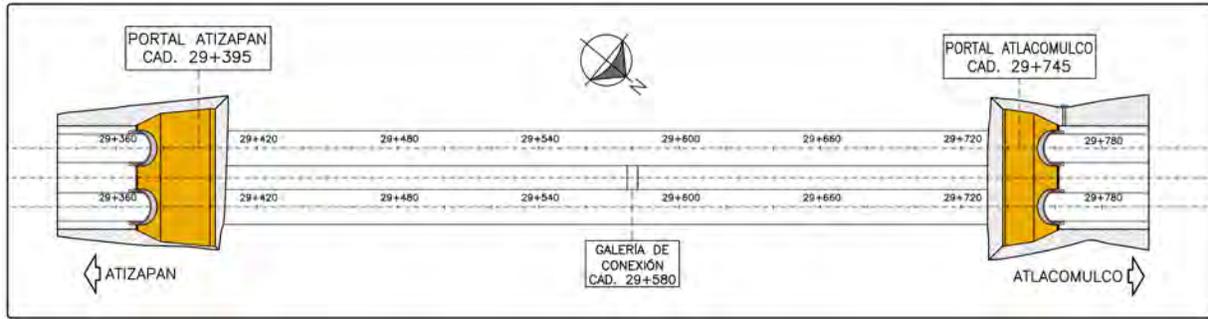
Los datos de trazo del eje de proyecto se reportarán tanto en libretas de campo como en registros de trazo definitivo, donde deberán quedar registrados, con nombre, esviaje y cadenamamiento al centímetro, todos los detalles que se encuentren a lo largo y ancho del eje en estudio, tales como vías de comunicación existentes (caminos, carreteras pavimentadas, vías férreas) registrando asimismo su esviaje e igualdades de cadenamamiento (operación vs. proyecto); líneas de energía eléctrica con esviaje, voltaje y altura de conductores sobre el terreno; ductos con su diámetro, profundidad y tipo de fluido que conducen; canales, cercas (de alambre y/o piedra), construcciones (tipo y dimensiones); en el caso de los ríos y arroyos se registrará la elevación del N.A.M.E. observado en campo.

Se anotará también el régimen de tenencia de la tierra (ejidal, comunal, propiedad privada, etc.), linderos con los nombres de los propietarios y/o posesionarios y límites de la división política (Municipio, Estado).

Durante la construcción del túnel, es necesario replantear *in situ* el trazado del eje a partir de los puntos referenciados, los cuales deberán aparecer dibujados en el Plano Topográfico General.

Las referencias del trazo (mojoneras y objetos fijos) deberán ubicarse mediante coordenadas polares (ángulo y distancia). Las referencias (R1) deberán quedar fijas en tornillos de cruz de 4" o varillas de 3/8" ahogados en mojoneras de concreto de 20 cm de diámetro y 40 cm de profundidad; las referencias (R2) se ubicarán en objetos fijos que no se deformen con el tiempo.

En las tangentes deberán referenciarse puntos intervisibles distantes 300 m como máximo; en curvas se referenciarán los PI y los puntos inicial y final de cada curva (PC – PT ó TE – ET); cada punto referenciado deberá contar con dos referencias intervisibles.



GEOMETRIA DEL ALINEAMIENTO HORIZONTAL EJE TRONCAL																	
CURVA	PC		σ	TE		EC		PI	σ	PST		CE		PT	σ	ET	
	X	Y		X	Y	X	Y			X	Y	X	Y			X	Y
733-2	TE=733+735.959		460,160.578	2,299,374.164	EC=733+807.959		460,263.600	2,299,187.441	PI=733+949.213	PST=733+949.213		CE=734+048.870		460,475.918	2,299,207.438	ET=734+120.870	
734+1	TE=734+244.763				EC=734+316.763					PST=734+505.605		CE=734+618.828				ET=734+690.828	
	460,595.264	2,299,219.056	460,671.119	2,299,222.608	460,858.962	2,299,243.515	460,907.629	2,299,060.886	460,930.387	2,298,992.638							

CURVA	Δt	Δc	Gc	Rc	ST o STe	Lc	θ e	Le	Xc	Yc	k	p
733-2	56°29'36.7471"	51'11'37"	4'15'	289.627	213.258	240.811	7°39'00"	72.000	71.871	3.202	35.978	0.802
734+1	79°29'19.7770"	64'11'20"	4'15'	289.627	260.847	302.065	7°39'00"	72.000	71.871	3.202	35.978	0.802

Figura 2.1. Planta general y tabla del alineamiento horizontal.

Finalmente, la empresa proyectista, como parte de la información topográfica básica, deberá incluir en los planos del proyecto lo siguiente:

- Dibujo de la planta y el perfil topográficos.
- Secciones transversales a cada 10 m.
- Ubicación de las referencias fijas sobre el terreno.
- Alineamiento vertical y horizontal.
- Ubicación de los portales y la extensión de las zonas de excavación a cielo abierto.
- Elevaciones en planta y en el perfil longitudinal.
- Símbolos de curvas horizontales.
- Coordenadas UTM (o las que la Dependencia determine).
- Norte.
- Flechas indicando la dirección al destino de la carretera o del tramo.
- Tabla de datos de la geometría del alineamiento horizontal.
- Tabla de elevaciones de subrasante y terreno natural para el perfil longitudinal.
- Croquis de ubicación de la subrasante.
- Esquema de las secciones tipo en el interior del túnel y túneles falsos para tangente y curva.
- Croquis de localización.
- Simbología.
- Cuadro de notas.
- Escalas (gráficas y numéricas).

Asimismo, deben presentarse planos de secciones transversales que incluyan información sobre: sección del terreno natural, geometría de la calzada, taludes de corte o terraplén, cadenamientos, elevaciones, etcétera. Estas secciones deberán abarcar un área de unos 30 m antes del plano de emportalamiento y 20 m después. En estas secciones deberán plasmarse los tratamientos propuestos en los taludes de los cortes. No es necesario presentar secciones topográficas a lo largo de todo el túnel.

2.1.6. Criterios generales para seleccionar túnel contra tajo³

Como se mencionó anteriormente, los túneles carreteros se diseñan para favorecer el paso continuo y seguro de vehículos motorizados, a través de los obstáculos topográficos que impone el trazado de una carretera. Por lo tanto, su diseño debe ser básicamente funcional y, hasta donde esto sea posible, estético.

Cuando se proyecta una carretera o una autopista, particularmente en zonas montañosas, un dilema común al que se enfrenta el proyectista radica en decidir entre tajos de mediana altura y túneles de regular cobertura. A medida que la altura del terreno natural por encima de la rasante crece, el túnel va volviéndose más atractivo y viceversa, hasta resultar imprescindible, a menos que se modifique el trazo o se eleve la rasante. No hay duda de que, casi en la totalidad de los casos, un tajo de mediana altura resulta más económico que un túnel. Sin embargo, existen muchos argumentos, que con frecuencia se ignoran, que pueden favorecer la decisión de construir un túnel.

La construcción de túneles carreteros ha sido considerada tradicionalmente como una empresa fuera de lo común; es decir, una aventura técnica y financiera en la que las incertidumbres que impone la naturaleza llevan consigo riesgos lo suficientemente importantes como para tomarse el tiempo necesario en su planificación, y para no escatimar recursos en investigaciones previas que permitan encontrar las opciones más viables y minimizar las incógnitas.

Un aspecto fundamental que conduce a la sustentabilidad de una obra de túnel tiene que ver con los costos de construcción y los operativos. Los costos de la obra, y la posterior inversión en mantenimiento y operación, están directamente relacionados con la calidad de los diseños y con la calidad de la construcción.

En obras civiles, el término sustentabilidad (o sostenibilidad) comúnmente se asocia a una serie de técnicas de diseño y construcción orientadas a mitigar impactos ambientales mediante la concepción de infraestructuras respetuosas con el entorno, que además satisfacen las necesidades actuales sin interferir en la capacidad de futuras generaciones en satisfacer las propias. En el diseño de túneles, estos conceptos abarcan no sólo la integración paisajística de la obra en su ambiente natural, sino que se extienden a una concepción racional de ésta, tanto en términos geológicos, geotécnicos y geohidrológicos, como en términos funcionales.

Conforme avanza la ingeniería de túneles en nuestro país, menos se sostiene la idea de que, *a priori*, cuesta más barato construir un corte que un túnel, o que hay que hacer los tajos de acceso lo más largos posible y por lo tanto el túnel lo más corto, porque resulta más barato el metro de tajo que el de túnel. También se han venido abajo “recetas” que antiguamente existían según las cuales, la factibilidad técnica de un túnel dependía de que la cobertura, el recubrimiento o techo de la excavación fuera de cuando menos dos o tres veces el diámetro de la misma. Hoy en día este parámetro ha perdido validez gracias a los avances tecnológicos en materia de obras subterráneas, por lo tanto, lo que generalmente juega un papel importante en la toma de decisiones es el factor económico durante la construcción pero se omiten factores como el mantenimiento, la seguridad a largo plazo y la sostenibilidad ambiental.

Derivado de lo anterior y con las experiencias recientemente adquiridas durante la construcción de más de 80 túneles carreteros, resulta conveniente llevar a cabo el proyecto de un túnel de carretera cuando el corte, a lo largo de por lo menos 100 m, tenga una altura promedio mayor a los 30 m; sin embargo habrá casos especiales en los que exista la posibilidad de efectuar un túnel muy corto o un corte mayor a los 30 m y de más de 100 m de longitud, la decisión de túnel o corte, será tomada en función de las condiciones geológico-geotécnicas de cada caso en particular.

³ Ref. [5]

En la Figura 2.2 se muestra el esquema de alineamiento horizontal comúnmente adoptado, mientras que en la Figura 2.3 se muestra un esquema más moderno, mismo que ha sido adoptado por países desarrollados hace ya más de 30 años y que ha demostrado ser, a la larga, más económico y respetuoso del medio ambiente. Cabe aclarar que el valor “intangible” que tiene una naturaleza bien cuidada no es fácilmente calculable, pero sin duda es muy grande.

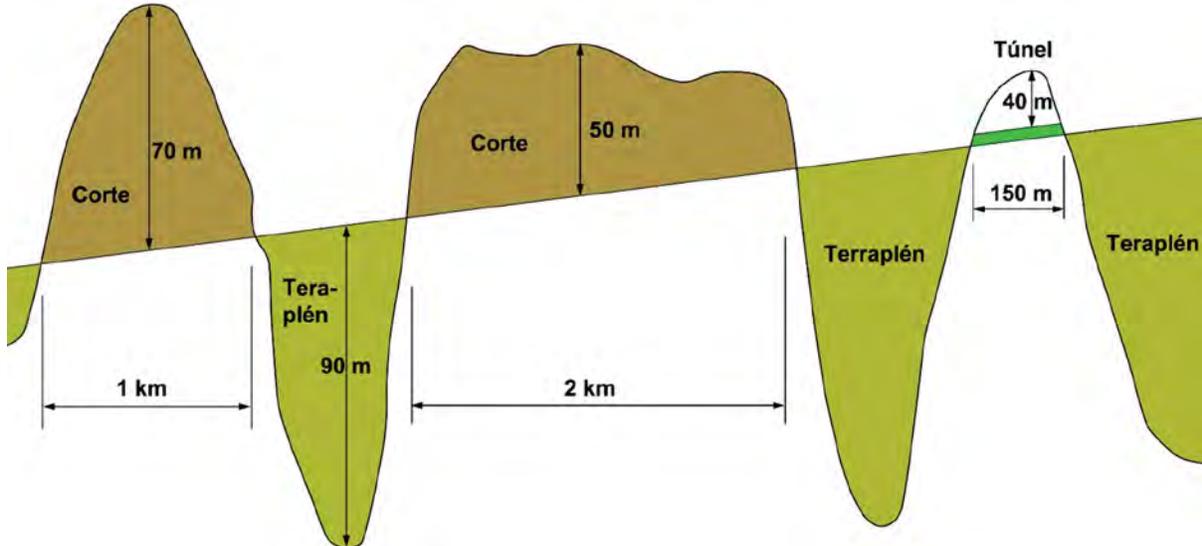


Figura 2.2. Esquema adoptado en años recientes.

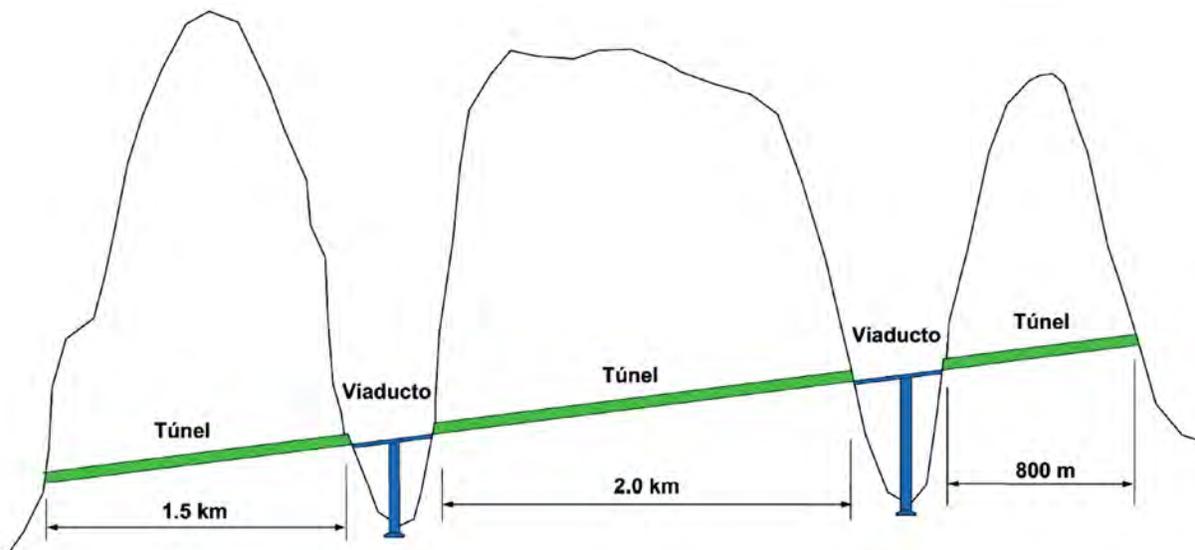


Figura 2.3. Esquema que debería adoptarse.

2.1.7. Criterios generales para la definición de los emportalamientos

La posición de los accesos al túnel se deberán analizar y plantear con varias alternativas, tomando en cuenta el derecho de vía, variando los cadenamientos de entrada y de salida, las pendientes de los taludes en los cortes, adecuando la longitud del túnel por excavar, la de los emboquilles y la de túneles falsos, así como la altura de los cortes. De entre las posibles soluciones analizadas se deberán elegir aquellas que arrojen las condiciones constructivas y de estabilidad más favorables para la obra.



Figura 2.4. Carretera respetuosa del medio ambiente. Ref [2].



Figura 2.5. Tratamiento estético de los emportalamientos. Tomada de Mott MacDonald.

El cadenamiento para la sección de emportalamiento se fijará con base en las condiciones geológicas y geotécnicas anticipadas, en la cobertura juzgada conveniente para favorecer la estabilidad de la excavación y en las condiciones topográficas, de tal forma que no resulten cortes excesivos debidos a la propia irregularidad del terreno.

Para la solución definitiva deberá tomarse en cuenta la geometría, la volumetría y la estabilidad de las excavaciones a cielo abierto, así como los tratamientos requeridos en ellos. En todos los casos es recomendable la construcción de túneles falsos, los cuales mejoran la funcionalidad del túnel al evitar el riesgo de caídos de bloques sobre la calzada y disminuir los efectos visuales de atrincheramiento y choque frontal. Además, estos túneles falsos con boquillas constituyen un acabado estético para la obra (Figura 2.5).

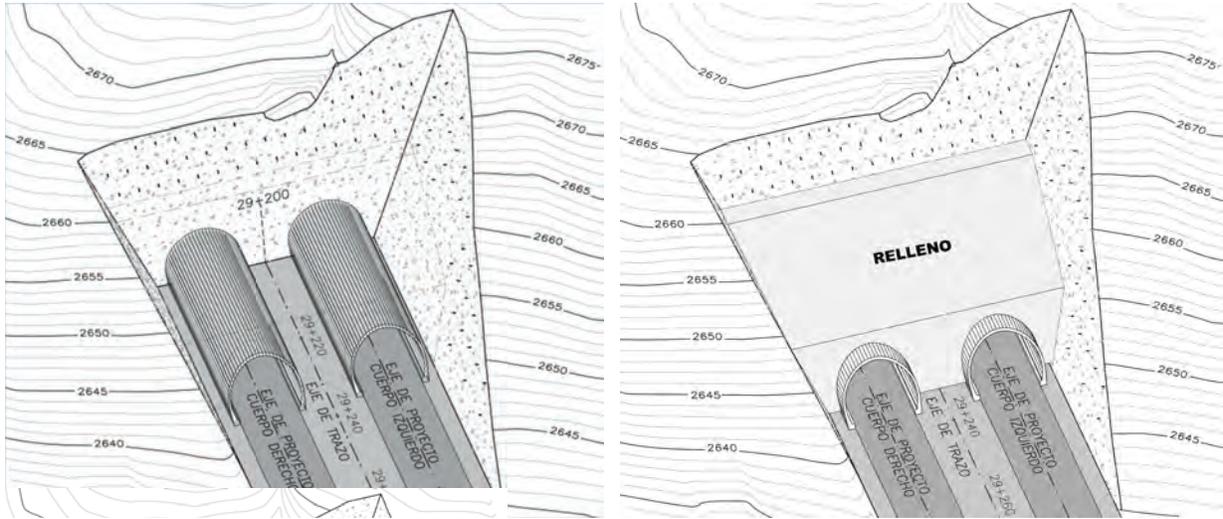


Figura 2.6. Isométrico de un tajo de acceso con boquillas prolongadas, sin y con relleno.

Los caminos de acceso a los portales deberán ser considerados como obras iniciales del túnel. El proyecto de estos caminos deberá tener en cuenta las características requeridas de seguridad para el paso continuo del equipo pesado de construcción que se utilizará en el túnel. No es poco común que los caminos de acceso dañen el terreno donde se construirán los cortes para el emportalamiento.

Para definir el trayecto de los caminos de acceso, se deben tomar en cuenta los cortes correspondientes para los tajos de acceso, evitando cruzar de un lado a otro con los caminos pero sobre todo evitar pasar por encima del túnel cerca del talud frontal, para evitar quitarle cobertura en los primeros metros de túnel, sobre todo cuando se trata de túneles con muy poca cobertura.

2.2. PERFIL LONGITUDINAL

El proyecto del túnel deberá contener el perfil del terreno natural por el eje de proyecto, cadenamientos y elevaciones de la subrasante de proyecto, escalas horizontal y vertical indicando estaciones a cada 20 m, y elevaciones a cada 1.0 m, acotando las elevaciones a cada 5 m; flechas indicando los destinos de la carretera en proyecto; estratigrafía del terreno, longitud de túnel excavado, ubicación de portales y túneles falsos.

2.2.1. Perfil del terreno

Se verificará el perfil del terreno obtenido directamente en campo mediante nivelación diferencial. La elevación del banco de nivel de arranque se propagará a partir de la elevación de dos bancos de nivel establecidos en la nivelación del eje de trazo del camino troncal.

Deberán establecerse dos bancos de nivel, como mínimo, por kilómetro, comprobados a cada 500 m aproximadamente, mediante nivelación diferencial de ida y vuelta, los cuales se ubicarán fuera del derecho de vía y en objetos fijos permanentes que no se deformen con el tiempo.

La nivelación del terreno natural por el eje de proyecto consistirá en obtener las elevaciones de las referencias mediante nivelación diferencial en los puntos estacados a cada 20 m así como en los puntos principales del alineamiento horizontal y en los puntos intermedios de quiebre del terreno que presenten desniveles mayores de 0.50 m.

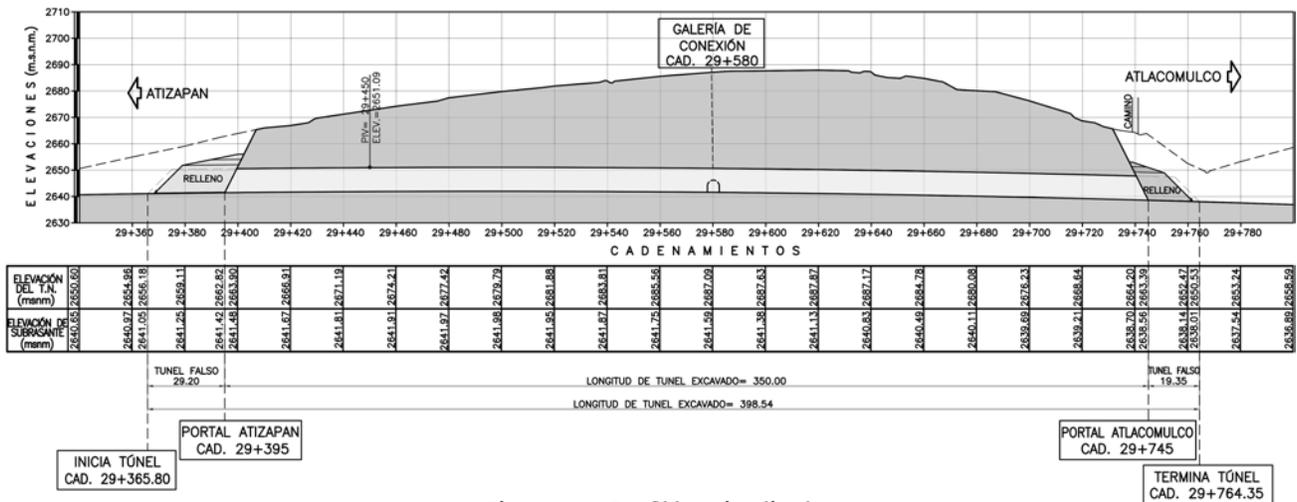


Figura 2.7. Perfil longitudinal.

El banco de nivel deberá numerarse con dos cifras, la primera cifra corresponderá al kilometraje cerrado inmediato posterior a donde se ubica el banco de nivel y la segunda cifra corresponderá al número de orden correspondiente del banco de nivel en ese kilómetro.

En canales, arroyos, ríos y embalses se registrará el N.A.M.E. (Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias) observado en campo.

2.3. SECCIÓN TRANSVERSAL

En el dimensionamiento de la sección transversal de un túnel de carretera entran en juego diversos factores: tipo de carretera, ancho necesario para la circulación de los vehículos, ancho de las banquetas, necesidades geométricas de las instalaciones y equipamientos, etc. Con base en lo anterior y de acuerdo con las Normas de Servicios Técnicos de Proyecto Geométrico (Ref. 5), es conveniente enunciar la clasificación de las carreteras de acuerdo a su Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA):

1. Tipo A
 - a) Tipo A2 para un TDPA de 3,000 a 5,000 vehículos
 - b) Tipo A4 para un TDPA de 5,000 a 20,000 vehículos
2. Tipo B para un TDPA de 1,500 a 3,000 vehículos
3. Tipo C para un TDPA de 500 a 1,500 vehículos
4. Tipo D para un TDPA de 100 a 500 vehículos
5. Tipo E para un TDPA hasta 100 vehículos

Además de las características de la carretera, el diseño de la geometría de la sección suele obedecer a aspectos propios del túnel como la geología, geotecnia, el procedimiento constructivo, etc.

Para la definición de las secciones geométricas que a continuación se presentan y que se pretende sirvan como guía para futuros proyectos de túneles de carretera en México, se toman en cuenta los tipos de carretera más comunes, en función de su TDPA y nivel de seguridad, que son las tipo A, B y C. En caso de que se requiera construir un túnel en carreteras tipo D o E, este podrá proyectarse utilizando los mismos criterios establecidos en este manual, pero adaptando la sección para cada caso en particular.

Nota:

Las dimensiones y otras características presentadas en este capítulo están basadas en la experiencia adquirida recientemente en México, durante la construcción de varios túneles, tomando en cuenta también las normas y manuales internacionales existentes, así como las Normas de Servicios Técnicos para Proyecto Geométrico de Carreteras y los criterios definidos en conjunto con la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

2.3.1. Gálidos horizontal y vertical

El gálibo vertical es la altura mínima permitida para que los vehículos circulen de manera segura en el interior del túnel. En México el gálibo vertical por norma es de 5.5 m. El gálibo horizontal estará en función del ancho de la corona, siendo conveniente dejar un espacio de por lo menos 25 cm con respecto a las banquetas del túnel para minimizar el riesgo de choque de las ruedas con estas estructuras (Figura 2.8).

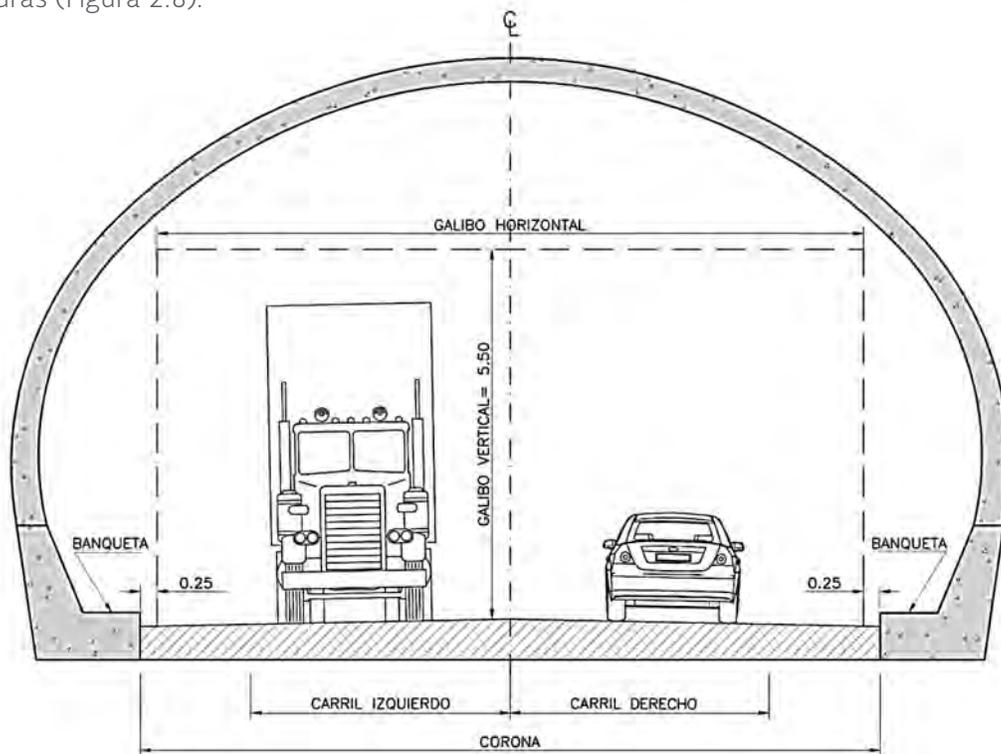


Figura 2.8. Gálidos vertical y horizontal.

Por su parte, el gálibo vertical siempre deberá medirse perpendicular a la calzada, independientemente de la sobreelevación que ésta adquiera durante las curvas.

2.3.2. Criterios generales para la configuración geométrica de la sección

La definición de la sección interior debe de cubrir todas las necesidades geométricas que, de acuerdo con el tipo de carretera que se trate, puedan presentarse en los recorridos en túnel. Dicha definición partirá siempre de la situación más desfavorable que corresponde con la sobreelevación y sobrancho máximos en los tramos curvos. Además, cuando una carretera incluye varios túneles, siempre será conveniente homologar una geometría para toda la obra, ya que esto permite proyectar sostenimientos-tipo, reutilizar cimbras y establecer criterios unificados para todas las instalaciones.

Entonces, a partir de las dimensiones máximas de calzada puede fijarse la posición de las banquetas, los gálidos y finalmente los arcos que conformarán la sección.

2.3.2.1. Evolución de la calzada en función del trazo y su influencia en la definición de la sección interior

Para que la pendiente transversal de la corona pueda evolucionar adecuadamente en las transiciones entre tangentes y curvas es necesario que la sección interior del túnel sea capaz de alojar en su totalidad a los gálibos sin importar la posición que adquieran.

La experiencia constructiva ha demostrado que, en todos sentidos, resulta mucho más eficiente mantener una sección única y constante de la bóveda, alineada con un eje vertical, que obligar a que ésta gire en función de la pendiente transversal que va adquiriendo la calzada a lo largo de una curva.

La técnica para lograr lo anterior consiste en hacer variar la altura de desplante de las zapatas, así como la distancia entre la esquina interior de la banqueta y la junta de construcción (o junta de colado), tomando como punto de referencia la rasante al centro del eje, para alcanzar la pendiente requerida, además de mantener constantes el ancho de corona y la altura del gálibo. Cabe hacer énfasis en que, cuando el túnel pase por una transición tangente-espiral-circular (o cualquier variante similar) no resulta práctico manejar una evolución del ancho de corona en el interior, ya que esto implicaría variaciones importantes en la geometría de la sección, con sus correspondientes complicaciones técnicas durante el colado del revestimiento. La Figura 2.9 muestra un ejemplo de evolución de la calzada en curva y la forma en que la parte baja del túnel se adapta a ésta. Nótese que la cota de la junta de construcción en las zapatas se mantiene constante.

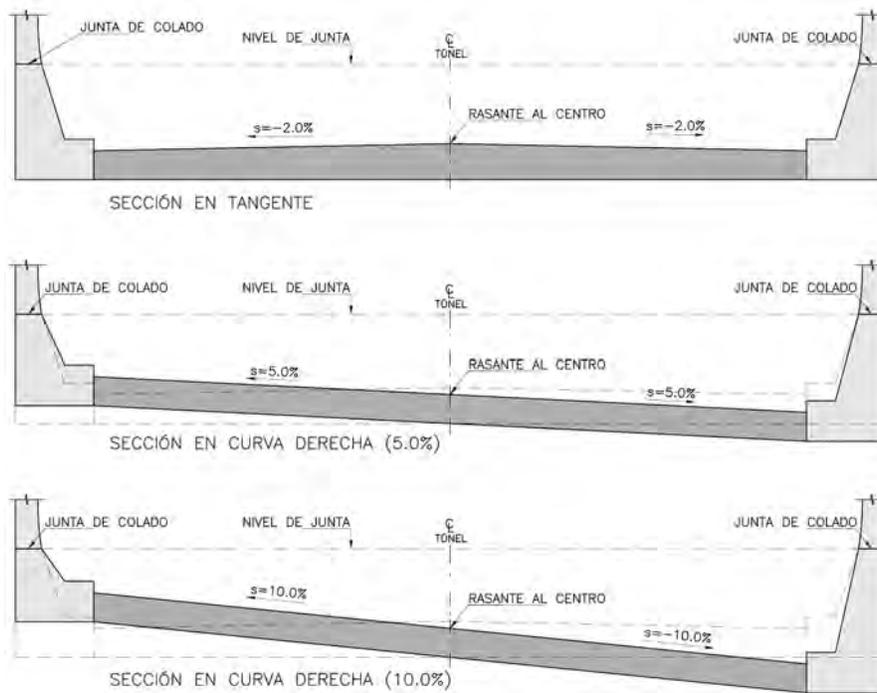


Figura 2.9. Evolución de la calzada (Pendiente transversal).

Las ventajas más importantes de adoptar esta técnica se listan a continuación:

- Se simplifica el control topográfico de las excavaciones durante la obra.
- Cuando se colocan marcos metálicos puede definirse una geometría única para la mayor parte de la sección, siendo solo necesario adaptar el tamaño de las patas en las zonas de transición.
- Se logra un ahorro importante en volumen de excavación y en materiales de relleno para el pavimento, ya que cuando se tiene un piso de excavación plano en un tramo en curva se requiere una cantidad importante de relleno para conformar la calzada.

- Cuando el túnel lleva revestimiento definitivo, el hecho de tener que girar la cimbra genera innumerables problemas de alineación, que también pueden causar un mal balance del peso del sistema que ocasione defectos en la forma de la estructura o en las juntas transversales de colado.
- Mantener las juntas de construcción entre zapatas y bóveda al mismo nivel siempre facilitará las labores de apoyo de la cimbra, de control topográfico de los colados y de unión estructural, en caso de que haya acero de refuerzo (Figura 2.10).

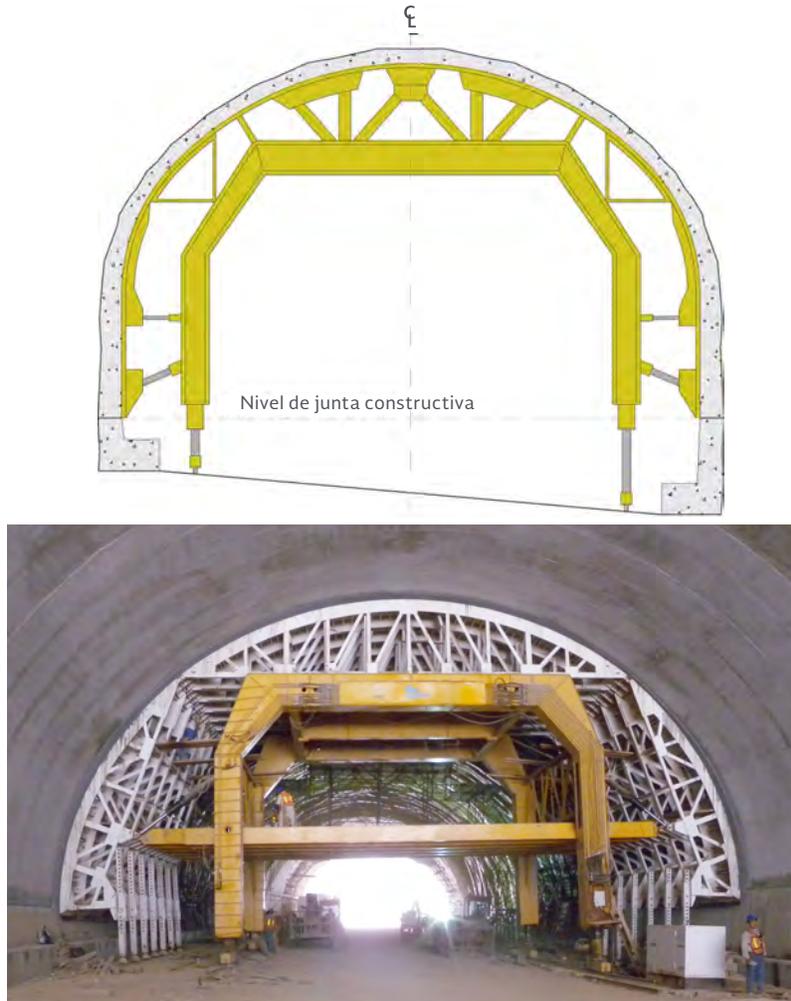


Figura 2.10. Esquema de una cimbra en calzada inclinada, manteniendo el nivel de la junta constructiva.

2.3.2.2. Definición del ancho de calzada

La calzada es la parte de la corona destinada al tránsito de los vehículos. El ancho de los carriles es de 3.50 m para todos los tipos de carretera: A2, A4 y A4S, B y C.

El número de carriles debe ser el mismo que en la carretera troncal, de acuerdo con el tipo de vía, la intensidad de tráfico y el nivel de servicio. Los túneles de carretera generalmente tienen dos carriles y en ciertas circunstancias tres. Si fueran necesarios cuatro carriles es preferible la opción de dos túneles paralelos de dos carriles cada uno, ya que las dificultades constructivas crecen debido al aumento del ancho de la excavación. Cabe hacer énfasis en que, si bien en México se han construido ya varios túneles de 4 carriles, esta situación siempre ha obedecido a condicionantes topográficas extremas.

2.3.2.3. Acotamientos

En cuanto a los acotamientos, en México los túneles de carretera se han construido sin considerar su inclusión como parte de la calzada. Lo anterior se debe a factores económicos y de seguridad durante la construcción. Es evidente que al aumentar el ancho de la calzada aumenta no sólo el ancho del túnel sino también su altura; en condiciones geotécnicas difíciles (las cuales casi siempre se presentan, al menos en algunos tramos del trazo), esto repercute en un incremento del riesgo geotécnico con su consecuente necesidad de robustecer los sistemas de sostenimiento.

El anterior criterio no es únicamente propio de México. Por ejemplo, en el apartado de “Secciones transversales en túneles” del Ministerio Federal de Tránsito, Construcción y Vivienda de la República Federal Alemana [Ref. 1], se establece que:

“La configuración normal en túneles unidireccionales debe ser una sección estándar reducida sin acotamientos”

Aunque, también dice que:

“... el empleo de acotamientos puede ser justificable bajo ciertas condiciones económicas y de tráfico; en estos casos, los aspectos económicos se refieren a la construcción y costos de operación resultado de la longitud de los túneles o de los costos resultado de congestiones o accidentes; en el proceso de toma de decisiones debe verificarse si la utilidad adicional que resulte de colocar acotamientos supera su costo. Usando los diagramas (disponibles en dicho documento) aplicables a este propósito, puede verse que la decisión de proveer a la calzada de acotamientos sólo puede justificarse bajo condiciones de construcción muy favorables”.

La Figura 2.11 muestra un ejemplo de sección transversal de acuerdo con la Normativa Europea.

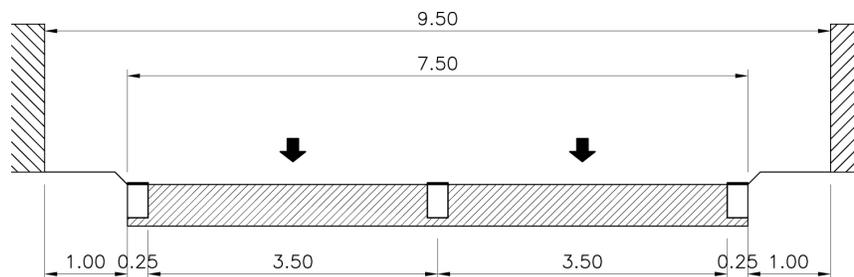


Figura 2.11. Sección 26-t (sección estándar reducida sin acotamientos) de acuerdo con la Normativa Europea.

Por su parte, en el Manual Técnico de Diseño y Construcción de Túneles de U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration [Ref. 4], de los Estados Unidos puede leerse que:

“En cuanto al gálibo, La 5ª edición del *Libro Verde* de la AASHTO dice que, aunque sería deseable mantener los acotamientos con los mismos anchos que en la calzada a cielo abierto, también reconoce que *el costo de proveer al túnel de acotamientos puede ser prohibitivo; la reducción de los acotamientos en túneles es una práctica habitual; en ciertas situaciones, se colocan acotamientos estrechos en uno o los dos lados*”.

El Libro Verde también recomienda que, en caso de colocarlos, su ancho debe establecerse a partir de un análisis profundo de todos los aspectos involucrados:

“cuando por consideraciones económicas o de factibilidad constructiva no resulta realista proveer al túnel de acotamientos, para ayudar en situaciones de congestión o vehículos descompuestos, en túneles largos, es recomendable construir bahías de emergencia”.

En el caso de Noruega, de acuerdo con el Manual de Túneles de Carretera de la Administración Noruega de Carreteras Públicas [Ref. 2], las categorías de túneles, en función del TDPA, se definen mediante la siguiente figura.

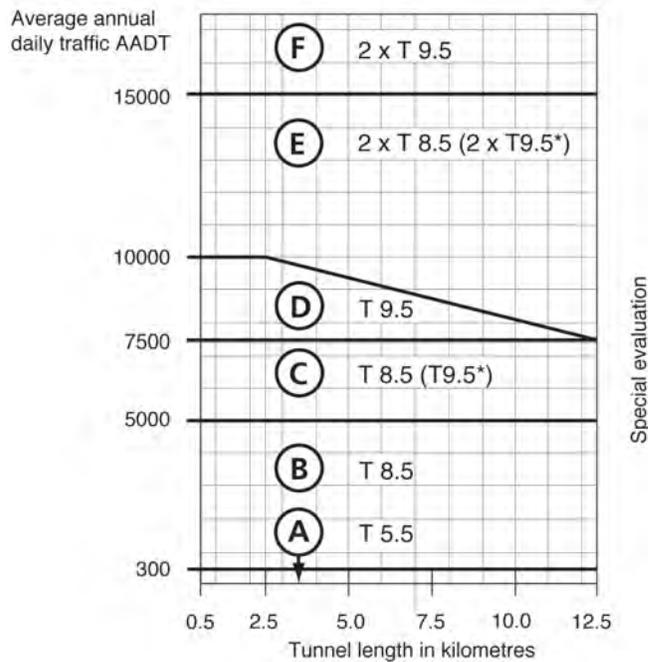


Figure 4.1 Tunnel categories. T9.5* applies to trunk road network

Figura 2.12. Categorías de Túneles de acuerdo con la Administración Noruega de Carreteras.

Para un caso típico de autopista en México, con un TDPA de 20,000 vehículos, en la Figura 2.12 se catalogaría como **F**. La nomenclatura 2xT9.5 de la Figura 2.12 quiere decir 2 tubos de 9.5 m de ancho total de la base del túnel (BT), de acuerdo con las dimensiones que se indican en la Figura 2.13. En la tabla de la Figura 2.14 se muestra el resto de las dimensiones y en rojo se marca la del caso equivalente al del TDPA de 20,000. En dicha tabla puede verse además que, para túneles T9.5, el ancho de la superficie de rodadura es de 7.0 m.

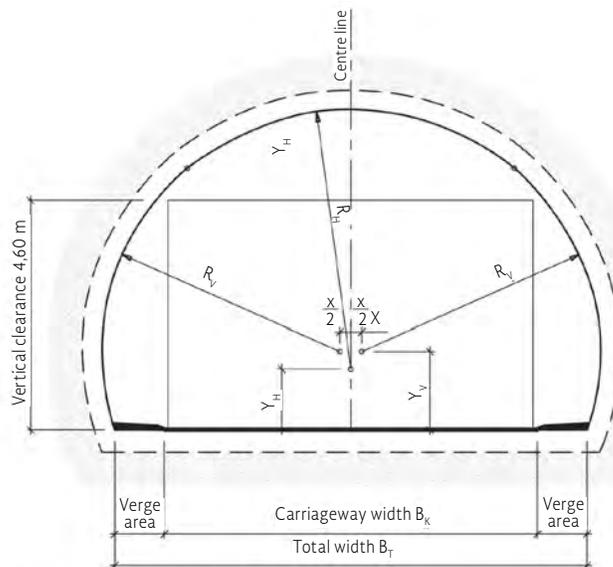


Figure 4.11 Geometric measurements for tunnel cross-sections categories T9.5 - T12.5 (measurements are given in Table 4.1).

Figura 2.13. Nomenclatura geométrica de acuerdo con la Administración Noruega de Carreteras

En túneles de dos y tres carriles cuya longitud es menor a 500 m, no es muy frecuente el paso de peatones por las banquetas y el uso de éstas se limita a los usuarios de vehículos averiados y a los empleados de mantenimiento. Por ello se considera un ancho de banqueta de 50 cm.

En el caso de túneles mayores a 500 m de longitud, sí se considera una circulación más frecuente de peatones; por un lado, al tener más equipamiento, requieren de un mayor número de operaciones de mantenimiento y por el otro, hay más usuarios que transitan hacia salidas de emergencia, bahías, nichos o aparcaderos; por lo anterior estas secciones consideran banquetas de 85 cm de ancho.

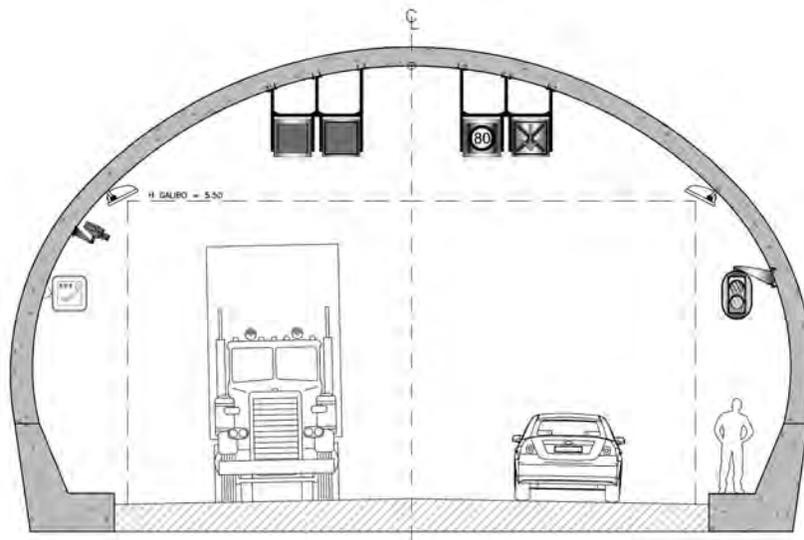


Figura 2.16. Sección de túnel con banqueta para tránsito peatonal.

2.3.3. Sección geométrica para túneles en carreteras Tipo A2

2.3.3.1. Túneles de longitud menor a 500 m

La geometría de la sección propuesta para este tipo de carretera se define considerando la situación más desfavorable que corresponde a un grado de curvatura de $17^{\circ}00'$, con sobreelevación máxima de 10% y una ampliación de la calzada y la corona que, para una velocidad de proyecto de 50 km/h, es de 1.3 m.

La sección propuesta está diseñada para funcionar en sentido bidireccional, con 2 carriles de 3.5 m cada uno en una primera etapa y si el TDPA aumenta; puede funcionar con 3 carriles de 3.5 m cada uno.

Al tratarse de túneles que pueden funcionar en sentido bidireccional, la ampliación de la calzada y la corona se repartirá entre los sentidos de circulación ($a/2$) ubicando la ampliación en el lado interior de la curva del alineamiento horizontal.

Siempre será importante mantener constantes tanto el ancho de corona como el gálibo. Para esto, la sección interior debe ser simétrica hasta la junta de colado de las zapatas del revestimiento definitivo conservando un espacio libre de corona de 12.30 m y un gálibo de 5.50 m.

En las Figuras 2.17 y 2.18, se muestra una sección transversal cuya línea de intradós está compuesta por tres arcos: uno central de 8.30 m de radio y 96.00° de apertura y dos laterales de 4.26 m de radio y 60.16° de apertura. La parte inferior de los hastiales consiste en segmentos rectos de longitud variable que van desde la junta de colado hasta una banqueta de 50 cm de ancho.

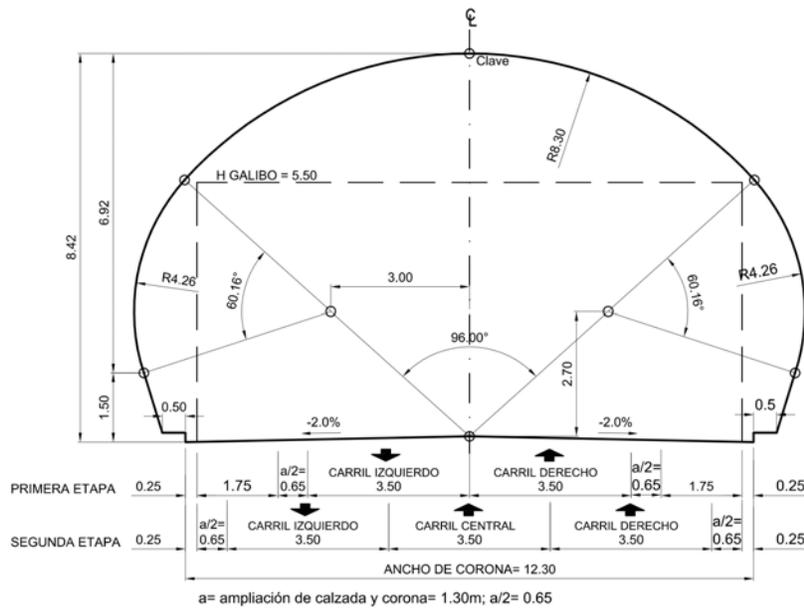


Figura 2.17. Sección tipo en tangente para túnel de sentido bidireccional en carreteras Tipo A2 con longitud menor a 500 m. Línea de intradós.

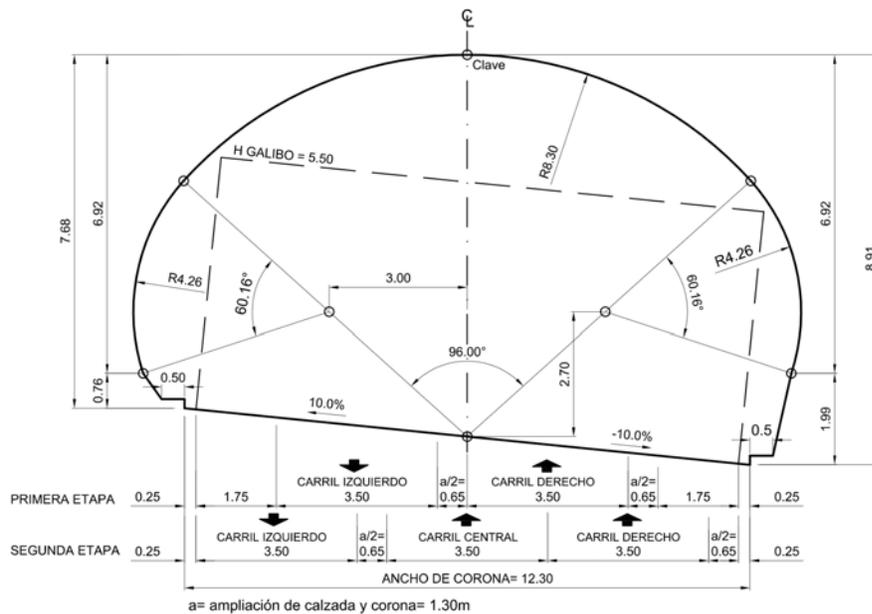


Figura 2.18. Sección tipo en curva máxima para túneles de sentido bidireccional en carreteras Tipo A2 con longitud menor a 500 m. Línea de intradós.

2.3.3.2. Túneles de longitud mayor a 500 m

Para este tipo de carreteras la geometría del túnel es muy similar a la de túneles con longitud menor a 500 m; con la diferencia que, al requerir más operaciones de mantenimiento, contempla una banqueta de 85 cm de ancho.

En la Figura 2.19 se muestra una sección, simétrica hasta la junta de colado en el remate de las zapatas, que contiene un espacio libre de corona de 12.30 m y un galibo de 5.50 m, misma que

mantiene constantes los arcos de la bóveda y las paredes en los tramos de tangente y curva (Figura 2.20).

La sección transversal, en su línea de intradós está compuesta por tres arcos, uno central de 8.30 m de radio y 96.00° de apertura y dos laterales de 5.05 m de radio y 51.13° de apertura. La parte inferior de los hastiales consiste en segmentos rectos de longitud variable que van desde la junta de colado hasta la banqueta que tiene un ancho de 85 cm.

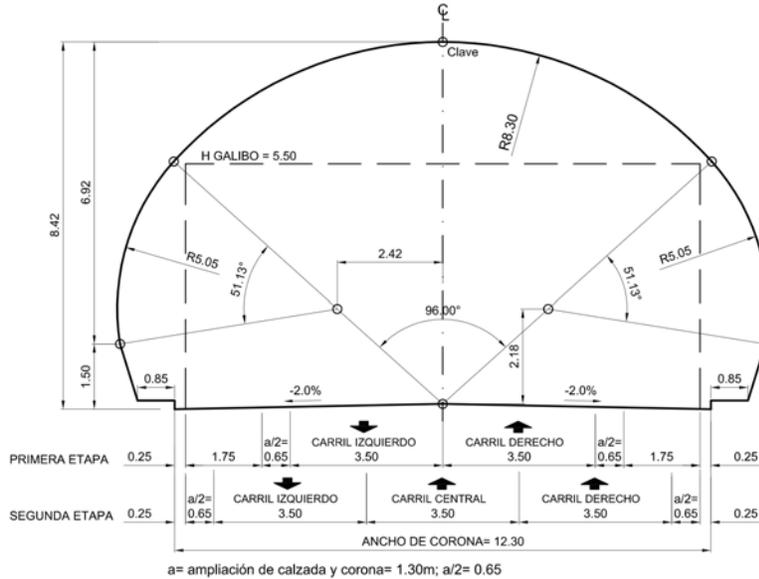


Figura 2.19. Sección tipo en tangente para túneles carreteras de sentido bidireccional Tipo A2 con longitud mayor a 500m. Línea de intradós.

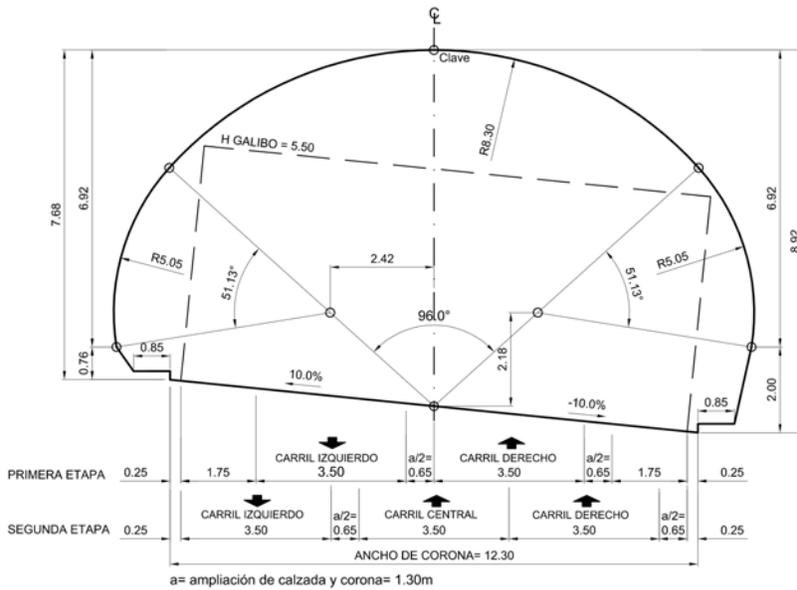


Figura 2.20. Sección tipo en curva máxima para túneles carreteras Tipo A2 con longitud mayor a 500 m. Línea de intradós.

2.3.4. Sección geométrica para túneles en carretera Tipo A4

Debido a la complejidad técnica y los riesgos que conlleva la excavación de túneles de gran claro (ancho mayor a 20 m) no es recomendable proyectar secciones de 4 carriles. Siempre será más

2.3.5. Sección geométrica para túneles en carretera Tipo A4 S

Para este tipo de carreteras se diseñan túneles gemelos unidireccionales de 2 o 3 carriles cada uno. Debido a que el área interior es considerablemente menor pueden construirse con más seguridad que una sección de 4 carriles. Esta tipología es la más adecuada para túneles de gran longitud, siempre y cuando se mantengan las medidas de seguridad establecidas para cada caso en específico.

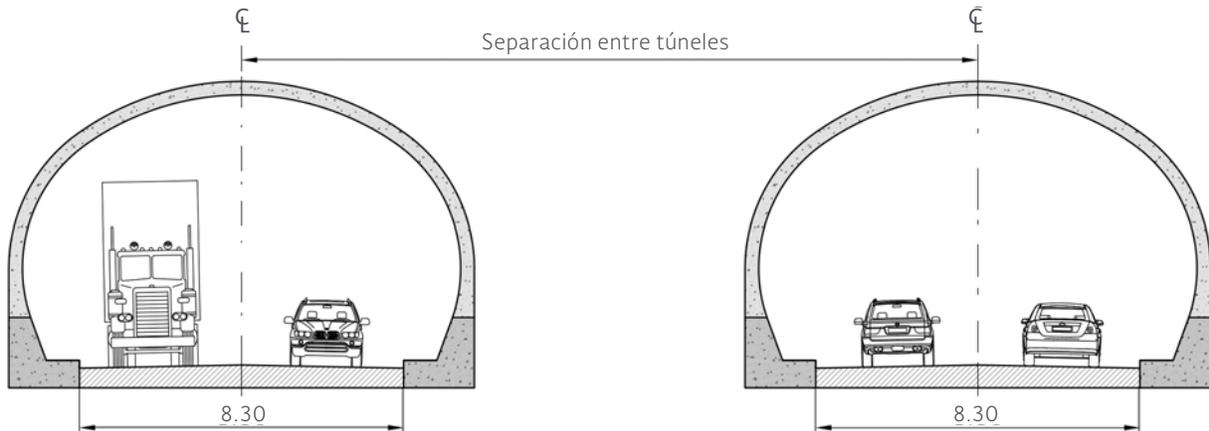


Figura 2.23. Túneles gemelos para una carretera Tipo A4 S.

Es muy común que, para resolver la operación bidireccional de las carreteras, sin caer en secciones muy grandes o de cuatro carriles, se opte por construir túneles gemelos, para 2 o 3 carriles cada uno, espaciados centro a centro una distancia tal que impida las interferencias en su construcción y que evite que una excavación influya en el comportamiento deformacional de la otra. Existen recomendaciones como la de espaciar los túneles gemelos un mínimo de 2 diámetros, pero muchas veces la topografía impone condicionantes que acaban por definir esta separación. De cualquier forma, la definición de la distancia entre túneles debe venir acompañada por un previo análisis geotécnico que además contemple los procedimientos constructivos.

2.3.5.1. Túneles de longitud menor a 500 m

La geometría de la sección propuesta para este tipo de carretera se define considerando la situación más desfavorable que corresponde a un grado de curvatura de $7^{\circ}30'$, con sobreelevación máxima de 10% y una ampliación de la calzada y la corona que, para una velocidad de proyecto de 70 km/h, es de 0.80 m. Al tratarse de túneles que funcionan en sentido unidireccional, la ampliación de la calzada y la corona se ubicará en el lado interior de la curva del alineamiento horizontal.

La sección de cada túnel es simétrica hasta la junta de colado en el remate de las zapatas, con un espacio libre de corona de 8.3 m y un gálibo de 5.50 m; los arcos de la bóveda son constantes, así como las paredes en los tramos de tangente y curva.

En la Figura 2.24 se muestra una sección transversal cuya línea de intradós está compuesta por tres arcos, uno central de 6.90 m de radio y 60.00° de apertura y dos laterales de 3.90 m de radio y 80.68° de apertura. La parte inferior de los hastiales consiste en segmentos rectos de longitud variable que van desde la junta de colado hasta la banquetta que tiene un ancho de 50 cm. La Figura 2.25 muestra la sección en curva.

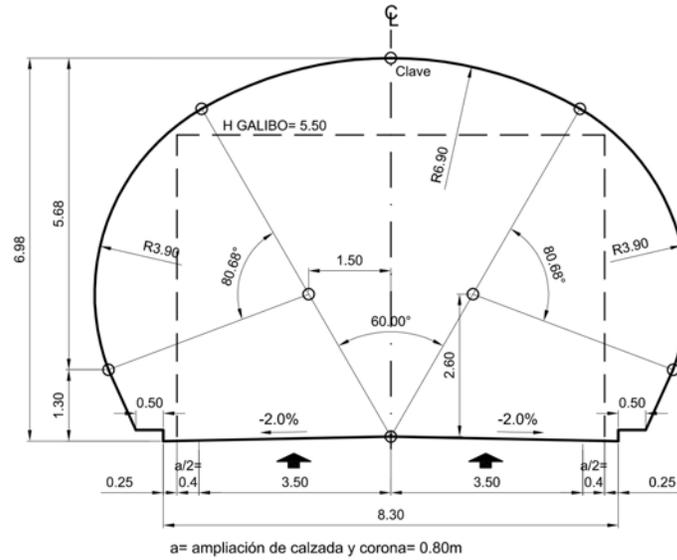


Figura 2.24. Sección tipo en tangente para túnel de longitud menor a 500 m, de sentido unidireccional, con 2 carriles en carreteras Tipo A4 S.

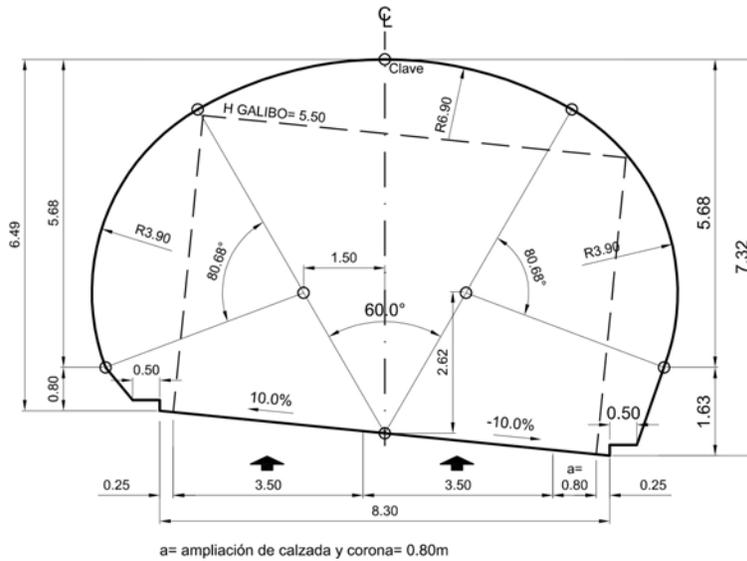


Figura 2.25. Sección tipo en curva para túnel de longitud menor a 500 m, de sentido unidireccional, con 2 carriles en carreteras Tipo A4 S.

2.3.5.2. Túneles de longitud mayor a 500 m

Por su longitud, al requerir más operaciones de mantenimiento, la geometría propuesta, contempla una banqueteta de 85 cm de ancho. En la Figura 2.26 se muestra una sección simétrica hasta la junta de colado, en el remate de la zapatas, que contiene un espacio libre de corona de 8.30 m y un gálibo de 5.50 m. La Figura 2.27 muestra la sección en curva.

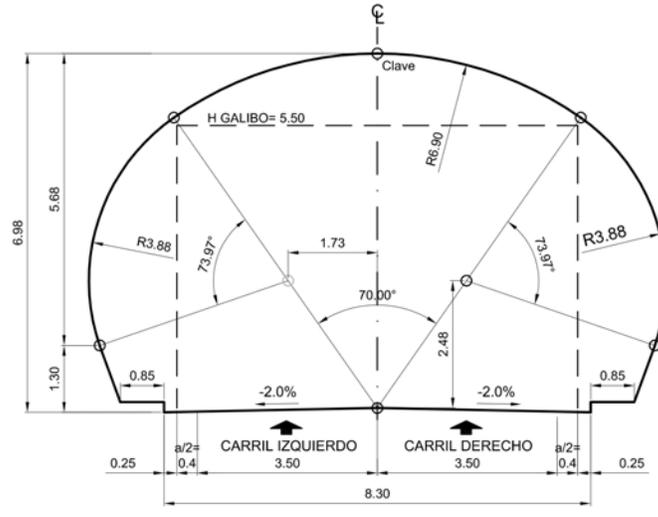


Figura 2.26. Sección tipo en tangente para túnel de longitud mayor 500 m, de sentido unidireccional, con 2 carriles en carreteras tipo A4 S.

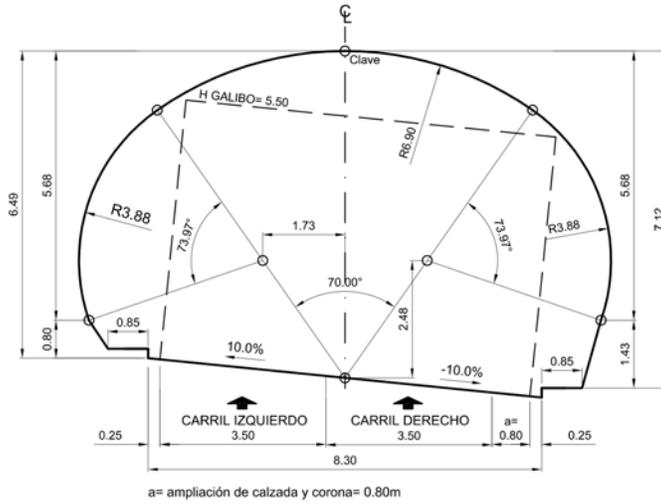


Figura 2.27. Sección tipo en curva para túnel de longitud mayor a 500 m, de sentido unidireccional, con 2 carriles en carreteras tipo A4 S.



Figura 2.28. Carretera Tipo A2 de sentido bidireccional en operación.



Figura 2.29. Carretera Durango-Mazatlán en operación.

2.3.6. Sección tipo en túneles con contrabóveda

En casos en los que, por las condiciones geotécnicas, sea necesario el diseño de una sección con contrabóveda, podrán respetarse las secciones anteriormente expuestas y definir la geometría, refuerzo, espesor etc. de la contrabóveda para cada proyecto en particular.

2.3.7. Zapatas del revestimiento y juntas de construcción

Para el diseño de las zapatas se tomará en cuenta el espesor de pavimento y del revestimiento definitivo que den como resultado los análisis realizados durante la elaboración del proyecto.

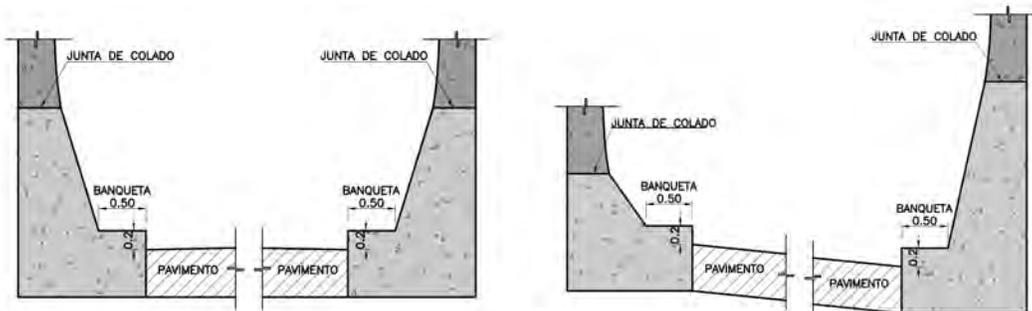
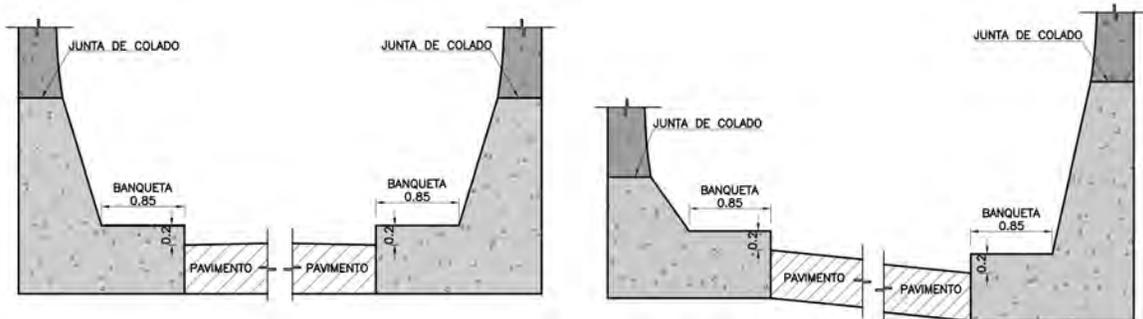


Figura 2.30. Sección tipo de banqueta en túneles con longitud < 500m (tangente y curva máxima).



Figuras 2.31. Sección tipo de banqueta en túneles con longitud > 500m (tangente y curva máxima).

2.3.8. Faja separadora central

La faja separadora central deberá proyectarse únicamente en carreteras Tipo A4.

Las barreras centrales son dispositivos de seguridad que se emplean para dividir los carriles de circulación contraria y su objetivo es incrementar la seguridad de los usuarios al prevenir que los vehículos invadan los carriles inversos. También pueden servir para disipar la energía del impacto en casos de accidente. Normalmente son prefabricadas, de concreto simple o reforzado y también existen las metálicas; en todos los casos deberán cumplir la normativa SCT N-CTR-CAR-1-07-009 y 010.

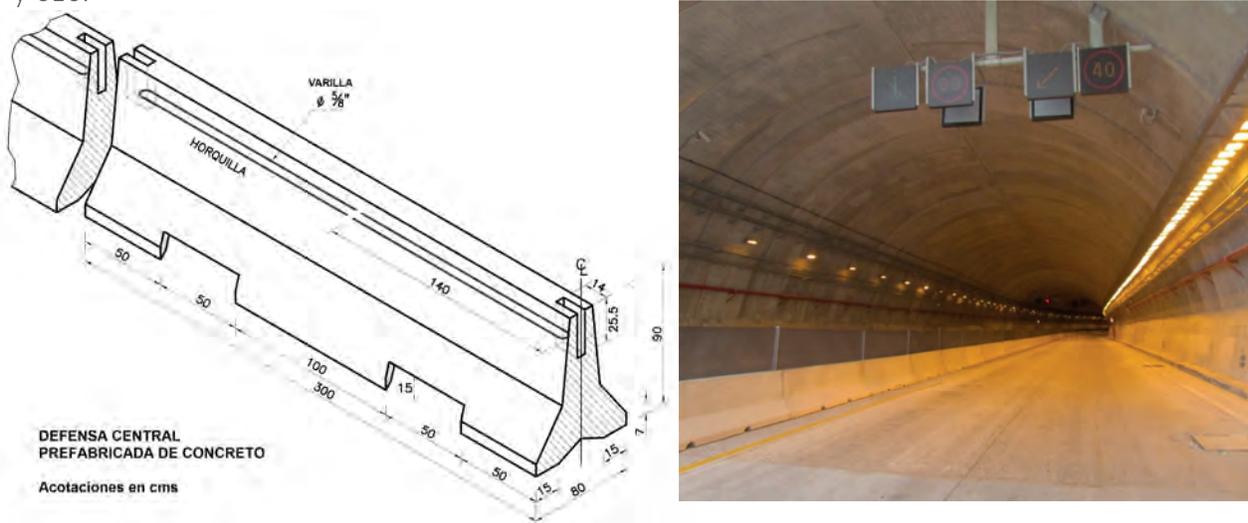


Figura 2.32. Barra central de concreto. Túnel Baluarte, Carretera Durango-Mazatlán.

2.3.9. Área para instalaciones

Al dimensionar la sección del túnel, se debe tener en cuenta la ubicación de las instalaciones. De éstas, la que tiene mayor influencia es la ventilación. Si se trata de ventilación longitudinal debe dejarse un espacio suficiente en la bóveda para los equipos, teniendo en cuenta que su diámetro puede alcanzar los 1.5 m.

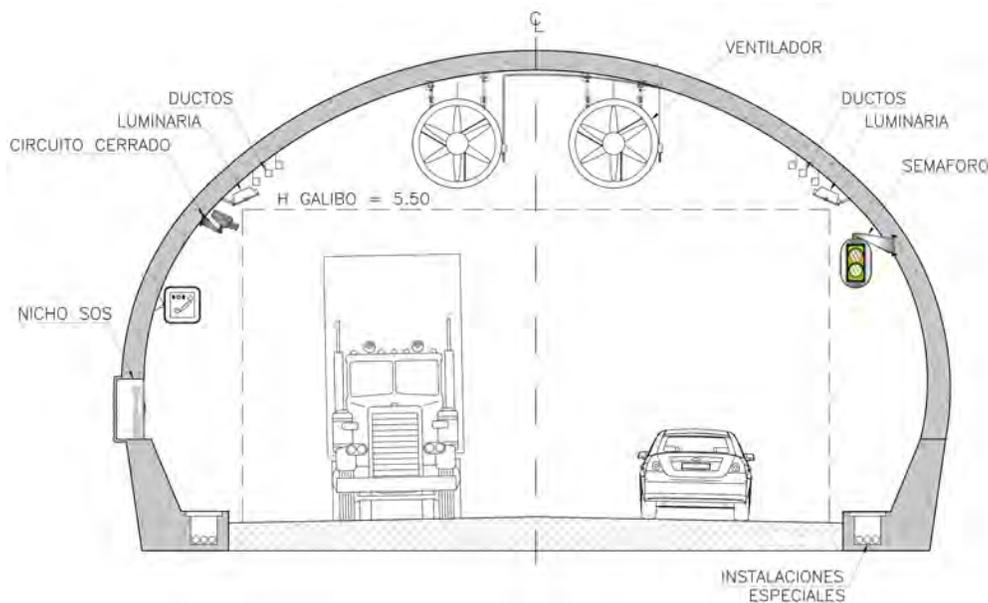


Figura 2.33. Sección de túnel con instalaciones.

La iluminación no requiere demasiado espacio aunque es conveniente colocarla por encima de la altura de gálibo y obedece a un diseño específico. La señalización vertical suele ubicarse sobre las aceras o por fuera del gálibo. Por otra parte, las canalizaciones para cables y otras instalaciones se suelen colocar bajo las banquetas o adheridas al hastial en bandejas porta-cables.

2.3.10. Bahías de emergencia

La parada accidental, por avería o choque de un vehículo en el interior de un túnel, puede producir una perturbación importante en el tráfico o un accidente grave. Tomando en cuenta algunas experiencias y la normativa internacional, en túneles de longitud mayor a 1000 m es necesario diseñar bahías de emergencia que permitan alojar vehículos averiados o con algún otro tipo de incidencia. Dichas bahías pueden hacerse coincidir con las galerías de conexión vehiculares, siempre y cuando éstas tengan libre acceso al túnel en caso de emergencia. Las bahías de emergencia se sugiere sean de una longitud efectiva de 50 m, de 3.5 m de carril y espaciadas en distancias no mayores a 800 m por sentido de circulación; se diseñan alternadas para evitar construir una enfrente de otra.

En las siguientes figuras se muestran las dimensiones recomendadas para las bahías de emergencia.

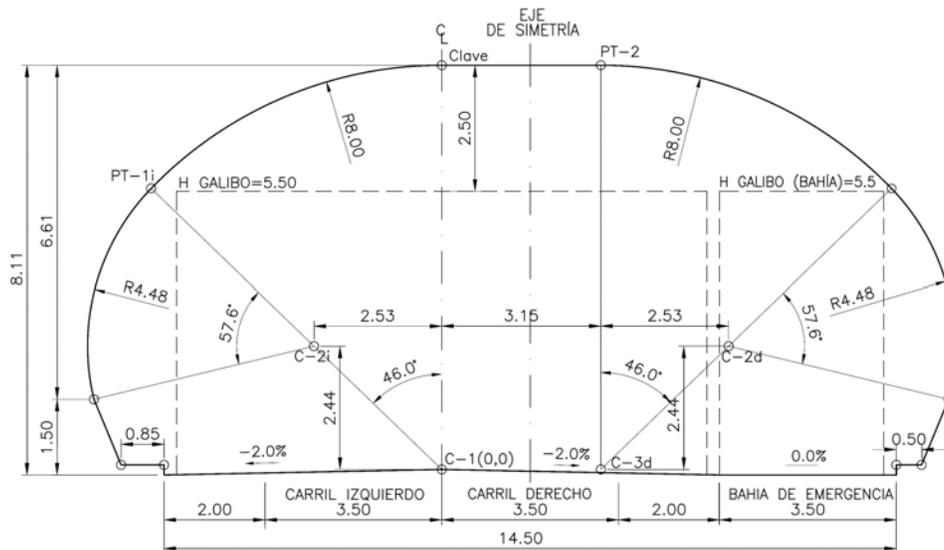


Figura 2.34. Sección tipo de bahía de emergencia derecha a línea de intradós.

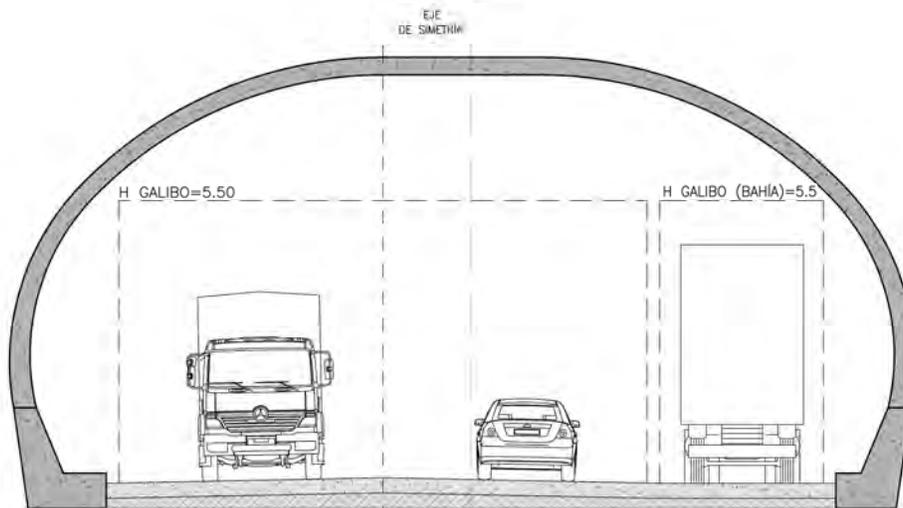


Figura 2.35. Sección tipo de túnel con bahía de emergencia.

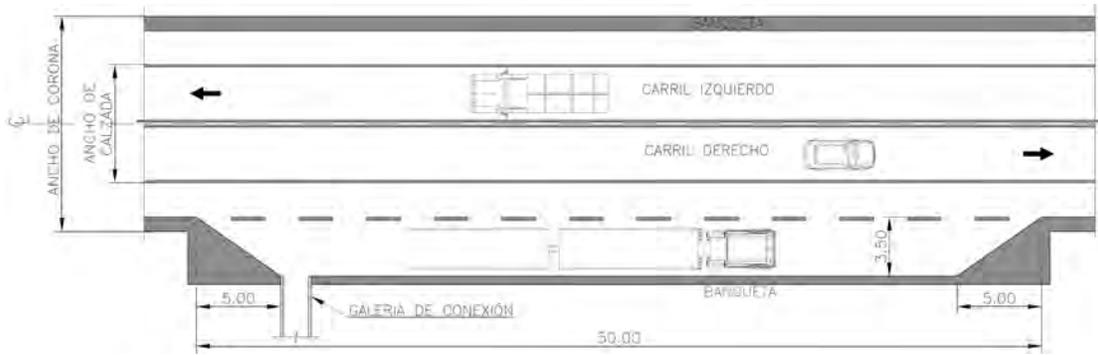


Figura 2.36. Sección tipo de túnel con bahía de emergencia.

2.3.10.1. Criterios generales para la ubicación de bahías de emergencia

La cantidad, distribución y separación de las bahías de emergencia dependerá de la longitud del túnel, de su condición unidireccional o bidireccional y de las necesidades particulares de cada proyecto. Se deberán tomar en cuenta los siguientes criterios para asegurar la funcionalidad de las bahías así como su construcción:

- Las primeras bahías de emergencia deberán ubicarse a partir de 400 m de distancia desde los portales.
- En el caso de túneles que requieran una sola bahía de emergencia, ésta se ubicará al centro del túnel; sí el túnel es bidireccional, no se diseñaran dos bahías en el mismo cadenamiento ya que la sección de excavación sería demasiado grande.
- Las bahías de emergencia que se encuentren en diferentes sentidos de circulación, deberán tener una separación entre ellas de al menos 100 m.
- Las bahías podrán ubicarse en los lugares donde existan salidas de emergencia (galerías de conexión), siempre y cuando estas tengan libre acceso al túnel, sin que un vehículo descompuesto obstruya el paso de los vehículos de emergencia o la salida de personas.

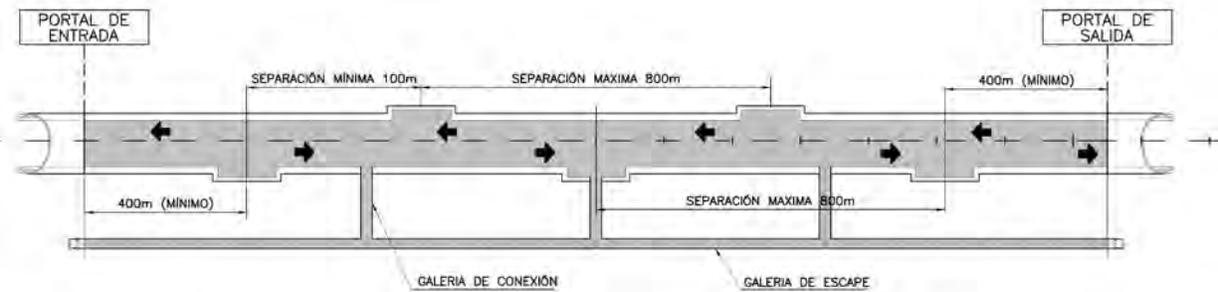


Figura 2.37. Distribución de Bahías de emergencia, túnel bidireccional.



Figura 2.38. Bahía de emergencia y galería de conexión, túnel El Sinaloense.

2.3.11. Túneles de escape o de emergencia

En túneles de longitud mayor a 1500 m que no tengan contemplado un túnel paralelo (túnel gemelo) es necesario proyectar un túnel de escape o de emergencia paralelo al túnel de diseño. Las dimensiones de este túnel o galería de escape deberán ser suficientes para permitir el paso de los vehículos de emergencia; además de contar con galerías de conexión las cuales pueden hacerse coincidir con las bahías de emergencia.

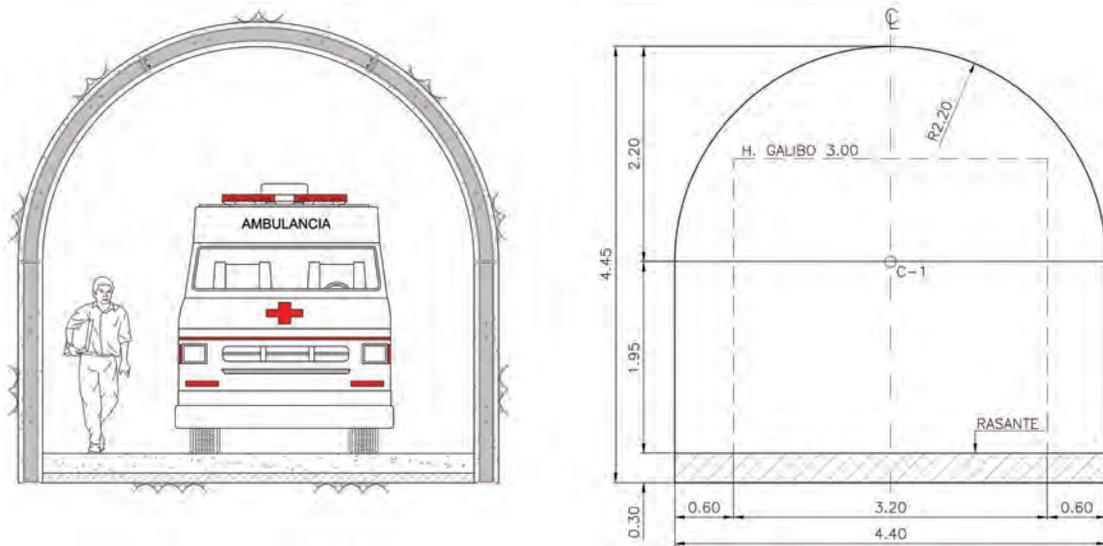


Figura 2.39. Sección geométrica y conceptual de túnel de escape (Galería).

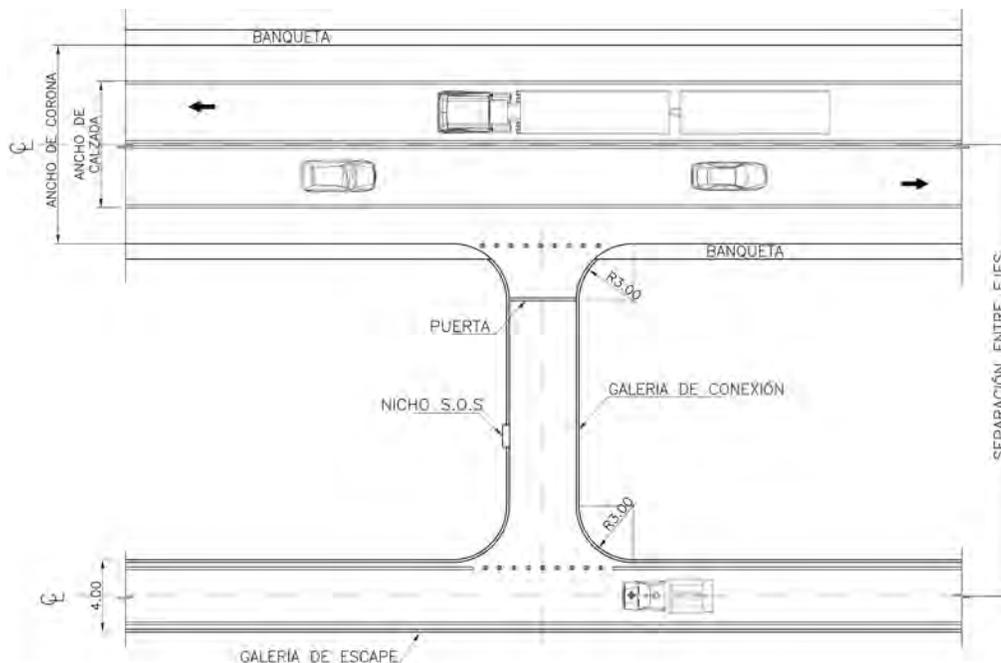


Figura 2.40. Planta de túnel de escape (Galería).



Figura 2.41. Túnel de escape (Galería) del túnel El Sinaloense.

2.3.12. Galerías de conexión

En túneles gemelos y en túneles con galería de escape será necesario proyectar galerías de conexión con la finalidad de dar acceso a los vehículos de emergencia o para evacuar personas de manera rápida y eficiente. Las galerías de conexión se diseñarán a una distancia no mayor a los 400m; en caso de túneles gemelos de menos de 500 m de longitud se proyectará al menos una galería de conexión a la mitad del túnel.

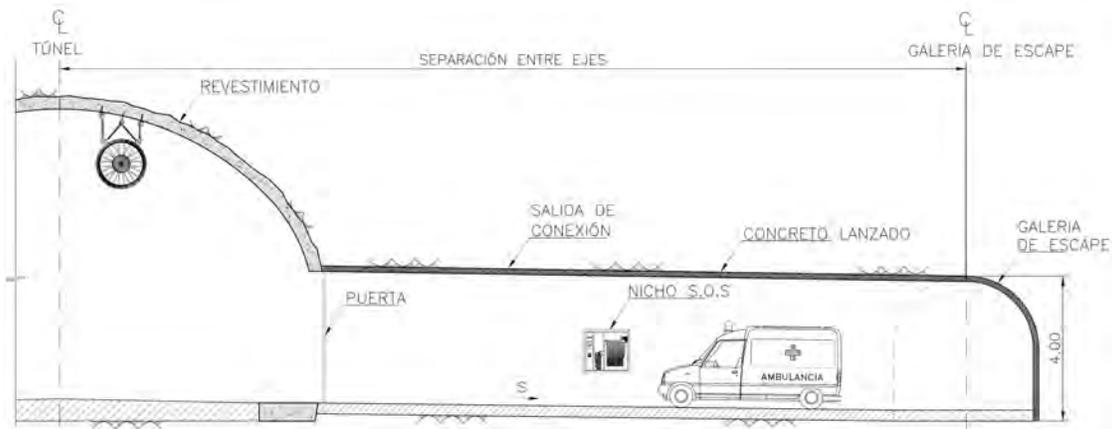


Figura 2.42. Sección tipo de galería de conexión en túnel con galería de escape.



Figura 2.43. Galería de conexión del túnel El Sinaloense.

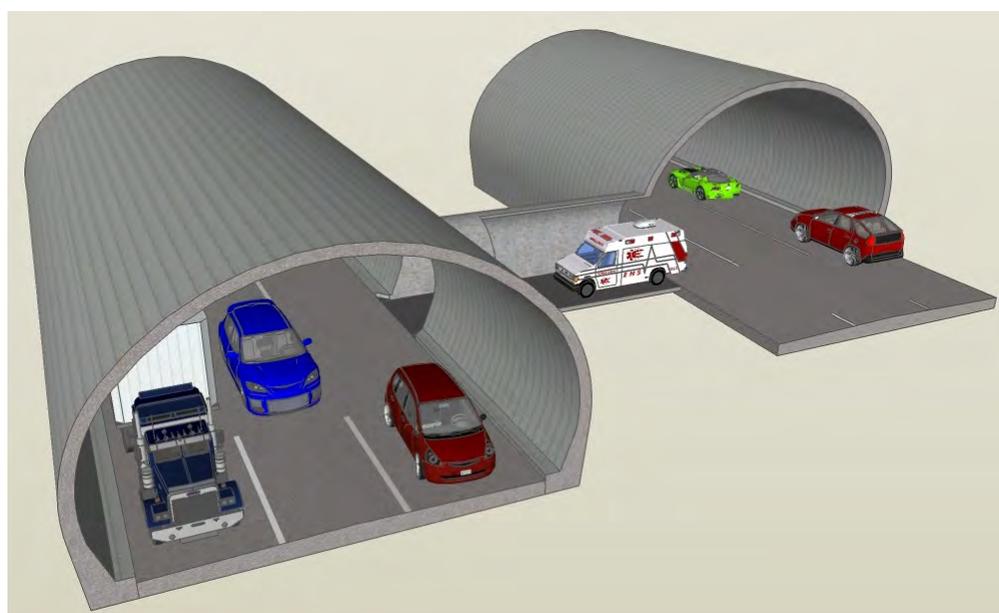


Figura 2.44. Isométrico de galería de conexión para túneles gemelos.

REFERENCIAS

- 1 Brilon, W, Lemke, K, año 2000, Strassenquerschnitte in Tunneln, serie Strassenverkehrstechnik, Volumen 44, ISSN: 0039-2219.
- 2 <http://www.hotandcoolrides.com/wp-content/uploads/2013/03/forest-beautiful-roads-incredibly-spectacular-landscape.jpg>
- 3 Mott MacDonald. <https://www.mottmac.com/transport/highways>.
- 4 Norwegian Public Roads Administration, 2004; Road Tunnels, No. 021 in the series of handbooks, Printed by: NPRA Printing Center, ISBN 82-7207-540-7
- 5 Sánchez, F. (2014): Ingeniería de Túneles; Reg. # 03-2015-012110003000-1, SEP-INDAUTOR.
- 6 U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, 2009, Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements. Publication No. FHWA-NHI-09-010
- 7 Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Libro 2. Normas de Servicios Técnicos. Parte 2.01. Proyecto Geométrico de Carreteras, 1984.
- 8 Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras, 1991.

