

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

PAVIMENTOS DE LOS TÚNELES

El presente informe incluye los siguientes documentos requeridos para la licitación de los túneles bajo la Avenida 9 de Julio:

1. Memoria Descriptiva
2. Criterios y Normas de diseño
3. Especificaciones Técnicas
4. Informe de Ingeniería

Memoria Descriptiva

Se trata del diseño de pavimentos para los túneles a proyectar debajo de la Avenida 9 de Julio.

Criterios y Normas de diseño

Se indican dentro del documento: Método de Diseño de Pavimentos de Hormigón PCA Simplificado, AASHTO 1993 y Suplemento 1998, Real Decreto 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras de España, y Propuesta para Proyecto de Firmes y Pavimentos en Túneles de Del Val Melús de la Universidad Politécnica de Madrid, España, 2009.

Informe de Ingeniería

Contiene las memorias de cálculos en las que se indican las hipótesis y modelos utilizados, esquemas generales y análisis de datos y sus verificaciones.

Especificaciones Técnicas

Toda la documentación presentada sigue normas IRAM, ASTM, Pliego General de Especificaciones Técnicas de la Dirección Nacional de Vialidad, y Reglamento CIRSOC 201, 2005. Asimismo se elaboraron especificaciones técnicas particulares contenidas en documento aparte.

MEMORIA DESCRIPTIVA

Para el diseño estructural de los pavimentos que integrarán los túneles bajo la Avenida 9 de Julio se han adoptado como pilares de diseño tres aspectos fundamentales: seguridad, confort y durabilidad. Se proyectan pavimentos de larga vida, con seguridad para el usuario y con suficiente nivel de confort expresado en bajo nivel de ruido y mínimo valor de IRI. Es fundamental diseñar y construir un pavimento durable y de bajo mantenimiento habida cuenta de las

dificultades y riesgos que existen trabajando dentro de un túnel en servicio. Se pueden emplear pavimentos rígidos –losas de hormigón sobre hormigón- o rígido-compuestos formados por capas asfálticas sobre hormigón del piso del túnel. En el presente proyecto se han adoptado pavimentos rígidos de hormigón de cemento Pórtland.

Se consideran cuatro condiciones de apoyo diferentes para los paquetes estructurales:

- a) sobre suelos heterogéneos,
- b) sobre suelos predominantemente limo-arcillosos,
- c) sobre hormigón estructural, y
- d) sobre solera de fondo rellena con mortero de densidad controlada.

En el presente proyecto se ha trabajado con una solución en pavimento rígido sobre las distintas sustentaciones antes indicadas conformado por una subbase de suelo cemento y una losa de hormigón simple de 20 cm de espesor con juntas transversales sin barras pasadoras. Cuando se trata de hormigón sobre hormigón estructural se asigna un espesor de losa igual a 10 cm actuando monolíticamente mediante la aplicación de puente de adherencia, y cuando se trata de losas de hormigón sobre el mortero de densidad controlada de relleno, se emplean losas de 18 cm de espesor con juntas transversales sin pasadores.

Las calzadas que componen los túneles se diseñaron empleando métodos que tienen en cuenta los cinco factores considerados fundamentales en un diseño ingenieril contemporáneo:

Sustentabilidad,
Seguridad
Respeto por el medio ambiente,
Confort de rodadura y
Durabilidad.

Los principios de sustentabilidad requieren del uso racional de fuentes no renovables y técnicas que empleen materiales de alto desempeño. Ello es particularmente importante a fin de reducir las tareas de mantenimiento y los costos del usuario al mínimo necesario durante la vida útil de las estructuras a construir. El tema de la seguridad es fundamental desde dos puntos de vista: la calidad de la calzada y el peligro de incendio dentro de un túnel. La calidad de la calzada a su vez se compone de: confort, nivel de ruido, calidad de rodadura, propiedades friccionales y durabilidad.

Para el diseño de los pavimentos de hormigón de los túneles se ha empleado el método simplificado de la PCA (Pórtland Cement Association) de los EE, verificando mediante los lineamientos de la Guía AASHTO para Diseño de Estructuras de Pavimentos, edición 1993 y su suplemento 1998 para cálculo de pavimentos de hormigón. Asimismo se ha tenido en cuenta el Real Decreto

635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras de España. También se han consultado diversos documentos relacionados con el diseño de pavimentos en túneles de la Unión Europea y de la EAPA (European Asphalt Paving Association). Finalmente se ha consultado una publicación del corriente año titulada *Propuesta para el proyecto de firmes y pavimentos en túneles de M A Del Val Mel* de la Universidad Politécnica de Madrid, España.

INFORME DE INGENIERÍA

Se detalla la metodología general de diseño empleada para el diseño de las estructuras de pavimentos ha sido la que se indica a continuación.

Pavimentos Rígidos sobre Apoyo Rígido

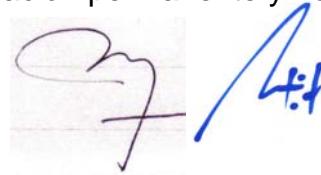
La metodología general para el diseño de pavimentos rígidos ya sean sobre estructuras de hormigón o sobre relleno de hormigón fluido a densidad controlada se basa en el cálculo de la losa de capa de rodamiento sobre una subbase rígida con separación mediante la interposición de una lámina de polietileno. En ambos casos el valor de k resulta suficientemente elevado como para aplicar espesores mínimos. Se ha empleado el método de diseño de pavimentos de hormigón sobre capas de base de hormigón pobre de la mencionada PCA.

Pavimentos Rígidos sobre Suelos

Son casos que se dan en los ingresos y egresos de cada túnel y hasta una profundidad de aproximadamente 6 metros para suelos denominados heterogéneos y entre 6 y 10 metros de profundidad para los suelos predominantemente limo-arcillosos. En ambos casos el valor de k resulta reducido. Se trabaja con paquetes compuestos por losas de hormigón simple sobre base de suelo estabilizado con cemento.

El método simplificado de la PCA de EEUU permite calcular espesores de losas de pavimentos de hormigón y de hormigón compuesto en base a dos tipos de fallas: fatiga y erosión. Como en el presente caso no se esperan vehículos pesados en los túneles es posible aproximar el cálculo mediante el empleo de las tablas especialmente preparadas por dicho método en función de cuatro categorías de tránsito, el módulo de ruptura del hormigón, el tipo de juntas de las losas, si tienen o no banquina y la calidad de soporte de la subrasante.

Por otra parte también se empleó la metodología AASHTO 93 considerando también los avances publicados en el Guía Suplemento 1997. Dicho suplemento AASHTO trae como novedades el empleo de un valor k elástico ajustable por estacionalidad –*effective yearly elastic k value*– en reemplazo el k compuesto utilizado anteriormente. Solamente la componente elástica de la deformación es representativa de la respuesta de la subrasante ante las cargas del tránsito. El k -compuesto asume una gran cantidad de deformación permanente y no representa





el soporte que el pavimento realmente experimenta durante la carga del tránsito, según esta nueva Guía AASHTO aprobada en 1998.

Como factores de diseño del pavimento de hormigón de cemento Pórtland se indican valores de: Modulo de rotura a flexión, módulo de elasticidad del hormigón, el módulo de reacción de la subrasante k, el período de diseño igual a 30 años, el tráfico mediante el número de ejes equivalentes empleando factores de carga para pavimentos rígidos pero solo para vehículos livianos, el clima que corresponde a la Ciudad de Buenos Aires, las condiciones de drenaje, y la confiabilidad del sistema a adoptar.

EL CLIMA

Corresponde a las condiciones climáticas de la Ciudad de Buenos Aires donde las temperaturas son benignas con una media anual de 18 C, típicas de un clima templado y húmedo y donde no se esperan condiciones críticas dentro de los túneles ya que tienen un microclima. Es decir las condiciones que normalmente imperan en cuanto a viento, temperatura y humedad se verán atenuadas en el túnel, si bien son tenidas en cuenta con respecto a la calidad de los materiales a emplear.

EL TRÁNSITO

El tránsito pasante por cada uno de los túneles con 1, 2 y 3 carriles es esencialmente conformado por vehículos livianos. Para el diseño de pavimentos se tiene en cuenta que salvo el tránsito de obra, todo el tránsito permitido será liviano, autos y camionetas. Por lo cual la influencia de las cargas por eje, el número de repeticiones de las mismas a proyectar será mínima. Se adopta en el presente informe un TMDA general igual a 15000 vehículos livianos diarios por carril para un período de servicio igual a 30 años con una tasa de crecimiento anual del 0,1%.

PROPIEDADES GENERALES DE LOS MATERIALES ADOPTADOS EN EL DISEÑO

Pavimento de Hormigón de Cemento Portland

Módulo Elástico del Hormigón: fue estimado a través de correlaciones con la resistencia a compresión especificada empleando una fórmula recomendada por el *American Concrete Institute*.

Módulo de Rotura a Flexión: especificado para el tipo de hormigón empleado y el valor de input fue corregido según el procedimiento indicado en *AASHTO PCC Modulus of Rupture* teniendo en cuenta la desviación Standard del mismo y el porcentaje de la distribución de resistencia que normalmente cae por debajo del especificado.

Coeficiente de transferencia J, es un factor utilizado para tener en cuenta laabilidad de la estructura de hormigón de transferir una carga a través de las juntas y fisuras. El mismo fue adoptado en función del tipo de pavimento diseñado de acuerdo con la tabla 2.6 del método AASHTO 93.

Coeficiente k-elástico, determinado en función del tipo de suelo y su grado de saturación empleando correlaciones siguiendo los métodos AASHTO 93 y la Guía Suplementaria 1998.

Factor LS, tiene en cuenta la pérdida de soporte proveniente de la erosión de la subbase y/o movimientos verticales diferenciales del suelo. Será adoptado de la tabla 2.7 del método AASHTO 93 en función del tipo de material.

Suelos Estabilizados con Cemento, se especificarán siguiendo el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la DNV, Sección C.IV. Base o Subbase de Suelo-Cemento.

MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO

El desempeño de la estructura vial incluye dos aspectos muy importantes a tomar en cuenta en el diseño: un aspecto funcional y un aspecto estructural dentro de las condiciones de medioambiente, tránsito y tipo de estructura. Dentro del comportamiento funcional se tuvo en cuenta a su vez dos importantes temas: la seguridad y el confort del usuario.

Los elementos mas importantes considerados en relación a la seguridad de rodadura son: la resistencia friccional de la calzada, las condiciones de visibilidad, la minimización del efecto H (hidroplaneo), y la disminución de la reflexión especular durante lluvias y durante el día. El confort viene definido en base a la calidad de rodamiento que normalmente se la indica a través del Indice de Serviciabilidad Presente (ISP) y su variación en el tiempo. El cambio de dicho índice en el tiempo controla el costo del ciclo de vida del pavimento, por lo cual se lo considerado en la modelización del sistema.

La modelización estructural también tiene en cuenta las características físicomecánicas de las capas estructurales y su variación a través del tiempo en los períodos de análisis que se adopten para cada estructura.

Calzadas de Hormigón de Cemento Portland

Se estima una calzada principal sin banquinas, entre defensas de hormigón y con un adecuado sistema de drenaje. Se han estudiado distintos perfiles transversales de superestructura según el tipo de sustentación mencionado anteriormente en las distintas zonas de los túneles:

- a) sobre terraplenes de suelo heterogéno (subrasante adoptada en CBR 5%)
- b) sobre suelo limo-arcilloso (subrasante adoptada en CBR 3 %)
- c) sobre hormigón estructural, módulo de ruptura 700 psi, H30
- d) sobre relleno de Mortero de Densidad Controlada (MDC, 3 MPa)

Los perfiles cambian según se sustenten en bases de asiento con pobre subrasante, en asientos con buena subrasante y en base rígida combinando diferentes soluciones pero siempre empleando hormigón de cemento Pórtland normal y mortero de densidad controlada (MDC).

DESARROLLO DEL DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS

Las metodologías generales utilizadas para el diseño de las estructuras rígidas consideradas, se describen a continuación.

Datos de entrada para el Tránsito

Para el TMDA se ha considerado unos 15000 para el año 2011. El número de ejes equivalentes a 8,2 tn resultantes derivan de considerar solamente automóviles livianos con un factor de carga igual a 0,01 por eje de acuerdo con los valores que normalmente se manejan en el país.

Para un período de 30 años y tomando en cuenta una proyección de crecimiento mínima del 0,1% anual el número de ejes equivalentes resulta igual a 5,28 E06 para pavimento rígido. Se utilizaron los factores de carga de acuerdo con el criterio de la DNV (Fi) para convertir y asimilar el tránsito mixto a un número equivalente de ejes simples y ruedas duales de 8,2 toneladas.

Para el cálculo de la estructura con hormigón de cemento Pórtland a aplicar en todos los túneles se han establecido tres estructuras diferentes:

- a) losas de hormigón con juntas transversales sin pasadores sobre subbase de suelo cemento
- b) losas de hormigón con juntas transversales sin pasadores sobre subbase de mortero de densidad controlada MDC
- c) losas de hormigón con juntas transversales sin pasadores sobre hormigón estructural monolítico

El cálculo estructural siguió las recomendaciones de la PCA, método simplificado considerando que no se tendrá tránsito pesado en ninguno de los túneles. El método presenta una serie de tablas en función del tipo de tránsito, el módulo de ruptura del hormigón y las condiciones de soporte y subrasante. Este método ha sido empleado en todos los casos de apoyos: con suelo cemento como subbase, con hormigón estructural y con hormigón pobre como subbases. Obviamente que al tratarse de cargas livianas el cálculo resulta simplificado en sí y permite adoptar espesores mínimos entre 11 y 17 cm.

Simultáneamente pero sólo para los casos de hormigón sobre subbase de suelo cemento se utilizó la Guía AASHTO 1993 y su Suplemento 1998. En la guía mejorada -la metodología Guía AASHTO Suplemento 1998- trae como novedades el empleo de un valor k elástico ajustable por estacionalidad –*effective yearly elastic k value*- en reemplazo el k compuesto utilizado anteriormente. Solamente la componente elástica de la deformación es representativa de la respuesta de la subrasante ante las cargas del tránsito. El k -compuesto asume una gran cantidad de deformación permanente y no representa el soporte que el pavimento realmente experimenta durante la carga del tránsito, según esta nueva Guía AASHTO aprobada en 1997.

Asimismo la nueva guía incluye mejoras en: el efecto de la base sobre la losa debido a cargas y gradientes de temperatura y humedad, dichos gradientes se consideran inputs directos del análisis, se incorpora un procedimiento de verificación de falla en juntas y ajuste en lugar de incrementar el espesor de la losa, se considera la separación de juntas directamente a través de su interacción con el soporte de la losa y el efecto combinado de carga y tensiones de curvado por temperatura, y se incluye un nuevo modelo de diseño para pavimentos de hormigón.

Se reproduce a continuación el archivo de salida del programa con los inputs y resultados obtenidos.

Rigid Pavement Design - Based on AASHTO Supplemental Guide

Reference: *LTPP DATA ANALYSIS - Phase I: Validation of Guidelines for k-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction*

Results

[Input Form](#)

Project # Túneles 9 de Julio
Description: Pavimentos en los túneles

[Save Data](#)

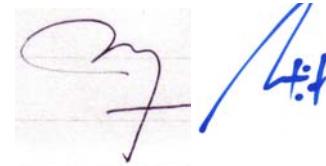
Location: Buenos Aires

Slab Thickness Design

Pavement Type
18-kip ESALs Over Initial Performance Period (million)

JPCP
5,30 million

Especificaciones Técnicas - Túneles 9 de Julio
Pavimentos de los Túneles bajo Avenida 9 de Julio.



Initial Serviceability	4,5	
Terminal Serviceability	2,5	
28-day Mean PCC Modulus of Rupture	700	psi
Elastic Modulus of Slab	4.000.000	psi
Elastic Modulus of Base	700.000	psi
Base Thickness	5,9	in.
Mean Effective k-Value	65	psi/in
Reliability Level	85	%
Overall Standard Deviation	0,39	
Calculated Design Thickness	7,71	in

El resultado indica losas de 20 cm de espesor para las condiciones de cálculo establecidas cuando se considera su apoyo sobre una capa de suelo-cemento de 15 cm de espesor sobre suelo de subrasante de pobre calidad.

Espaciado de Juntas Transversales

De acuerdo con la Guía AASHTO Suplemento 1998 el distanciamiento de juntas transversales resulta igual a 4,0 metros para todos los casos considerados. Estas juntas deberán ser aserradas en una profundidad igual al tercio del espesor de las losas, no llevan barras pasadoras confiando la transmisión de cargas al intertrabado de los áridos.

Verificación de Transferencia de Carga en las Juntas

La verificación de la capacidad de transferencia de carga se realiza prediciendo el descenso de losas según el modelo de losas sin barras pasadoras –por considerar que sólo habrá tránsito liviano- y luego de compara el desnivel obtenido con el admisible. El modelo de predicción desarrollado por AASHTO 98 tiene como datos de entrada: el número de ejes equivalentes, un coeficiente de drenaje, la tensión soporte máxima del concreto, la transferencia porcentual establecida en 0,45, el diámetro de la misma y su módulo de elasticidad, el módulo k de la subrasante, la abertura promedio de la junta, el coeficiente térmico de expansión del hormigón, el rango anual de temperaturas, los días de heladas, y la precipitación media anual.

El espaciamiento de juntas fue establecido en 4,0 metros. Para las condiciones siguientes se cumple con la verificación de transferencia de carga:

- Base estabilizada con cemento debajo de las losas
- Coeficiente de expansión térmica del hormigón: 0,000006 /F
- Rango de temperatura anual: 27 C
- Valor de transferencia por default: 45%
- Número de días con temperaturas bajo cero anuales: 10
- N8,2: 5,3 millones

- Coeficiente de drenaje modificado: 1,10
- Descenso medio crítico: 1,5 mm para juntas espaciadas menos de 8 metros
- RESULTADO: 1,27 mm VERIFICA

Dado que se trata de un pavimento en un túnel las condiciones del clima son benignas para la zona en cuestión, las cargas son livianas, de manera que la verificación resulta positiva.

Verificación a la Rotura de Esquina

Para verificar la posible rotura en las esquinas de losas en juntas transversales sin barras pasadoras se han tenido en cuenta como entradas de datos el gradiente de temperaturas y la tensión sobre la cara superior de la losa. Con dichos datos se calcula la tensión de tracción en la cara superior de la losa que resultó igual a 248 psi que comparado con la máxima tensión de tracción en la cara inferior de la losa igual a 282 psi para las condiciones de proyecto permiten verificar positivamente.

Barras de Unión en las Juntas Longitudinales

Se especifican barras de unión de acero conformado de 16 mm de diámetro y 1,20 m de longitud con una separación entre barras igual 0,90 m.

PERFILES ESTRUCTURALES ADOPTADOS

En función de los resultados obtenidos en los distintos diseños de pavimentos los perfiles estructurales transversales quedan finalmente definidos como se indica a continuación.

Túneles Av 9 de Julio	Espesor
Carril 3,65 m Sobre suelos cohesivos	cm
Hormigón H30 Juntas T c/4m	20
Suelo-Cemento	15
Relleno de suelo mejorado con cal	20
Subrasante suelo pobre	

El hormigón H30 tiene juntas transversales de contracción cada 4 metros sin barras pasadoras dado que se trata de tránsito liviano. Entre la superestructura y la subrasante de suelos limo-arcillosos se especifica un relleno de suelo mejorado con cal que sirva de apoyo al suelo cemento. Este suelo deberá cumplir con la especificación técnica correspondiente.

Cuando el hormigón se apoya sobre hormigón estructural del túnel su espesor necesario se reduce a losas de 10 cm de espesor con juntas de contracción igualmente espaciadas cada 4 metros y un aditivo adherente entre ambas superficies.

Túneles Av 9 de Julio	Espesor
Carril 3,65 m Sobre Hormigón Estructural	Cm
Hormigón H30 Juntas T c/4m	10
Puente de adherencia	
Hormigón Estructural	

Si bien se toman carriles de ancho igual a 3,65 m, las consideraciones de cálculo son válidas hasta 4 metros de ancho para establecer las juntas longitudinales.

Finalmente cuando se realizan losas de hormigón sobre la condición de apoyo de relleno de mortero de densidad controlada, la estructura responde al siguiente esquema:

Túneles Av 9 de Julio	Espesor
Carril 3,65 m Sobre Relleno MDC	cm
Hormigón H30 Juntas T c/4m	18
Relleno mínimo MDC 3 Mpa	15

El mortero de densidad controlada deberá tener una resistencia mínima de 3 MPa a los 7 días inmediatamente debajo de las losas en al menos 15 cm de espesor. Se entiende que dicho relleno tendrá espesores variables entre 40 y 60 cm.

DEMARCACIÓN HORIZONTAL

Por razones de seguridad en túneles largos –mayores de 1 km – es imprescindible alcanzar un buen contraste de la pintura de demarcación horizontal con el tipo de pavimento en la capa de rodamiento.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARTICULARES

Se redactaron un conjunto de especificaciones técnicas particulares que acompañaran a las especificaciones del Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la DNV, edición 1998 relacionadas con las particularidades de los



distintos materiales a emplear en cada capa estructural y sus procedimientos constructivos.

Las especificaciones técnicas particulares para el presente proyecto están contenidas en archivos separados.

Características del Hormigón: Rige Sección A.I. del Pliego de la DNV Construcción de Calzadas de Hormigón de Cemento Pórtland. Se empleará un H30 con juntas transversales sin barras pasadoras espaciadas cada 4 metros y barras de unión donde sean de aplicación.

Suelos Estabilizados con Cemento, se especifican siguiendo el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la DNV, Sección C.IV. Base o Subbase de Suelo-Cemento con una resistencia a compresión simple de 3 MPa.

Suelos Mejorados con Cal, rige el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la DNV, Sección B.VII. del Pliego de Especificaciones Técnicas Generales, Edición 1998 de la D.N.V.: "Preparación de la Subrasante", con la adición de cal hidratada en polvo para su mejora según especificación técnica particular.

Mortero de Densidad Controlada, se especifica en documento separado.

CONCLUSIONES

Se han planteado soluciones para el diseño de los pavimentos en los túneles bajo la Avenida 9 de Julio en la CABA con el empleo de hormigón simple con juntas transversales sin barras pasadoras. Se distinguen cuatro casos diferentes de apoyo: sobre suelos heterogéneos, sobre suelos limo-arcillosos, sobre hormigón estructural y sobre relleno de mortero de densidad controlada. Para cada uno de ellos se ha establecido el correspondiente perfil transversal y la justificación de cálculo.

Si bien el diseño se ha efectuado en hormigón existen otras posibilidades empleando pavimentos flexibles integrado por mezclas asfálticas y capas de base con suelo estabilizado con ligantes hidráulicos que no han sido incluidos en el presente informe pero que pueden ser empleadas dado que existen fundamentos que demuestran que el uso del asfalto en túneles no presentan riesgos de consideración en relación a incendios y extensión del fuego.

El diseño se ha preparado considerando un período de servicio de 30 años con un mínimo de mantenimiento.

**Pablo E Bolzan
Ingeniero Civil
Mat. Prof. 15492**