

XVI CONGRESO ARGENTINO DE VIALIDAD Y TRÁNSITO

CARATULA

TÍTULO DEL TRABAJO: Análisis comparativo de normas de diseño geométrico para túneles viales en distintos países y recomendaciones para su aplicación en la Argentina en base al Proyecto Nodo Retiro

NOMBRE Y APELLIDO DE LOS AUTORES: Ing. Bruno Agosta e Ing. Franco P. Di Biase

DIRECCIÓN POSTAL COMPLETA: Maipú 471, piso 2. Ciudad Autónoma de Buenos Aires (C1006ACC), Argentina

NÚMERO DE TELÉFONO / FAX: + 54 11 4393 1767

DIRECCIÓN DE CORREO ELECTRÓNICO: bagosta@acya.com.ar / fdibiase@acya.com.ar

NÚMERO APROBACIÓN RESUMEN: 20216-RES

XVI CONGRESO ARGENTINO DE VIALIDAD Y TRÁNSITO

Análisis comparativo de normas de diseño geométrico para túneles viales en distintos países y recomendaciones para su aplicación en la Argentina en base al Proyecto Nodo Retiro

Autores: Ing. Bruno Agosta e Ing. Franco P. Di Biase

AC&A SA – Firma asociada a la Cámara Argentina de Consultoras de Ingeniería (CADECI)

Trabajo

Introducción

Las condiciones de operación de vehículos en túneles viales implica utilizar parámetro de diseño geométrico especiales, que muchas veces exceden las normas de diseño convencionales buscando garantizar a los usuarios un recorrido seguro y un eficiente diseño de la infraestructura. En esta línea, este trabajo tiene por objeto un estudio comparativo entre normas de diseño locales e internacionales y la formulación de recomendaciones específicas surgidas a partir del Proyecto Nodo Retiro, que incluyó el diseño de un túnel vial de aproximadamente 1.000 metros de longitud, en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, que incluyeron la utilización de distintas técnicas constructivas: Cut&Cover, Caverna y en Trincheras, y del que se incluirán las principales conclusiones en el presente trabajo.

Análisis de Normativas y Recomendaciones

El proceso de análisis comenzó con la recopilación de normativa y antecedentes de proyectos similares en el país, iniciando con las Normas de Diseño Geométrico de Carreteras de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) vigente que datan del año 1980 y a su vez la normas “DNV Normas y Recomendaciones de Diseño Geométrico y Seguridad Vial 2010” que se encuentran en proceso de evaluación, como elemento complementario. En esta etapa del trabajo, se identificó que la normativa nacional no hace referencia específica al diseño de túneles viales, sino que describe en forma general las condiciones que debería tener su perfil transversal en autopistas. Textualmente la norma se refiere a túneles diciendo: *“Desde el punto de vista del servicio de tránsito los túneles no difieren materialmente de las estructuras de separación de niveles. Esencialmente se aplican las mismas normas para el diseño geométrico, excepto que normalmente se usan los valores mínimos debido al alto costo de construcción de los túneles y a las restricciones que impone el escaso ancho de la zona de camino”*. DNV 2010. Cap 4 Autopistas. Sección 4.9.3 Túneles. Pag 4.43

No teniendo entonces normativas específicas vinculadas a este diseño particular, se procedió a analizar normativas internacionales que pudieran aplicarse al diseño de túneles viales urbanos.

Se cree que esta falta de normativa específica se debe fundamentalmente a que este tipo de obras y en especial túneles urbano de longitudes medias o con bajas velocidades de diseño, son poco comunes en la Argentina.

Se estudiaron entonces las recomendaciones norteamericanas de AASHTO que están comprendidas en dos publicaciones: AASHTO 2004 – Green Book. Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 5th Edition (Libro Verde) y AASHTO 2010 – Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements (TMDCRT). La primera es la normativa general para el diseño de caminos, mientras que la segunda describe todos los elementos a tener en consideración en el diseño y construcción de túneles viales.

En el TMDCRT (Sección 2.2.2 Pág. 2-3) se describe que: “*Las curvas horizontales y verticales deberán satisfacer los requerimientos geométricos establecidos en el Libro Verde (AASHTO, 2004)*”, en los que los lineamientos para el cálculo de curvas horizontales y verticales se establecen en forma genérica para las distintas categorías de caminos sin distinguir si son superficiales o subterráneos.

Estas normas también incluyen los conceptos de optimización de los costos de construcción y mantenimiento de la infraestructura, permitiendo entonces adoptar valores mínimos que cumplan con las condiciones de seguridad necesarias.

En la búsqueda de parámetros específicos de diseño en túneles no mencionados en las normas anteriormente descritas, se buscaron mayores definiciones en normativas de países con más experiencia en este tipo de obras, analizando entonces los casos de Chile y España.

En el caso chileno, se estudió el “Manual de Carreteras. Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño.”, puntualmente el “Capítulo 3.800. Túneles.” realizado por la Dirección de Vialidad, Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas. Chile. Versión Junio 2002. Esta normativa presenta componentes para el diseño y construcción de túneles viales, profundizando fundamentalmente los estudios de ingeniería básica, diseño estructural y de las instalaciones electromecánicas de control y seguridad. En cuanto al diseño geométrico, existen apartados relacionados al diseño planialtimétrico y a la sección transversal a adoptar, sin embargo no contienen parámetros específicos sino que mencionan conceptos generales y algunos valores recomendados.

En cambio, analizando la normativa española “Trazado: Instrucción de Carreteras – Norma 3.1-IC. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Gobierno de España. 2011.”, aún si globalmente los apartados vinculados a túneles contienen menor cantidad de información, apunta directamente a dar valores específicos para el diseño geométrico de los túneles, y en algunos casos clasificando los mismos en función de las categorías, características y velocidad de diseño. Estos parámetros fueron muy útiles para el proyecto en cuestión y fue lo incorporado en el proyecto, por las razones que se describirán más adelante.

Proyecto Nodo Retiro

El área del proyecto es la zona de Retiro, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, entendida en el ámbito del presente trabajo como el área comprendida por la avenida Santa Fe, la calle M. T de Alvear, terrenos portuarios, la avenida Antártida Argentina, la terminal de ómnibus de la

Ciudad A. de Buenos Aires, las terminales ferroviarias de las líneas San Martín, Belgrano y Mitre y la calle Suipacha.

El área Retiro ocupa un espacio estratégico muy importante dentro de la ciudad ya que por este lugar transitan diariamente más de 400 mil personas por lo que cualquier mejora tendrá una amplia repercusión; tiene un gran valor histórico para la ciudad y para el país con destacados monumentos como son: el de Del Libertador San Martín, a los Caídos en Malvinas y al Centenario de la Revolución de Mayo conocida como Torre de los Ingleses (aunque su nombre oficial es ahora Torre Monumental).

Foto Nº 1 – Imagen aérea de la zona

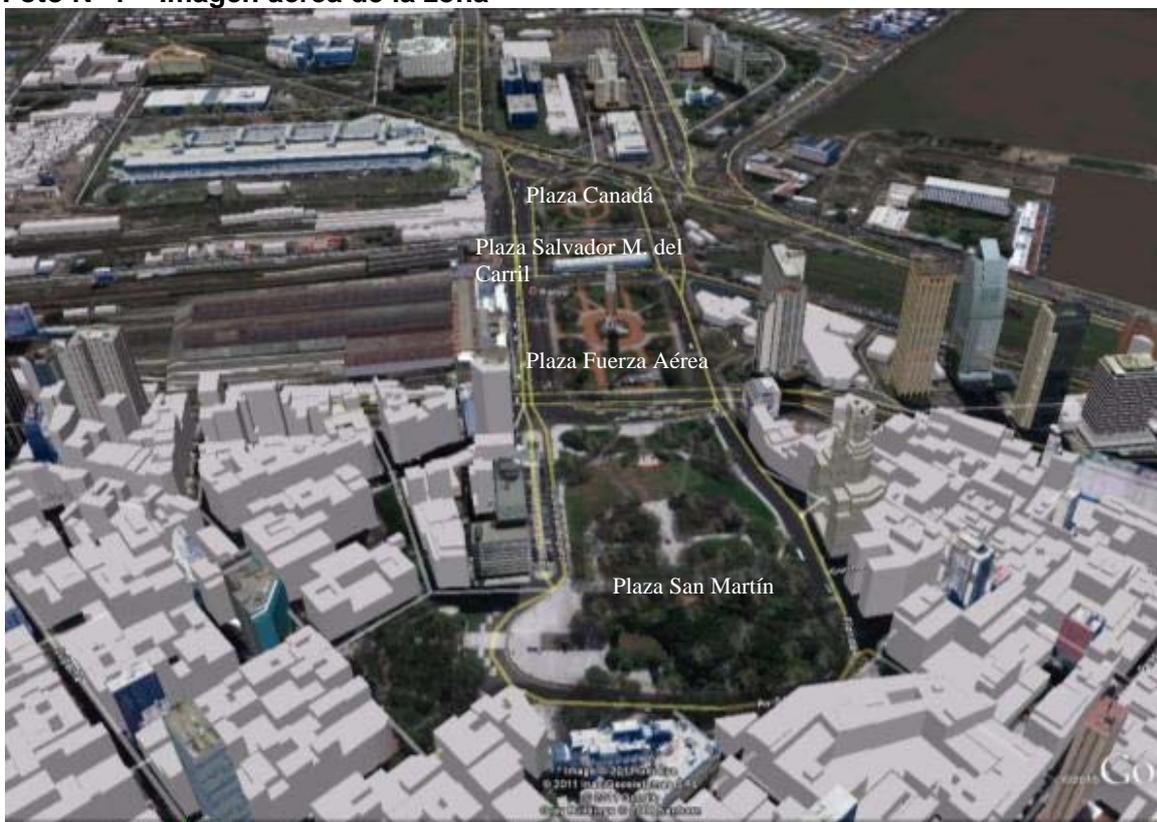


Figura 1: Zona de estudio Proyecto Nodo Retiro

Como criterio general para el proyecto de diseño vial se admite que, ante grados de libertad restringidos para la realización de las mejoras propuestas, se da prioridad al transporte público (en todas sus formas) frente al transporte privado.

En la búsqueda de mejorar la circulación en el área del Nodo Retiro, se proyecta eliminar el giro a nivel del transporte público colectivo (exclusivamente) desde las dársenas de detención de la avenida Ramos Mejía hacia Leandro Alem por medio de un túnel debajo de la avenida Del Libertador y la plaza San Martín que culmina en la avenida Alem con sentido al sur. (Túnel desde Ramos Mejía a Av. Leandro N. Alem).

Esta rama se construye en trinchera en el sector bajo avenida Ramos Mejía y es aquí donde se ubican las paradas y refugios de colectivo. El tramo bajo avenida Del Libertador se propuso materializarlo mediante el sistema constructivo Cut & Cover y bajo Plaza San Martín fue necesario realizarlo en túnel de forma de no generar impactos sobre la superficie de la plaza que es patrimonio histórico. La salida es sobre la avenida Alem, donde las obras pueden ser realizadas en Cut & Cover y a cielo abierto.

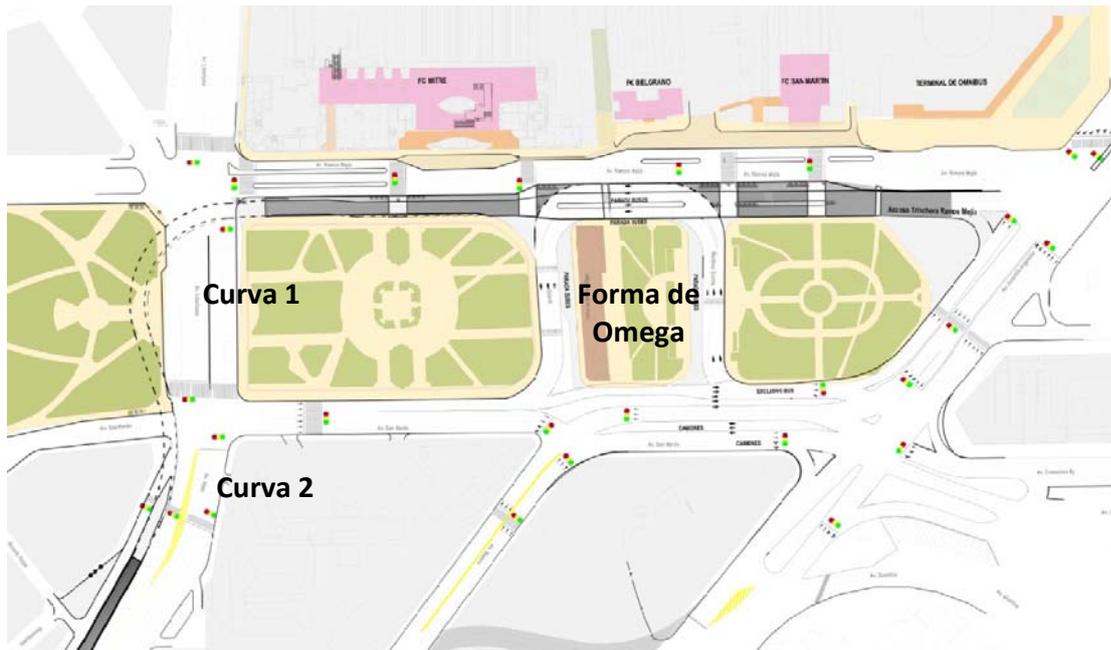


Figura 2: Planimetría General de arquitectura



Figura 3: Perspectiva Aérea desde Av. Del Libertador



Figura 4: Perspectiva Aérea general

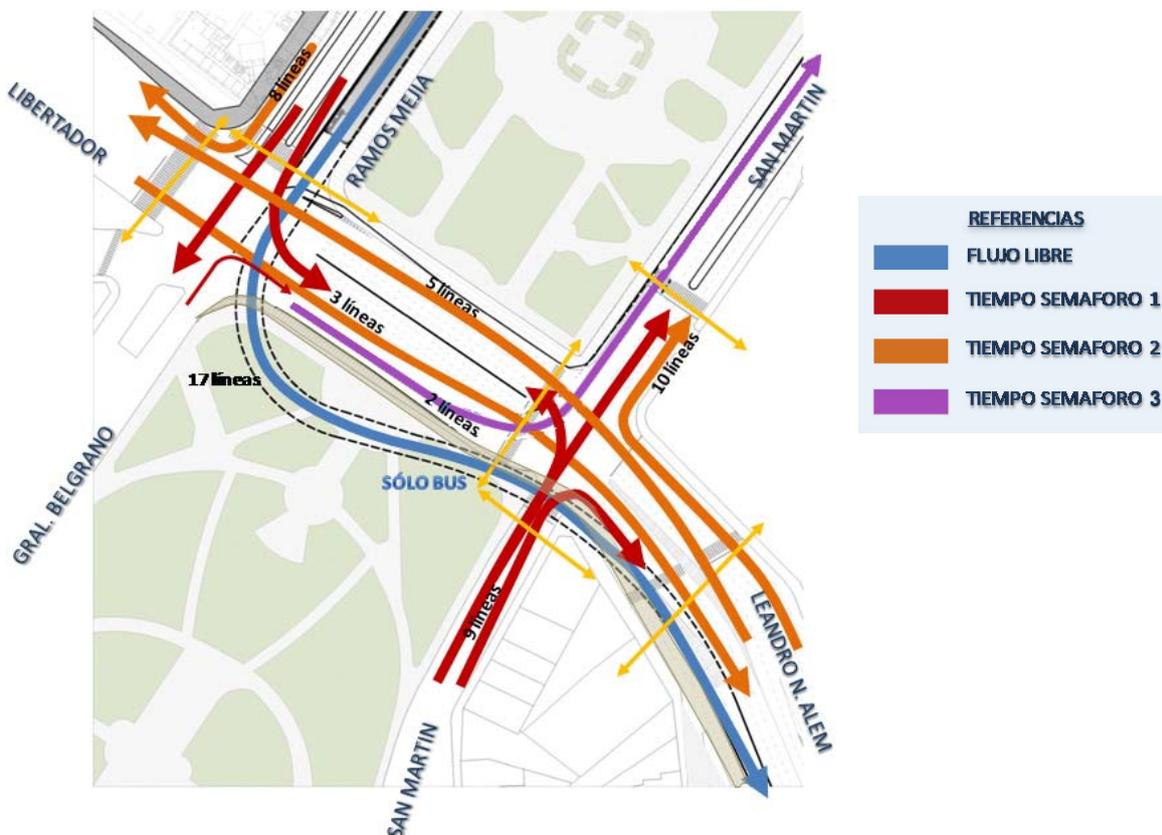


Figura 5: Esquema de giros a nivel: Del Libertador – San Martín

El túnel que conecta la calle Ramos Mejía y la Av. Leandro N. Alem presenta una geometría compleja. La rampa de acceso al túnel posee cuatro carriles de circulación con un gálibo

horizontal de 15m. Luego presenta un sector de paradas paralelas con un gálibo horizontal de 24m. A continuación presenta tres carriles de circulación y un gálibo interior de 14,5m. Tanto la rampa de acceso de aproximadamente 100m de longitud, así como la trinchera en su totalidad y el tramo debajo de la zona con forma de omega presentan un eje recto.

En cambio el tramo de túnel propiamente dicho presenta dos curvas horizontales de radios de 65m (peralte del 4%) y 125m (peralte del 2%) respectivamente. Estos valores cumplen con los requerimientos geométricos indicados por el comitente, que corresponden a una velocidad directriz de 40km/h. Adicionalmente las curvas presentan sobrecanchos de 3,25m (1,75m del lado interno y 1,50m del lado externo) y 2,00m respectivamente adoptados por norma para el vehículo de diseño. Para cumplir con la DVD, en los tramos de curva se ampliaron los anchos de los cordones. Por último, la rampa de salida presenta una longitud de aproximadamente 200m que permite la incorporación del tránsito en forma paralela a la Av. Leandro N. Alem. El alineamiento vertical se proyectó de manera de permitir en todo momento un gálibo vertical de 4,30m de altura.

Las pendientes longitudinales determinadas para las rampas de entrada y salida se corresponden con los valores máximos permitidos por norma y por las experiencias transmitidas por el cliente de proyectos anteriores. La rampa de entrada presenta una pendiente del 6%, en tanto que, la rampa de salida presenta una pendiente de idéntico valor seguida por una pendiente del 3,50% para que los buses puedan esperar en caso que la semaforización así lo condicione. Las pendientes longitudinales en trinchera se adoptaron por temas de escurrimiento y para ubicar a la trinchera al mismo nivel altimétrico que la Línea C y permitir su conexión. El trazado altimétrico también tuvo como objetivo cruzar por encima a la Línea E que actualmente se encuentra en construcción y cruzar por debajo el Pluvial que existe por debajo de la Av. San Martín.

El diseño de las curvas verticales se ha efectuado, teniendo en cuenta la presencia de las curvas horizontales de manera tal de lograr que exista, siempre que sea posible, una coordinación planialtimétrica. Las curvas verticales presentan longitudes mínimas establecidas por el criterio de estética de 30m y de seguridad de 50m y 56m.

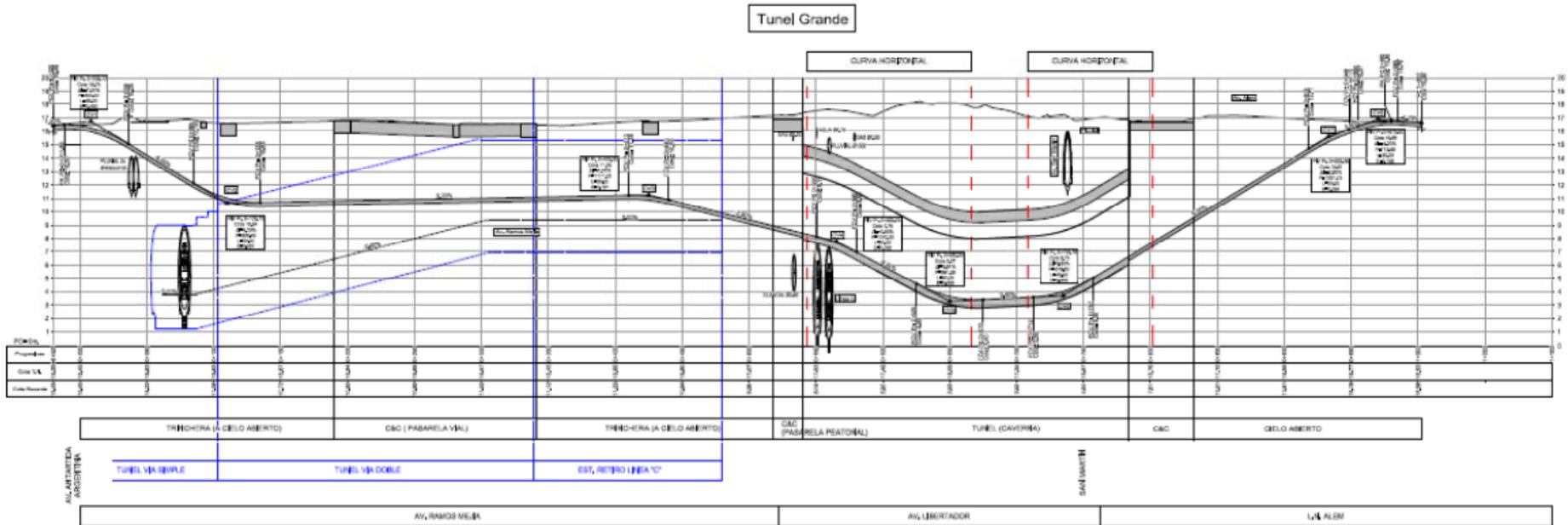


Figura 6: Altimetría de proyecto



Figura 7: Esquema sistemas constructivos

| | | | |
|---|---------------------------|---|--------------------|
|  | Trinchera a Cielo Abierto |  | Puente Peatonal |
|  | Cut & Cover |  | Puente Ferroviario |
|  | Túnel con Caverna | | |

Se distinguen distintos tramos que se detallan a continuación exclusivamente los correspondientes al diseño del túnel:

Túnel Caverna (Pr 0+538 a 0+773 aproximadamente)

La sección transversal correspondiente al tramo en que se desarrolla la primera curva horizontal, presenta dos carriles de circulación con un ancho de calzada total de 10,25m de ancho de los cuales 3,25m corresponden al sobreecho: 1,50m del lado externo y 1,75m del lado interno para verificar la DVD en la curva horizontal.

El nivel freático se encuentra por sobre la cota de fundación del túnel por lo que se prevé la colocación de bombas para eliminar el agua.

A ambos lados de la calzada se proyectan cordones integrales de 0,50m de ancho.

La segunda curva horizontal presenta dos carriles de circulación con un ancho total de calzada de 9,00m de ancho, de los cuales 2,00m corresponden al sobreecho.

A ambos lados de la calzada se proyectan cordones integrales de 0,50m de ancho.

PERFIL TIPO - TRAMO EN CURVA 1

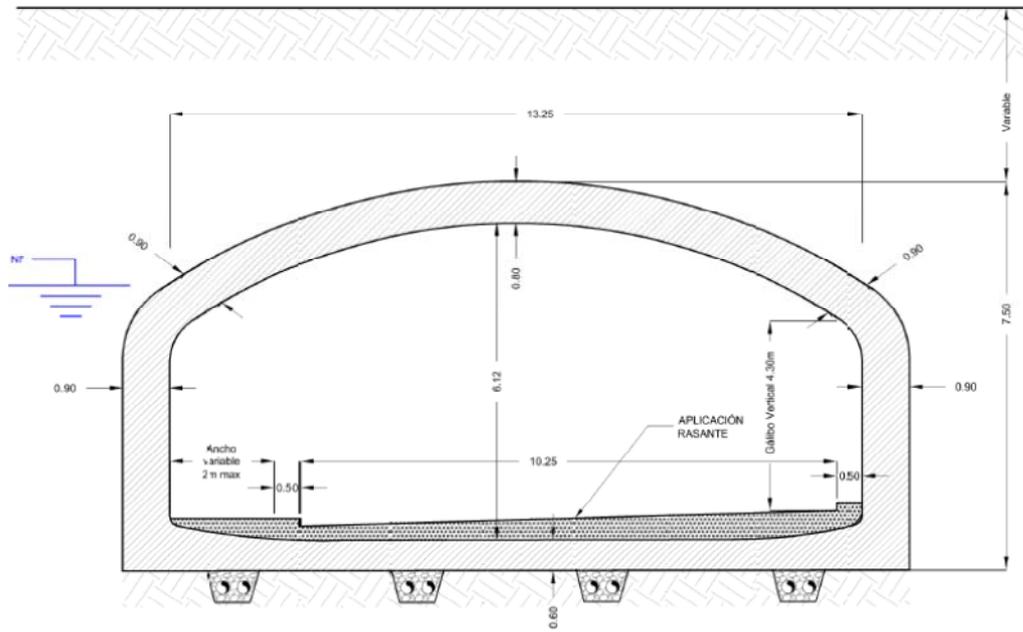


Figura 8: Perfil Tipo - Tramo en Curva 1

PERFIL TIPO - TRAMO EN CURVA 2

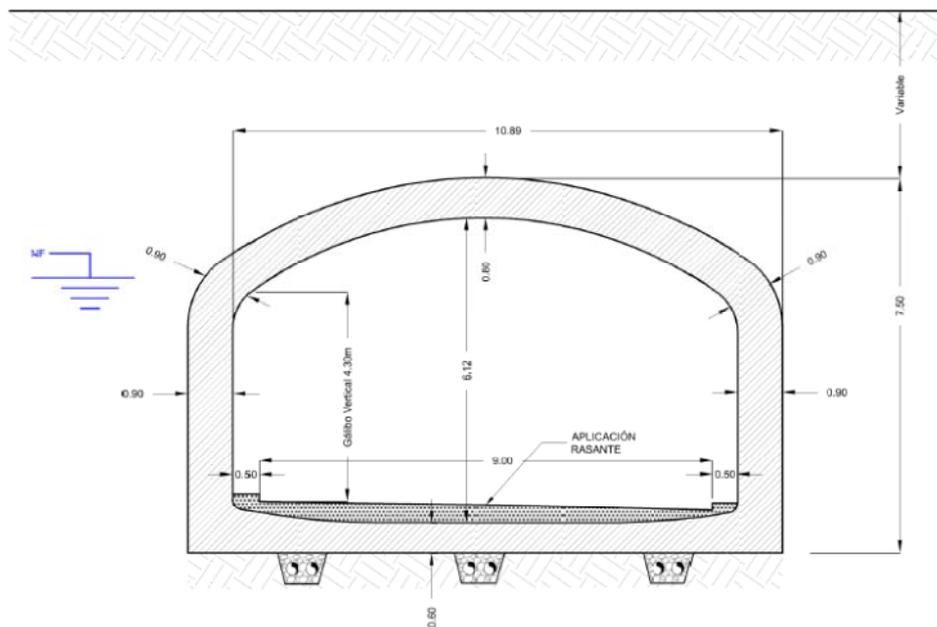


Figura 9: : Perfil Tipo - Tramo en Curva 2

Cut & Cover y Rampa a Cielo Abierto (Pr 0+773 a 0+970 aproximadamente)

La calzada presenta un ancho total de 7,0m con dos carriles de circulación de 3,50m de ancho por carril.

Las pendientes transversales variarán entre el 2% y el -2% de acuerdo a las condiciones de desagüe.

A ambos lados de la calzada se proyectan cordones integrales de 0,50m de ancho.

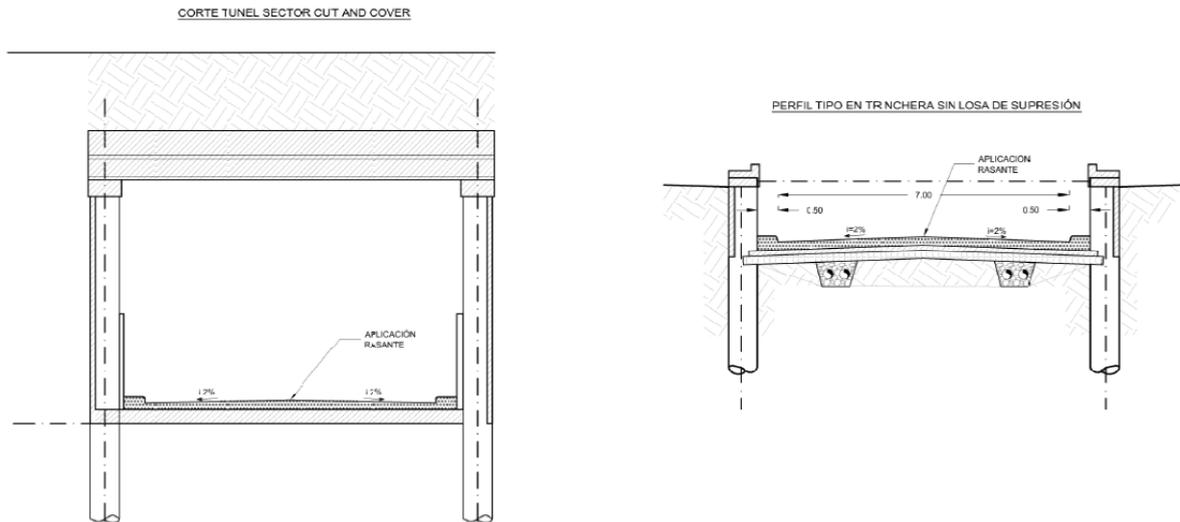


Figura 10: Perfil Tipo Acu & Cover y Trinchera

Metodología de Análisis Comparativo

Del proyecto del Nodo Retiro, se consideran los siguientes tres puntos sobre los que focalizaremos el análisis en este trabajo y su comparación entre las distintas normativas:

- A. Sección Transversal
- B. Diseño Altimétrico
- C. Análisis de Distancia de Visibilidad de Detención (DVD) en forma espacial (planialtimétrico)

Estos puntos fueron elegidos ya que representaban los mayores desafíos en el diseño de una obra de infraestructura urbana de estas características inmersa en un tejido urbano con numerosas interferencias (túneles de subterráneos, pluviales, desagües generales y otros) y condiciones de borde restringidas.

A. Sección Transversal

La definición de la Sección Transversal en proyectos de estas características es un punto importante ya que impactará directamente sobre los costos de la obra y su factibilidad, especialmente en los proyectos urbanos con variadas interferencias, como en el Proyecto del Nodo Retiro.

Iniciando el estudio de este punto a partir de la normativa DNV 2010, la única información vinculada al diseño de la sección transversal de túneles se identificó en la sección 4.9.3, donde

se indica que la sección transversal deseable comprendía un ancho total de 12,7 m, compuesta por:

- calzada 2 x 3,65 7,3 m
- banquina derecha: 3 m
- banquina izquierda 1 m
- veredas 2 x 0,7 1,4 m

Análogamente, la norma considera un galibo vertical de 5,1 m, según lo detallado en el Capítulo 3: Diseño Geométrico, Sección 3.6.2 (Pág 3.56). Como comentario adicional, se destaca que para la verificación de la DVD en curvas verticales cóncavas bajo estructuras, la altura mínima de paso se establece como 4,5 m, Sección 3.6.9 (Pág. 3.68).

Sin embargo, estas condiciones que surgen dentro de un marco de diseño de Autopistas, no serían aplicables al caso en estudio por las propias condiciones de la obra a diseñar, pero además, por las limitaciones urbanas de la obra tampoco podrían haber sido materializadas en ningún caso.

Por lo tanto, se procedió a analizar las recomendaciones de la AASHTO buscando encontrar los parámetros más ajustados al tipo de obra a realizar: un túnel vial urbano de circulación exclusiva para buses con velocidad de diseño de 40 Km/h. Dentro de los documentos norteamericanos se identificaron los parámetros indicados en los capítulos:

- TMDCRT: "Capítulo 2 - Configuración geométrica", puntualmente las Secciones 2.3 y 2.4
- Libro Verde: "Capítulo 4 - Elementos de la sección transversal" Pág. 351 a 356

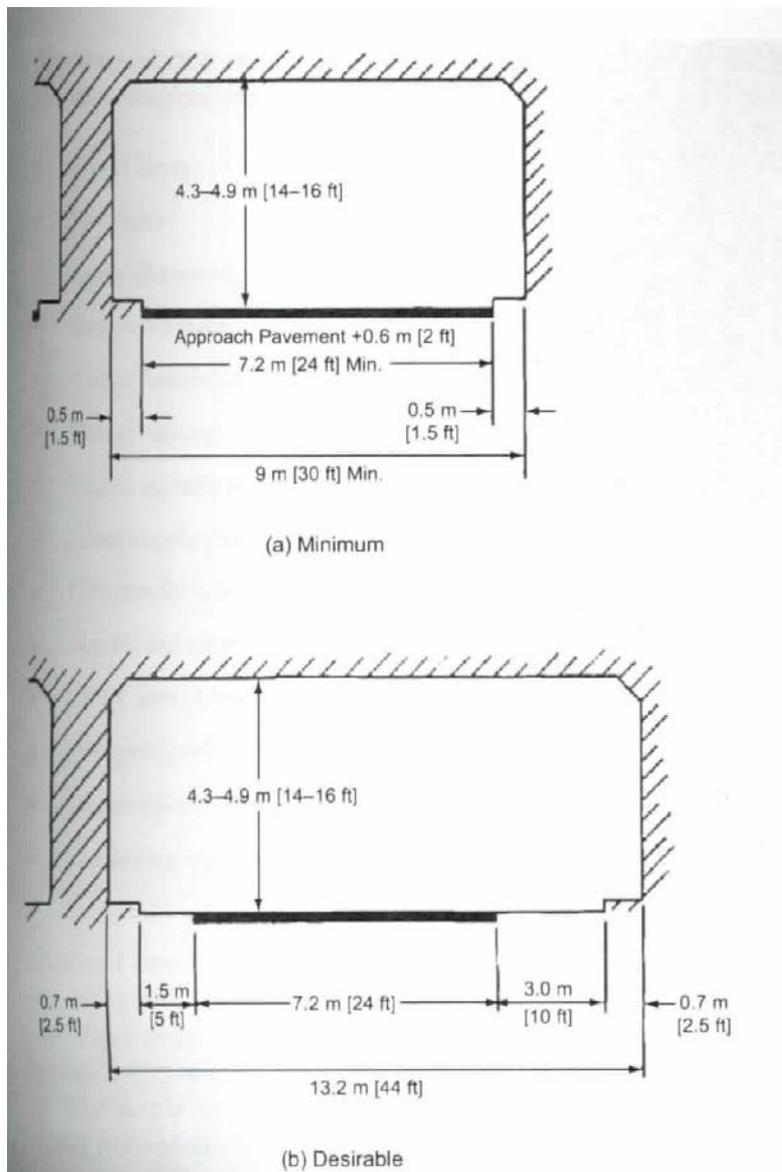


Figura 11: Requerimientos de gálibos (a) mínimos y (b) deseables de túneles típicos de dos carriles. Fuente: AASHTO (TMDCRT), Pág. 2-5

Nuevamente en este caso los parámetros presentados son generales y no distinguen por categoría de camino. El punto que sí se consideró de estas recomendaciones fue el valor mínimo definido para el gálibo vertical de 4,3 m, que se encontraba en consonancia con lo pedido por el comitente originalmente.

Un caso similar sucedió con el análisis de la normativa chilena, en la que tampoco se destaca una distinción por categoría de caminos, aunque en este caso sí se definen algunos parámetros que en los anteriores documentos no habían sido especificados. Estos parámetros estarían

establecidos para el diseño de túneles de gran envergadura como los que se dan en la ciudad de Santiago de Chile.

Dimensiones Mínimas de la Sección Transversal

| | |
|-----------------------------|--|
| Gálibo vertical | : 5 m o mayor, si se requiere |
| Ancho de pistas | : 3,5 a 4,0 m c/u. |
| Bermas | : 0,5 m a cada lado de la calzada |
| Aceras laterales | : 0,75 a 0,85 m. Pueden aceptarse excepciones justificadas |
| Pendiente transversal única | : 2% |

Figura 12: Dimensiones mínimas de la sección transversal en túneles. Fuente: norma chilena “Manual de Carreteras. Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño.”, Sección 3.802.4

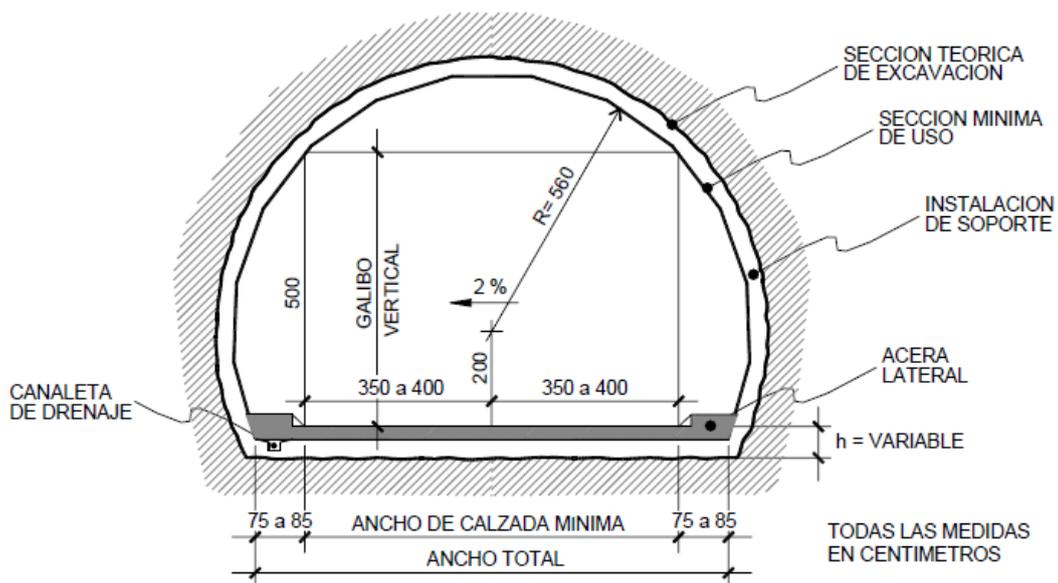


Figura 13: Perfil Transversal tipo de túneles. Fuente: norma chilena “Manual de Carreteras. Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño.”, Sección 3.802.4

Buscando entonces mayores definiciones específicas para el tipo de camino objeto del proyecto Nodo Retiro, se estudió la norma española, que aún si el contenido general era más reducido, contiene parámetros de diseño específicos, resumidos en la siguiente tabla:

TABLA 7.2.

| | TIPO CARRETERA | SECCIÓN NORMAL | TÚNELES |
|---------------------------|-------------------------------------|---|---|
| CALZADAS SEPARADAS | 2 Carriles sin posible ampliación | $1,0 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 10,5$ | $1,0 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 10,5$ Excepción $0,5 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 8,5$ |
| | 2 Carriles con posible ampliación | $1,0 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 10,5$ $1,0 / 3 \times 3,5 / 2,5 = 14,0$ Ampliada | $1,0 / 3 \times 3,5 / 1,0 = 12,5$ |
| | 3 Carriles | $1,0 / 3 \times 3,5 / 2,5 = 14,0$ | $1,0 / 3 \times 3,5 / 1,0 = 12,5$ |
| | VÍAS RÁPIDAS | $2,5 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 12,0$ | $1,0 / 3,5 / 1,5 / 3,5 / 1,0 = 10,5$ |
| CARRETERAS CONVENCIONALES | C-100 con arcenes de 2,50 m | $2,5 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 12,0$ | $1,0 / 3,5 / 1,0 / 3,5 / 1,0 = 10,0$ |
| | C-100 con arcenes de 1,50 m C-80 | $1,5 / 2 \times 3,5 / 1,5 = 10,0$ | $1,0 / 3,5 / 1,0 / 3,5 / 1,0 = 10,0$ |
| | C-60 con arcenes de 1,50 m | $1,5 / 2 \times 3,5 / 1,5 = 10,0$ | $1,0 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 9,0$ |
| | C-60 con arcenes de 1,00 m | $1,0 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 9,0$ | $1,0 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 9,0$ |
| | C-40 con carriles de 3,50 m | $0,5 / 2 \times 3,5 / 0,5 = 8,0$ | $0,5 / 2 \times 3,5 / 0,5 = 8,0$ |
| | C-40 con carriles de 3,00 m | $0,5 / 2 \times 3,0 / 0,5 = 7,0$ | $0,5 / 2 \times 3,0 / 0,5 = 7,0$ |

Figura 14: Dimensiones según clase de carretera y velocidad de proyecto (100, 80, 60 y 40 Km/h) para sección normal y en túnel. Tabla 7.2 de la norma española “Trazado: Instrucción de Carreteras – Norma 3.1-IC. Dirección General de Carreteras”, Sección 7.4.1, Pág. 66.

En el caso de estudio, el diseño corresponde al de una carretera C40, fijando el ancho de los carriles en 3,5 m como consecuencia del vehículo de diseño y en consonancia con los valores mínimos presentados por la norma chilena. Estos valores no tienen en cuenta los sobrecanchos en las curvas horizontales.

B. Diseño Altimétrico

En el análisis de las distintas normativas no se destacan análisis detallados de las condiciones ni sobre casos específicos, sino que se establecen valores mínimos y máximos recomendados, con la aclaración que se podrían adoptar otros valores siempre y cuando se garanticen las condiciones de seguridad para la operación.

En el caso de normativas que no presentan detalles específicos para la condiciones de diseño de túneles, se consideraron los valores de la norma establecidos para otros elementos de diseño.

En la norma DNV 2010, al no establecer condiciones específicas para túneles, por analogía se extractaron los parámetros de diseño definidos para ramas de acceso a autopistas con las siguientes condiciones:

- “Pueden considerarse valores de pendientes hasta 8% aunque es preferible no superar el 6%.”;

- *“Las cortas pendientes de subida de 7 a 8% permiten una operación segura sin pérdida de la velocidad de los vehículos de pasajeros. Las cortas pendientes de subida hasta 5% no afectan a camiones y buses.”;*
- *“Las pendientes de bajadas en ramas deben seguir las mismas guías que para las subidas. Sin embargo, pueden superar tales valores en un 2%, con 8% con máximo deseable.”*

Esto parámetros fueron extraídos de la pág. 6.11, de la normal DNV 2010.

La recomendación TMDCRT de AASHTO establece como consideración general que las pendientes longitudinales en los túneles deberían ser evaluadas en base al confort que experimenta el conductor pero buscando un punto de balance económico entre los costos de construcción, operación y mantenimiento. Igualmente, se especifica que las pendientes no deberían superar el 4% aunque, donde sea necesario, se podrían adoptar pendientes hasta el 6%. (Página 2-3).

Respecto de la norma chilena, el procedimiento para definir la pendiente longitudinal máxima surge a partir de establecer una caída máxima de velocidad de 23 Km/h, es por ello que no aplicaría para velocidades de diseño bajas como es el caso el proyecto de estudio al ser un túnel urbano. Más allá de eso, la norma establece que: *“En túneles muy cortos de 300 a 400 m podrían eventualmente aceptarse pendientes de 5 a 6 %”* (Sección 3.802.4)

Por último, en el caso de la norma española, estos parámetros de diseño se encuentran más detallado en tres puntos:

- *“Los túneles de longitud igual o menos que quinientos metros (500 m) tendrán una sola inclinación de la rasante, salvo justificación en contrario”;*
- *“En carreteras de calzadas separadas, se evitarán rampas mayores del tres por ciento (3%), y pendientes mayores del cinco por ciento (5%)”.*

Igualmente, en el mismo apartado se establece que estas condiciones tienen en cuenta una velocidad mínima de diseño para vehículos pesados de 60 Km/h, por lo que estaría limitando esta aplicación a túneles viales de carreteras no urbanas.

C. Análisis de Distancia de Visibilidad de Detención (DVD) en forma espacial (planialtimétrico)

Más allá de las diferencias que existen entre las distintas normativas analizadas, las mayores coincidencias se encuentran en el cálculo de la DVD, aún si varían algunos valores de parámetros en los distintos casos.

En forma teórica, tal como establece por ejemplo la norma DNV 2010 y que se repite en las restantes, la DVD comprende dos componentes relacionados con operaciones del conductor:

- a) *La distancia de percepción y reacción (DPR):* distancia recorrida a velocidad uniforme, velocidad directriz V , durante el lapso en que el conductor advierte el peligro y reacciona para aplicar los frenos (concepto cinemático).

- b) *La distancia de frenado (DF)*: distancia recorrida en movimiento uniformemente desacelerado, durante el frenado en calzada húmeda hasta la detención frente al obstáculo (concepto dinámico)

$$DVD = \frac{V \cdot t_p}{3,6} + \frac{V^2}{254 \cdot (f_l \pm i)}$$

Siendo:

t_p : tiempo de percepción y reacción, expresado en segundos.

f_l : coeficiente de fricción longitudinal.

i : pendiente longitudinal, expresada en formato decimal.

Se reumen en la siguiente tabla los coeficientes de las distintas normas estudiadas:

| Parámetro | <i>DNV 1980</i> | <i>DNV 2010</i> | <i>AASHTO</i> | <i>Norma Española</i> | <i>Norma Chilena</i> |
|-----------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------------|----------------------|
| t_p | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2 | 2 |
| f_l | 0,39 | 0,37 | 0,38 (*) | 0,432 | 0,415 |

(*): con objetivo de poder realizar la comparación entre normas, este valor adoptado corresponde a AASHTO 1994, ya que en las versiones posteriores se utilizó un concepto puramente cinemática que tiene en cuenta una desaceleración constante del vehículo ($a=3,4 \text{ m/s}^2$).

De estos dos parámetros, el coeficiente de fricción longitudinal (f_l) podría variar según las condiciones de cada país, ya que es función del parque automotor y de la infraestructura vial. En cambio, el tiempo de percepción y reacción, es función ya de condiciones culturales y de las características de los conductores locales, pero en este caso la adaptación local requiere de estudios específicos.

Para el proyecto del Nodo Retiro, aún si el túnel está diseñado para el uso exclusivo de buses con conductores profesionales, se adoptó igualmente el valor indicado por la norma argentina de 2,5 seg. estando del lado de la seguridad, siendo posible estudiar su disminución en función de las características de operación descriptas.

En función de estos valores adoptados, se debe verificar el diseño planialtimétrico de modo que se cumpla en todo momento las DVD en curvas horizontales y verticales. Adicionalmente se debe tener en cuenta los factores psicológicos que le genera al conductor el hecho de tener un muro vertical próximo.

Siguiendo el análisis comparativo, nuevamente encontramos que las distintas normativas encaran los cálculos de formas similar, definiendo los valores de apartamiento lateral. En todos los casos la metodología de cálculo es muy similar, difiriendo algunos de sus coeficientes particulares y teniendo que sus ábacos de cálculo están en función de la velocidad de circulación y del radio del eje del carril interior. Un punto a destacar es que la DVD se mide a lo largo del eje del carril interior de la curva.

La norma DNV 2010 establece que: “Donde haya obstrucciones visuales sobre el lado interior de las curvas y no puedan removerse, tales como muros, taludes de corte, edificios y barreras de defensa, un diseño puede requerir ajustes en la sección transversal normal del camino, o cambios en el alineamiento, para dar adecuada visibilidad.” (Sección 3.5.7)

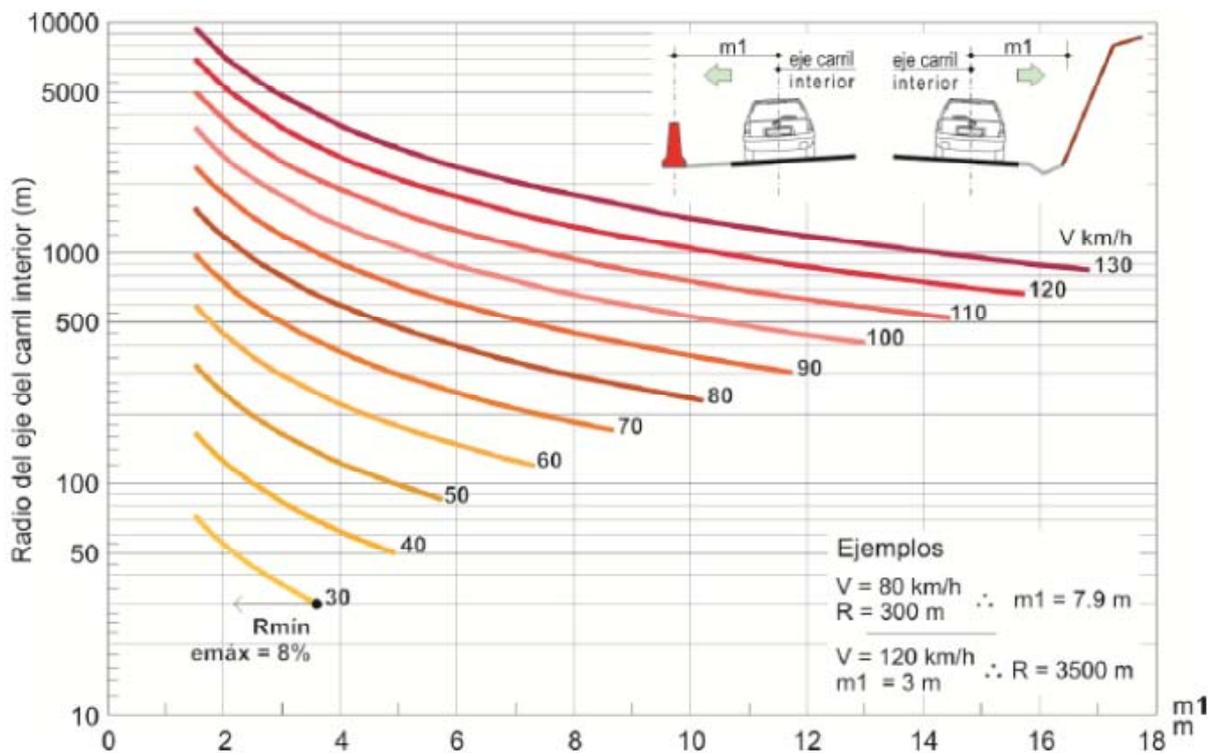
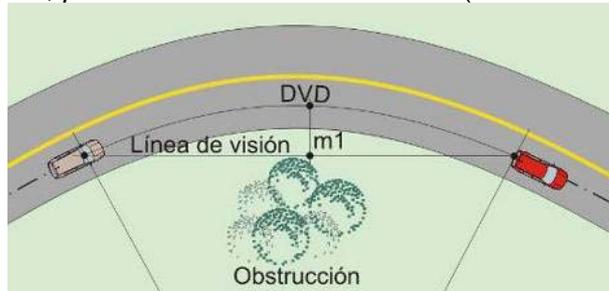


Figura 15: Ordenada media $m1$ necesaria para proveer DVD en curva horizontal. Fuente: DNV 2010.

Se destaca que en la norma chilena existe una verificación adicional propia para el diseño en túneles con un apartamiento mínimo en función del ancho del carril que incluye el “Efecto Pared” que hace que el conductor deje una distancia algo mayor al borde de calzada interno.

TABLA 3.202.402.A
DISTANCIA DEL CONDUCTOR AL BORDE DE LA PISTA CRITICA “dc(m)”
(Considerar Sentido del Flujo y de la Curva)

| TRAZADOS EN CAMPO ABIERTO -TERRAPLENES O CORTES CON TALUD $\leq 4v:1h$ | | | |
|--|--------------|---|-------------------|
| CALZADAS BIDIRECCIONALES (n=2) | | CALZADAS UNIDIRECCIONALES (n ≥ 2) | |
| Pistas 3,5 m | Pistas 3,0 m | Pistas 3,5 m | |
| 2,0 | 1,75 | 2,0 P. Derecha | 1,50 P. Izquierda |
| TRAZADOS EN TUNELES O ADYACENTES A MUROS DE CONTENCION O CORTES CON TALUD > 4v:1H ^{(1) Y (2)} | | | |
| CALZADAS BIDIRECCIONALES (n = 2) | | CALZADAS UNIDIRECCIONALES (n ≥ 2) | |
| PISTAS 3,5 m | PISTAS 3,0 m | PISTAS 3,5 m | |
| 2,20 | 1,95 | 2,35 P. Derecha | 1,65 P. Izquierda |

(1) El "Efecto Pared" de los paramentos adyacentes hace que el conductor deje una distancia algo mayor al borde de la Pista Crítica, que la que deja en Campo Abierto, efecto más notorio aún en pistas con flujo unidireccional.

(2) Si adyacente a la Pista Crítica existe una Berma o Acera que individualmente o en conjunto posean un ancho mayor que 1,5 m el Efecto Pared deja de operar y se empleará el "dc" correspondiente a Campo Abierto.

La distancia libre entre el radio que describe el Conductor y el obstáculo deberá ser tal que:

$$dc + \text{borde pista crítica al obstáculo} \geq a \text{ máx (m)}$$

Figura 16: Tabla 3.202.402.A Distancia del conductor al borde de la pista crítica “dc(m1)”.

Fuente: normal chilena.

En el caso del Nudo Retiro, además de las verificaciones por las distintas normas, se procedió a realizar un análisis de visibilidad para verificar en todo momento que se cumplieran la DVD en forma espacial considerando las variables planimétricas y altimétricas en forma conjunta. Para ello se utilizó el software AutoCAD Civil 3D, más específicamente sus herramientas de Visibility Check: “*Check Sight Distance*” y “*Drive*”.

Los recorridos realizados con la herramienta “*Drive*” a una velocidad de 40 km/h permitieron juzgar en forma anticipada las perspectivas que tendrían los conductores al circular por el túnel proyectado. Además, en conjunto con las herramientas de comprobación de visibilidad de detención, fue posible pulir geoméricamente el diseño y verificar que se cumpliera con las distancias de visibilidad calculadas según las distintas normas y recomendaciones.

Para realizar dicho análisis se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Altura de ojo de conductor: $h_1=2,20\text{m}$
- Altura del objeto: $h_2=0\text{m}$
- Altura mínima de la estructura: $H=4,3 \text{ m}$

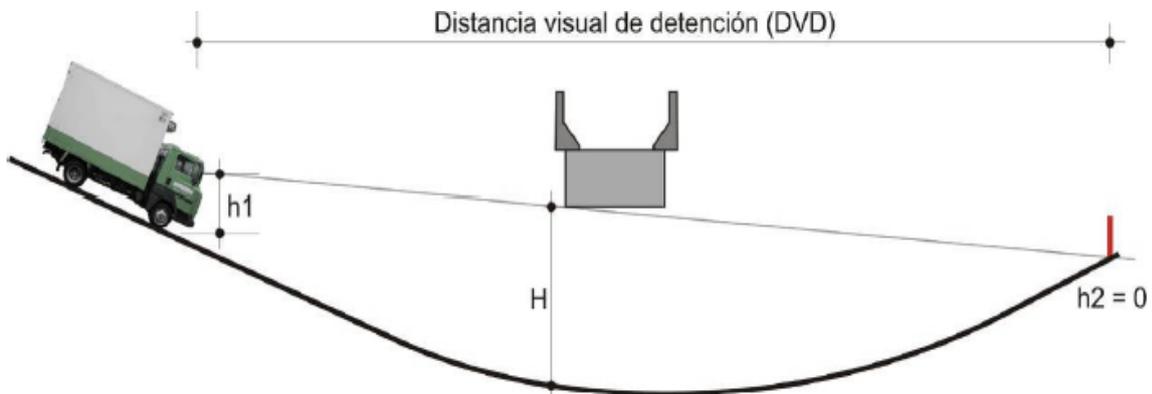


Figura 17: extraída DNV 2010 Curvas verticales cóncavas bajo estructura

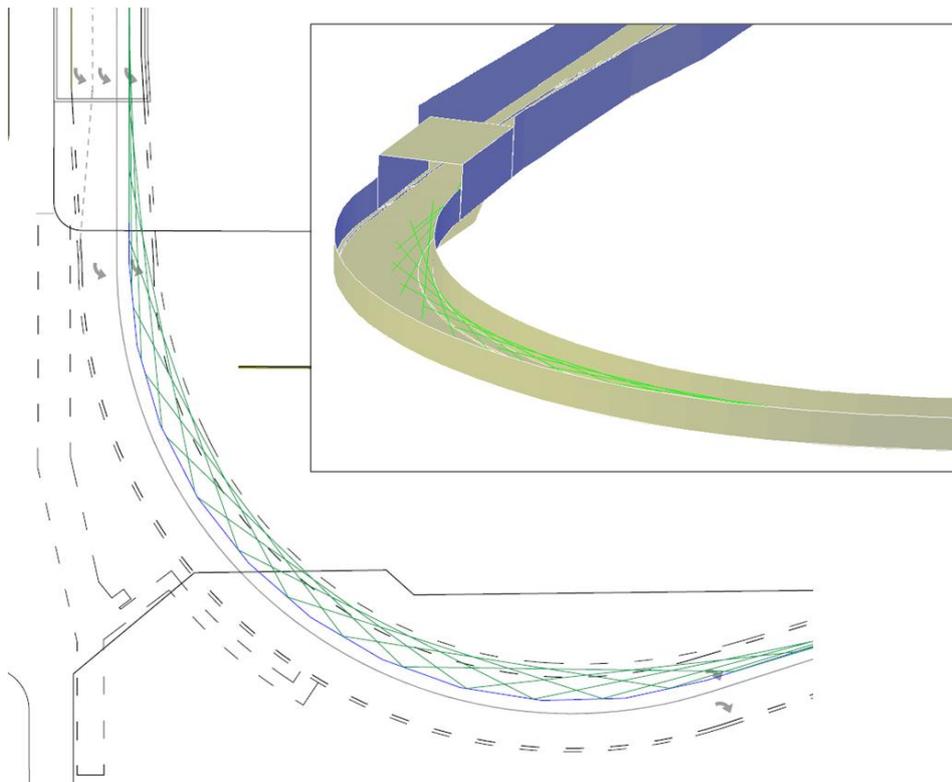


Figura 18: análisis de DVD con AutoCAD Civil 3D Proyecto Nodo Retiro

Conclusiones

El diseño de túneles viales en espacios urbanos presenta características especiales no contempladas en las normas de diseño vial convencionales, en particular en las normas de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV). Al realizar este tipo de proyectos, es necesario remitirse a normativas y recomendaciones internacionales que contemplen estos casos.

Este trabajo analizó normas de distintas características de España, EEUU y Chile, buscando las coincidencias y los parámetros de diseño que mejor se adaptaran al diseño de túneles viales urbanos con velocidades de diseño por debajo de los 60 Km/h, como fue en el caso del proyecto presentado en este trabajo: Nodo Retiro.

Puntualmente, respecto de los tres parámetros de diseño analizados: Secciones transversales, Diseño Altimétrico y Análisis de DVD, podemos concluir que:

- **Secciones Transversales:** la norma española es la que presenta mayor variedad en la definición de características de los elementos de diseño para distintos tipos de caminos y velocidades de circulación. Esto la constituye en una norma de gran aplicación para túneles viales urbanos, como el del proyecto de estudio. En el caso de las otras normas, las definiciones son más generales aplicadas en casos de túneles de gran envergadura y con circulación tipo autopista.
- **Diseño Altimétrico:** sobre este punto, el conjunto de normas presenta características similares, siempre mencionando casos generales para el diseño de túneles. En el caso de la norma española, en contraposición con lo que sucedía para las secciones transversales, en el diseño altimétrico no hay consideraciones particulares para distintas velocidades de diseño, en particular para las inferiores a los 60 Km/h.
- **Análisis de Distancia de Visibilidad de Detención (DVD) en forma espacial (planialtimétrico):** este análisis también refleja similitudes en las metodologías de cálculo de la DVD en las distintas normativas y su verificación en las características geométricas del túnel, definiendo entonces los valores de apartamiento lateral. Simplemente podría destacarse que, para el caso de proyectos como el estudiado en este trabajo, donde la utilización del túnel es exclusiva para conductores profesionales, se podría estudiar su disminución del tiempo de percepción y reacción en función de las características de operación descriptas que haría un diseño más eficiente de la infraestructura. En virtud de esto, consideramos que herramientas como el AutoCAD Civil 3D que permiten realizar recorridos virtuales a la velocidad de proyecto, dan la posibilidad al proyectista de verificar y comprobar el diseño en casos que no se encuentran totalmente definidos en la normativa y permiten además identificar puntos ciegos para los conductores.

En conclusión, esperamos que estos lineamientos y metodologías empleados en este análisis comparativo puedan llegar a servir en futuras experiencias de diseño de túneles viales en el país y sean el punto de partida para profundizar estos temas en futuras documentaciones.

Bibliografía

- Normas de Diseño Geométrico de Carreteras, Dirección Nacional de Vialidad, 1980
- Normas y Recomendaciones de Diseño Geométrico y Seguridad Vial, Dirección Nacional de Vialidad, 2010 (en proceso de aprobación)
- AASHTO 2004 – Green Book. Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 5th Edition (Libro Verde)
- AASHTO 2010 – Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements
- “Manual de Carreteras. Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño.”, puntualmente el “Capítulo 3.800. Túneles.” realizado por la Dirección de Vialidad, Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas. Chile. Versión Junio 2002.
- “Trazado: Instrucción de Carreteras – Norma 3.1-IC. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Gobierno de España. 2011.
- Manual del Usuario AutoCAD Civil 3D 2012