

# DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO PARA VIALIDADES DE METROBUS EN LA CIUDAD DE MEXICO

R. MARTINEZ

Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno de la Ciudad de México, México

[rafael\\_mcxal@hotmail.com](mailto:rafael_mcxal@hotmail.com)

J.M. BALAY & Y. BROSSEAUD

Ministerio de Transportes de Francia, Laboratorio Central de Puentes y Caminos, Francia

[balay@lcpc.fr](mailto:balay@lcpc.fr) & [brosseau@lcpc.fr](mailto:brosseau@lcpc.fr)

## RESUMEN

El Gobierno del Distrito Federal (GDF) ha implementado en años recientes diversas políticas de desarrollo sustentable para la construcción y mantenimiento de la infraestructura vial de la Ciudad de México. Una de las políticas más importantes es la construcción de la red de transporte llamada MetroBus, que constituye una alternativa eficaz para el transporte de pasajeros a través de la ciudad.

Concebida como una red de transporte de pasajeros en sitio propio en vialidades importantes, la red de MetroBus utiliza autobuses de características especiales, las cuales debido a su circulación canalizada inducen esfuerzos muy elevados en las infraestructuras, y principalmente en el pavimento. Además, la composición muy variable del suelo de la Ciudad de México hace mucho más difícil el establecimiento de estructuras de pavimento estándares de resistencia suficiente.

El trabajo conjunto entre el GDF y el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC) ha permitido el establecimiento de un catálogo de estructuras de pavimento especialmente adaptadas siguiendo la metodología francesa de dimensionamiento. Los dimensionamientos resultantes están adaptados a los suelos de la Ciudad de México y están en función de la calidad de los materiales utilizados, tomando en cuenta sus desempeños en laboratorio, pero también las condiciones de realización en obra.

Actualmente, los trabajos de la colaboración prevén la formulación de estos materiales estructurales que permiten cumplir los desempeños retenidos en el dimensionamiento, y adaptados al contexto de México.

## 1. LA RED DE METROBUS

La Ciudad de México, con su zona conurbada, es una de las zonas más pobladas del mundo con cerca de 20 millones de habitantes [1]. A pesar de redes de transporte importantes atravesando la ciudad, que incluyen 12 líneas de Metro, el sistema Trolebus (autobús eléctrico semi-confinado), autobuses y microbuses; el transporte público de pasajeros en la ciudad sigue siendo uno de los problemas mayores. Desde hace ya muchos años, la circulación de vehículos particulares se volvió extremadamente difícil con las implicaciones muy importantes sobre la calidad del aire y en consecuencia sobre la salud, la seguridad y el confort de los habitantes de la ciudad.

Desde 2006, la Ciudad de México comenzó a construir una red de transporte público de transporte en sitio propio en vialidades principales (ejes viales urbanos). Esta red prevé mejorar el transporte de superficie, a través de una reorganización de vialidades y la recuperación de estaciones públicas, disponiendo de un servicio de transporte más rápido,

seguro y mejor organizado, reduciendo de manera considerable las emisiones de gases de efecto invernadero [2]. Actualmente, la red cuenta con 3 líneas que sirven a más de 67 km, con una capacidad de más de 620 mil pasajeros. Está previsto aumentar la capacidad de transporte con la construcción de 2 nuevas líneas en 2011.

Desde la puesta en servicio de la línea 1, la circulación canalizada de los autobuses muy pesados (casi 40 toneladas de carga) a implicado degradaciones rápidas y fuertes de los pavimentos antiguos (no concebidas para este tipo de transporte), incluidas las capas estructurales, incluso en sitios donde el suelo de soporte presentaba una resistencia elevada. Por esta razón, la secretaría de obras y servicios de la Ciudad de México vio rápidamente la necesidad de adaptar estructuras de pavimentos diseñadas especialmente para soportar las cargas específicas inducidas por la circulación de los MetroBus.

La gran variabilidad de la naturaleza de los suelos del valle de México conlleva el problema de la falta de homogeneidad en la resistencia de las plataformas que permiten la construcción de estructuras durables de pavimento. En efecto, el centro de la Ciudad de México reposa sobre un antiguo lago (zona compresible), donde las condiciones de suelo muy saturado de agua conducen a resistencias mecánicas muy bajas. Esto impone tratamientos previos de los suelos antes de construir las capas de fundación de los pavimentos.

En 2009, el gobierno de la ciudad de México (GDF) firmó un convenio de colaboración con el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC), del ministerio francés de transporte, permitiendo una transferencia de tecnología para el diseño y dimensionamiento de pavimentos siguiendo las metodologías francesas. Una de las tareas de esta colaboración trata el dimensionamiento de estructuras de pavimentos especialmente diseñadas para la red MetroBus a través de toda la ciudad y sobre todo tipo de suelos, representando desde resistencias muy bajas (zonas lacustres) a muy elevadas (macizos rocosos).

En este contexto, el objetivo es establecer un catálogo de estructuras de pavimentos capaces de soportar las demandas de la red MetroBus para una vida de servicio de 30 años, adaptables a las condiciones específicas de los suelos de la ciudad, utilizando materiales especialmente formulados para cada capa del pavimento, siguiendo los métodos y las prácticas de construcción recomendadas por la experiencia francesa.

## **2. PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONAMIENTO PROPUESTO**

El dimensionamiento de estructuras de pavimento en carreteras y autopistas de la red nacional francesa se efectúa según el método racional LCPC-SETRA. El conjunto de hipótesis y de modalidades de utilización del método racional es descrito en la guía técnica diseño y dimensionamiento de pavimentos [3]. El método racional se apoya en el programa Alizé-LCPC, que facilita las condiciones prácticas de utilización-

Este procedimiento de dimensionamiento es hoy día ampliamente difundido en el extranjero. Bajo proposición y control del LCPC, el método racional ha sido utilizado para el dimensionamiento de estructuras para sistemas de transporte en común sobre ruedas o sobre rieles en diferentes proyectos en Francia y en el extranjero. Así, para el dimensionamiento de la estructura del pavimento del futuro MetroBus de la Ciudad de México, este método general de dimensionamiento ha sido utilizado, mediando las diversas adaptaciones descritas en el presente documento.

El método de dimensionamiento racional toma en cuenta los siguientes factores:

- el tráfico,
- el medio ambiente (datos climáticos),
- la plataforma de soporte del pavimento,
- los materiales del pavimento,
- la calidad de realización del pavimento,
- la exigencia del nivel de servicio fijado por el gestor de la obra, que es directamente traducida en el dimensionamiento a través de un valor de riesgo de ruptura al final de la vida de servicio del pavimento.

## 2.1. El tráfico

Los pavimentos son dimensionados en función del tráfico de vehículos pesados (por ejemplo autobús, hyperbús, tranvía en medio urbano). En las aplicaciones carreteras y de autopistas, se expresa en términos del tráfico acumulado de vehículos pesados a lo largo de la vida de servicio del pavimento (TC). TC es calculado por la fórmula siguiente:

$$TC = 365MJA \left( d + \frac{td(d-1)}{2} \right)$$

MJA: número diario de vehículos pesados por sentido de circulación en el carril más cargado a la puesta en servicio (promedio diario anual),  
t: tasa anual de crecimiento lineal del tráfico,  
d: vida de servicio, en años.

Este tráfico de vehículos pesados está constituido de combinaciones variables teniendo diferentes cargas y configuraciones de ejes. El método de cálculo implica la conversión de este tráfico compuesto TC, en un número acumulado de ejes de referencia, NE, equivalente al tráfico acumulado TC en términos del daño del pavimento. En Francia, el eje convencional de referencia es el eje simple de ruedas gemelas de peso total de 130 kN (32.5 kN por rueda). El coeficiente de agresividad promedio del tráfico (CAM) permite efectuar esta conversión):

$$NE = TC \cdot CAM$$

La agresividad CAM de los ejes es determinada de manera teórica. El cálculo necesita el conocimiento estadístico de las diferentes configuraciones de ejes, y las cargas asociadas, constituyendo un tráfico pesado dado. Estas condiciones son generalmente proporcionadas por los sistemas de análisis de tráfico pesado (contado y pesado) que equipan las redes carreteras. Para cada tipo de eje (simple, tándem o tridem), estos datos son traducidos en histogramas de porcentajes de ejes contra cargas sobre los ejes.

En la red nacional, los estudios de análisis del tráfico pesado son actualizados periódicamente y los coeficientes de CAM corresponden a valores promedios nacionales. La agresividad no se expresa por una relación única. En efecto, los valores de CAM dependen, además de la composición del tráfico, del material y de la estructura del pavimento (flexible, asfáltica espesa (caso del presente artículo), semi-rígida (grava tratada con ligantes hidráulicos), rígida (concreto hidráulico)).

## 2.2. El medio ambiente – los datos climáticos

La temperatura influencia el comportamiento de los diferentes tipos de pavimentos:

- por su influencia en las características mecánicas de los materiales asfálticos, en razón de su comportamiento termo-visco-elástico,
- por las variaciones de abertura de fisuras en los materiales tratados con ligantes hidráulicos o concretos hidráulicos, que acompañan las variaciones cíclicas de temperatura,
- por las deformaciones de curvatura de las losas debidas a los gradientes térmicos dentro de los pavimentos rígidos.

Para los materiales asfálticos, los cálculos son hechos considerando una temperatura constante del material del pavimento, llamada temperatura equivalente. En Francia metropolitana, la temperatura equivalente utilizada para los dimensionamientos corrientes es de 15°C, valor resultante de histogramas tipos de distribuciones anuales de las temperaturas dentro de los pavimentos asfálticos. Para el dimensionamiento en el extranjero, un valor diferente será utilizado, en función del clima considerado. En el presente estudio del MetroBus de México, el valor de temperatura equivalente adoptado será de 20°C.

La estructura del pavimento que resulta del dimensionamiento mecánico es igualmente objeto de la verificación helada-deshielo. En presencia de suelos sensibles a la helada, esta verificación pretende asegurar que el continuo tráfico de vehículos pesados durante los periodos de deshielo no se traduzca en una degradación acelerada del pavimento. Esta verificación helada-deshielo no tiene objeto en el caso del presente estudio para el MetroBus de México.

### 2.3. La plataforma de soporte

La guía técnica Realización de terraplenes y capas de forma [4] caracteriza los suelos de soporte, la selección de materiales utilizables para la capa de forma y sus condiciones de puesta en obra. Para el dimensionamiento de la estructura del pavimento, el suelo de soporte esta descrito por un valor del módulo de Young y del coeficiente de Poisson. El enfoque racional se diferencia así netamente de los métodos empíricos tales como el método AASTHO, para los cuales la resistencia del macizo de soporte esta representada por el índice CBR del suelo.

### 2.4. Los materiales de pavimento

Un conjunto de normas codifica las diferentes familias de materiales de pavimento, definiendo para cada una de ellas las clases de desempeños según la calidad de los constituyentes y ciertas propiedades físicas y mecánicas de los compuestos. Para los materiales normalizados, los valores de resistencia mecánica y de deformabilidad retenidos son deducidos de los valores promedios obtenidos de la fórmula de base, establecida a partir del estudio de formulación realizado en laboratorio con los constituyentes de la obra. El nivel de estudio de formulación, adaptado al contexto de la obra, permite evaluar la aptitud a la compactación (ensayo de la prensa de cizallamiento giratoria), la verificación de la resistencia al agua (ensayo Duriez) y a las roderas (ensayo del simulador de roderas LPC), determinando las propiedades mecánicas retenidas para el dimensionamiento, como el módulo (función de las temperaturas y de la frecuencia seleccionadas) y la resistencia a la fatiga. La determinación de las solicitaciones admisibles en función de la fatiga de los materiales toma en cuenta la dispersión que caracteriza los resultados de los ensayos de fatiga en laboratorio.

## 2.5. La calidad de realización de los trabajos de construcción

El método de dimensionamiento se aplica a situaciones para las cuales las prescripciones y las reglas del arte concernientes a la fabricación y la puesta en obra de los materiales son totalmente respetadas. Sin embargo, ella permite integrar las diferencias entre los espesores nominales de las capas de materiales y los espesores realmente colocados en obra. Esto se efectúa a partir de hipótesis sobre las dispersiones de espesor, producto de observaciones en pavimentos. Los desempeños en fatiga de los materiales tratados son igualmente caracterizados por su dispersión estadística (ver más abajo, parámetro SN).

## 2.6. Cálculo mecánico de las sollicitaciones creadas por el tráfico

Se considera particularmente en este párrafo, los materiales de pavimentos previstos para la realización de la estructura del MetroBus de México, especialmente los materiales hidrocarbonados de mayor desempeño en el plano mecánico, excluyendo los materiales tratados con ligantes hidráulicos y los concretos hidráulicos.

El dimensionamiento consistirá en determinar:

- por una parte, las sollicitaciones creadas por el tráfico en las diferentes capas de materiales. Esta evaluación reposa en un modelo teórico en el cual el pavimento es asimilado a un macizo multi-capas, semi-infinito, adoptando para todos los materiales un comportamiento lineal, elástico e isótropo.
- por otra parte, las sollicitaciones admisibles para los materiales constituyentes del pavimento, en relación al daño por fatiga.

### 2.6.1. Los materiales asfálticos

Estos materiales están definidos en las normas francesas, producto de la normalización europea, y repartidas en tres categorías:

- ensayos de caracterización por desempeño en laboratorio NF EN 12697 -1 à -43 [5],
- clasificación de mezclas según su desempeño y usos, así como por su condición de fabricación y control NF EN 13108-6 à -21 [6],
- condiciones de puesta en obra y de recepción NF P 98-150-1 [7].

En relación al dimensionamiento de pavimentos, la caracterización mecánica trata de:

- la susceptibilidad del módulo de Young en relación a la temperatura y de la velocidad de carga. Esta susceptibilidad es evaluada mediante los ensayos de módulo y de pérdida de linealidad o de flexión dinámica.
- el comportamiento en fatiga.

El comportamiento en fatiga es apreciado mediante el ensayo en fatiga por flexión practicado a la temperatura de 10°C y la frecuencia de 25 Hz. La curva de fatiga del material expresa la relación entre la deformación de tracción por flexión  $\varepsilon$  soportada por la muestra, y el número de cargas N, por el cual se observa su ruptura por fatiga, según el criterio convencional de ruptura a 50% de reducción de la rigidez de la probeta. Esta curva de fatiga está representada por una relación de forma siguiente, correspondiendo a una recta bi-logarítmica (modelo de fatiga de Wöhler):

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_6} = \left( \frac{N}{10^6} \right)^b$$

con:

b: pendiente de la recta de fatiga,

$\varepsilon_6$ : deformación en tracción por flexión para la cual la ruptura es obtenida bajo 1 millón de aplicaciones de carga, en las condiciones 10°C, 25Hz.

Los resultados de ensayos de fatiga se caracterizan por la fuerte dispersión de los resultados, que esta descrita por la dispersión  $\delta N$  sobre el logaritmo de N.

Para el dimensionamiento, la determinación de las solicitaciones admisibles por los materiales deviene directamente de la curva de fatiga obtenida en laboratorio, ponderada por los diversos coeficientes permitiendo tomar en cuenta los factores tales que la temperatura del pavimento en servicio, el riesgo de ruptura admitido producto de la vida de servicio, etc.

La expresión de las deformaciones admisibles es la siguiente:

$$\varepsilon_{\text{adm}} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz}) \left( \frac{NE}{10^6} \right)^b k_\theta k_c k_r k_s$$

donde  $k_\theta$ ,  $k_c$ ,  $k_r$  y  $k_s$  son coeficientes ponderadores que serán explicados más adelante.

### 3. ADAPTACIONES AL DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS GUIADOS O CANALIZADOS SOBRE NEUMÁTICOS

El procedimiento de dimensionamiento racional aplicado al caso de plataformas para sistemas de transporte guiados o ultra canalizados sobre neumáticos necesita diversas adaptaciones, que serán simplemente enlistadas en esta parte. Ellas conciernen el cálculo de la estructura, los desempeños de los materiales y los datos del tráfico.

#### 3.1. Desempeños de materiales

El dimensionamiento de estructuras de pavimentos urbanos [8] prevé dos niveles de calidad de materiales de las capas de asiento.

La clase de calidad Q1 corresponde a materiales cuyos desempeños mecánicos mínimos son los especificados por las norma.

La clase de desempeños reducidos Q2 permite tener en cuenta las condiciones particulares de realización en obra en medio urbano (presencia de obstáculos diversos en profundidad (redes, canalizaciones), en trazo, en intersección (con la vía existente), fases de construcción, uso de espacio,...).

- Los desempeños serán así disminuidos en:
  - 20% para los módulos de materiales hidrocarbonados,
  - 10% para las deformaciones admisibles en fatiga.

Por otra parte, para los materiales asfálticos, los valores de módulos de Young tendrán en cuenta la velocidad de circulación en medio urbano, reducida en relación a las velocidades en carretera. Esto será realizado adoptando para la selección de los módulos, una frecuencia más baja que la de 10 Hz que será utilizada para los dimensionamientos

corrientes. Teniendo en cuenta la experiencia adquirida, en estudios de cálculo de obras de naturaleza comparable, el valor de 5 Hz será retenido para el presente estudio. El corresponde a velocidades de circulación de vehículos comprendidas entre 20 y 40 km/h.

### 3.2. Tráfico

#### 3.2.1. Cálculo de la agresividad de un vehículo de transporte urbano.

Conociendo el histograma de cargas por tipo de eje para un tráfico dado, su agresividad está dada por el coeficiente CAM:

$$CAM = \frac{1}{NPL} \left[ \sum_i \sum_j K_j n_{ij} \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \right]$$

con:

NPL: número de configuraciones de carga considerados.

K: coeficiente característico del tipo de eje (simple, tandem, tridem,...)

n<sub>ij</sub>: número de ejes elementales de tipo j y de clase de carga P<sub>i</sub>.

#### 3.2.2. Ausencia de barrido o canalización total

Una de las características de la circulación de sistemas de transporte urbano es la canalización casi total de la circulación, traducida por un aumento de su agresividad. Este efecto será tomado en cuenta por un coeficiente de agresividad adicional.

Según las investigaciones realizadas (carrusel de fatiga de pavimentos LCPC de Nantes) y la experiencia adquirida, su cálculo reposa en el cálculo, con ayuda del modelo mecánico, del perfil transversal de las solicitaciones soportadas por el material, y sobre el dato del histograma de barrido lateral estándar del tráfico. El cálculo del coeficiente de agresividad adicional C<sub>Ac</sub> se efectúa aplicando el principio de adición de daños (principio de Miner), su expresión es la siguiente:

$$CA_e = \sum_i p_i \cdot \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \right)^{\frac{1}{b}}$$

con:

i: índice de una serie finita describiendo la excentricidad lateral de la carga en relación al eje longitudinal medio de circulación,

σ<sub>i</sub>: solicitación en el material, correspondiente a la excentricidad del índice i de la carga,

p<sub>i</sub>: porcentaje del tráfico aplicado con la excentricidad del índice i.

#### 3.2.3. Toma en cuenta de los cruces con la vialidad urbana

El dimensionamiento de la estructura de pavimento en las zonas de cruces deberá tener en cuenta el tráfico transversal, cuyos efectos se adicionan a aquellos de los vehículos de transporte urbano. Dos situaciones de dimensionamiento deben así ser examinados:

- secciones corrientes en alineamiento recto o en curva y en zonas de estación;
- zonas de cruces, tomando los efectos acumulados de la circulación del MetroBus, y de una circulación transversal para un tráfico dado.

En las partes en curva de la vía o en las zonas de aceleración o de frenado, el pavimento soporta sollicitaciones de naturaleza tangencial, adicionales a aquellas soportadas en situación normal (alineamiento recto y velocidad constante). Como éste es el caso de para el dimensionamiento de estructuras viales, y principalmente de pavimentos urbanos, se considera que los efectos de estos esfuerzos adicionales se limitan a la capa superficial de rodamiento y que ellos no influyen en el dimensionamiento estructural del pavimento (capa de base y capa de fundación), en razón de la fuerte difusión de los esfuerzos tangenciales en el espesor de la estructura. En estas zonas particulares, una atención especial deberá tenerse para la selección de la capa de rodamiento para las estructuras asfálticas (principalmente en relación a los riesgos de desprendimiento y de roderas).

#### **4. DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO EN MATERIALES ASFÁLTICOS**

Las características del MetroBus (cargas elevadas sobre ejes), el tráfico intenso y su extrema canalización en sitio propio necesitan, de la parte de los materiales asfálticos, un muy elevado nivel de desempeño en relación a la resistencia a las roderas y del daño por fatiga.

Para responder a este objetivo, el empleo de materiales asfálticos de alto desempeño, cumpliendo la norma NF EN 13108-1 [6] se prevé:

- en capa de asiento de pavimento:
  - grava asfáltica de clase 4 (GB4): esta solución no será estudiada en el presente trabajo,
  - o mezcla asfáltica de alto módulo de clase 2 (EME2). Este material es, gracias a la utilización de ligante duro, el material asfáltico de mejor desempeño, autorizando dimensionamientos de pavimentos ligeramente reducidos en relación a las gravas asfálticas, y presentan una muy buena resistencia a las roderas y mejor que la de la GB4.
- en capa de rodamiento:
  - en sección corriente: concreto asfáltico semi-grueso de clase 3 (BBSG) o concreto asfáltico de alto módulo (BBME). Solo la solución BBME será estudiada aquí, ya que ella es más eficaz en términos de reducción de los esfuerzos mecánicos;
  - a la derecha de estaciones y de zonas críticas (rampas, deceleración, curva a bajo radio) presentando riesgos elevados de roderas : la utilización de mezclas drenantes coladas con lechada de cemento de 4 cm de espesor (producto no normalizado) es una solución a examinar. Además, esta mezcla colada permitiría diferenciar bien visualmente las zonas de estación, con una seguridad mejorada.

La mezcla asfáltica de alto módulo de clase 2 (EME2) está compuesta a partir de un asfalto duro (clase 10/20, 15/25 incluso 20/30) o por el empleo de aditivos (de naturaleza a endurecer el asfalto) y de un esqueleto granular particularmente resistente y estructurado para asegurar una muy buena resistencia a las deformaciones. La dimensión granular máxima en a menudo de 14 mm, para conferir una excelente homogeneidad al compuesto, permitiendo una muy buena compactación, uniforme en toda la gama del espesor retenido: 7 a 12 cm. Para compensar el carácter frágil del ligante, el espesor de la película del ligante es aumentado, cercano al de las mezclas de superficie (dosificación promedio cerca de 6%). Esto confiere a la mezcla una muy buena compactabilidad, un buen llenado de vacíos, conduciendo a un muy buen comportamiento en fatiga. Esta



mezcla EME2 es el material asfáltico de mejor desempeño en el plano de dimensionamientos de pavimentos a alto tráfico, canalizado y agresivo. Además, presenta una muy buena resistencia a las roderas, la más elevada entre los materiales asfálticos estructurales.

Se recordará que el origen de este material se remonta al año 1985, cuando fue desarrollado para realizar trabajos de reforzamiento de pavimentos de tráfico elevado y canalizado en medios difíciles: urbano. Una guía específica describe las propiedades y usos de este material [9]. Des entonces, este material ha sido probado y ampliamente utilizado. Se estima que se realizan alrededor de 5 millones de m<sup>2</sup> de mezclas EME2 cada año en Francia. Su uso se diversificó con aplicaciones numerosas en construcción nueva de pavimentos en autopistas o redes carreteras nacionales importantes, pero igualmente en pistas aeronáuticas soportando cargas extremadamente pesadas (Air Bus A380), en zonas de muelles industriales soportando cargas muy pesadas (porta contenedores) y claro en transportes en común para autobuses especiales, en sitio propio como en la región parisina o en Nantes para la línea de BusWay.

Los balances de comportamiento son particularmente satisfactorios. No están constatadas deformaciones consecuencia del uso de ligantes duros, como la fisuración por contracción, ya que la formulación, pero también las condiciones muy cuidadas de su realización y aplicación de capas de superficie bien adaptadas, han permitido compensar esta rigidez. La búsqueda de una capa de buen desempeño y sobre todo de muy buena homogeneidad a permitido desarrollar esta técnica, de una parte la disminución de espesores de material (competitivo en el plano de la conservación de recursos de materiales no renovables), y por otra parte el aumento de la duración de servicio de los pavimentos sometidos a muy fuertes esfuerzos mecánicos.

La experiencia francesa adquirida en el transcurso de este último cuarto de siglo en esta técnica se ha exportado ampliamente al extranjero, por transferencias de tecnología, necesitando la adaptación de estos productos a los contextos diferentes en términos de clima, carga y materiales disponibles. Los ejemplos de aplicación son numerosos desde alrededor de unos 10 años en Europa (Bélgica, Reino Unido, Suiza, España, Italia, Polonia, República Checa,...) y más recientemente en África del Norte, pero igualmente en Chile y Brasil. Los resultados son igualmente alentadores.

El concreto asfáltico de alto módulo (BBME) será de clase 3 a fin de presentar los mejores desempeños en roderas: su espesor de aplicación óptimo es de 5 a 7 cm por capa, para resistir bien los esfuerzos tangenciales de cizallamiento al nivel de la interface. La rugosidad de esta mezcla es cerrada, lo que permite una buena transferencia de las sollicitaciones, reduciendo el riesgo de desprendimientos. De todas maneras, permanece importante (mancha de arena cercana a 0.5 mm) para ofrecer un nivel de adherencia suficiente para buenas condiciones de frenado en tiempos de lluvia.

Finalmente, se observará que el dimensionamiento de las capas asfálticas de asiento no distingue las secciones corriente en alineamiento recto, de las secciones en curva, ni de las zonas de estaciones. En efecto, el dimensionamiento considera que los efectos de los esfuerzos adicionales de cizallamiento ligados a las curvas y al frenado se limitan a la capa superficial de rodamiento. Estos son sin influencia sobre el funcionamiento estructural del pavimento (capa de base y capa de fundación) en razón de la difusión de los esfuerzos tangenciales en el espesor de la estructura.

#### 4.1. Selección de la capa de superficie

##### 4.1.1. *Materiales propuestos en sección corriente*

La capa de superficie comprende:

- la capa de rodamiento, capa superior del pavimento sobre la cual se aplican directamente los efectos de los neumáticos y también las agresiones del clima;
- en caso contrario, la capa de transición que asegura la unión entre las capas de asiento y la capa de rodamiento.

La canalización total de los vehículos MetroBus necesita en principio por parte de los materiales asfálticos, muy buenos desempeños contra las roderas. No existe actualmente un modelo predictivo del comportamiento en roderas de los materiales asfálticos (en tanto que estos modelos existen para predecir el daño por fatiga de los materiales de pavimentos).

En el establecimiento de proyectos carreteros y de autopistas, la justificación en relación a las roderas de los materiales asfálticos es realizada principalmente sobre bases empíricas, a menudo en referencia con los resultados sobre pavimentos en servicio, obtenidos en un contexto similar o vecino del proyecto estudiado. Para los tranvías sobre neumáticos, sistemas de transporte en común recientes, no disponemos claro esta de estas experiencias. Los pocos datos disponibles al día de hoy en Francia (Caen, Nancy) invitan a una gran prudencia.

La capa de superficie solo interviene por su espesor total en el dimensionamiento del pavimento. La selección del tipo de revestimiento resulta en general de un compromiso entre los dos objetivos siguientes:

- la resistencia a las roderas. En este plano el BBSG (concreto asfáltico semi-grueso) y el BBME (concreto asfáltico de alto módulo) son los de mejor desempeño en la gama de concretos asfálticos normalizados. Su resistencia a las roderas es equivalente. En relación al solo comportamiento a las roderas, la realización de una capa única de BBSG de espesor de 5 cm, granularidad 0/10 mm, podría ser recomendada en el presente caso. Esta solución no convendría sin embargo en las zonas sensibles tales como las estaciones, vueltas cerradas, cruceros y otras zonas de frenado.
- las calidades de uniformidad y de nivelación. Estas solo pueden ser optimizadas previendo la puesta en obra de mezclas de superficie en dos capas (capa de rodamiento y capa de transición). El simple criterio de uniformidad y de nivelación conduciría a recomendar en el presente caso la colocación de concreto asfáltico delgado (BBM) en dos capas de 4 cm cada una, granularidad 0/10 mm. De todas maneras, este tipo de mezcla delgada no presenta la garantía óptima de resistencia a las roderas, incluso utilizando ligantes especiales, así la selección se orienta hacia un BBM mejor adaptado al tráfico canalizado.

##### 4.1.2. *Capa de superficie en estación y zonas críticas*

Las soluciones previstas a continuación para la capa de superficie no solucionan en principio los riesgos de roderas a los cuales están particularmente expuestas las zonas sensibles tales como las estaciones, las curvas cerradas, los cruceros y otras zonas de frenado. En estas zonas donde el revestimiento es objeto de fuertes sollicitaciones de cizallamiento longitudinal o transversal, la colocación de una capa de rodamiento en mezclas asfálticas drenantes coladas con lechada de cemento es una solución

interesante. Esta ha sido probada en aplicaciones urbanas, por ejemplo en Paris para el revestimiento de estaciones de autobuses y en Nantes en los carriles del BusWay.

De todas maneras, su empleo generalizado en todo el proyecto no parece realista, en razón de un costo elevado, de plazos de ejecución más complicados que para las mezclas clásicas, en fin de apego a su colocación: trabajos en buen tiempo y cuidados particulares a aportar a la realización. En fin, se limitará la colocación de mezclas coladas en distancias relativamente bajas (del orden de cincuenta metros), a fin de evitar los riesgos de fisuración transversal por contracción del material.

Para la selección de materiales utilizados en capa de rodamiento y en capa de transición en secciones corrientes fuera de zonas sensibles, el valor de 5% podría ser retenido como profundidad máxima de rodera medida en laboratorio con el simulador LPC (bajo 30 000 cargas, temperatura 60°C). A esto corresponde la clase 3 de materiales en el sentido de la norma.

Las propuestas de materiales de capa de rodamiento siguientes serán retenidas para los cálculos de dimensionamiento. A nivel de la puesta a punto final de un proyecto, los productos asfálticos anti-roderas presentando desempeños superiores a los concretos asfálticos normalizados podrían igualmente ser evaluados. Se tratará generalmente de propuestas de empresa, validadas sobre la base de opiniones técnicas y de desempeños en roderas evaluadas por ensayos selectivos.

La norma europea NF EN 12697-22, para la determinación de la resistencia a las deformaciones permanentes [10], reagrupando 3 equipos de ensayo de tipo simulador de roderas, recomienda el uso del equipo de modelo grande (simulador LPC) para las mezclas que deben resistir cargas pesadas (eje soportando una carga superior o igual a 13 toneladas). Se recomienda así la selección de este equipo para validar los materiales aplicados en zona sensibles (estaciones, curvas cerradas, cruceros,...), pero igualmente para zonas corrientes.

#### 4.2. Características mecánicas de los materiales en capas de asiento

Los valores de los parámetros de temperatura equivalente, la frecuencia de sollicitación y la selección de las hipótesis Q1 o Q2 que preceden conducen a los parámetros E y  $\epsilon_6$  siguientes:

**Tabla 1** - Valores de los parámetros de cálculo de materiales BBME y EME2

Calidad de realización	Módulo E 20°C-5Hz (Mpa)	$\epsilon_6$ 10°C-25Hz ( $\mu\text{d}\acute{e}\text{f}.$ )	-1/b	SN	Sh (m)	Kc
Q1	4800	/	/	/	/	/
Q2	3840	/	/	/	/	/
Q1	8800	130	5	0.25	0.025	1
Q2	7040	117	5	0.25	0.025	1

#### 4.3. Suelos de soporte

En ausencia de datos precisos sobre la naturaleza y las características hídricas y mecánicas de los suelos de soporte encontrados en las futuras líneas de MetroBus, las hipótesis siguientes han sido adoptadas para el presente estudio:

- 3 niveles de resistencia serán examinados:

- Nivel PF2 (50 MPa mínimo).
- Nivel PF3 (120 MPa mínimo).
- Nivel PF4 (200 MPa mínimo).
- En cruce con una vialidad urbana mediana o fuertemente cargada, una plataforma mínima PF3 será exigida.
- Los datos disponibles no permiten definir las soluciones de tratamiento de los suelos en el lugar y de capas de forma tratadas o no tratadas a realizar, con el fin de alcanzar los niveles de resistencia retenidos aquí.

#### 4.4. Agresividad del MetroBus

Como indicado antes, la corrección en relación al tráfico carretero clásico toma en cuenta:

- el histograma de cargas en el eje proporcionado por el cuadro de demandas,
- la canalización total de la circulación,
- el efecto de superposición de las solicitaciones dentro de los materiales en los cruces de ramas, en razón de su acercamiento a los carriles.

##### 4.4.1. Toma en cuenta del histograma de cargas en el eje

La determinación de la agresividad de un tráfico dado normalmente toma en cuenta:

- Las siluetas y las configuraciones de ejes de los vehículos constituyendo este tráfico: ejes simples, de ruedas simples o gemelas,
- e igualmente los histogramas de carga para cada tipo de ejes del tráfico. En el caso de sistemas de transporte en común, estos histogramas son directamente deducidos de las características de los vehículos utilizados, y de las estadísticas de utilización del sistema de transporte por los usuarios. Por ejemplo, 2% de ramas cargadas a 1 persona/m<sup>2</sup>, 8% a 2 personas/m<sup>2</sup>, 18% a 2 personas/m<sup>2</sup>, etc.

Un solo tipo de vehículo MetroBus es considerado en el presente estudio: autobús biarticulado Volvo 7300 BRT. En ausencia de datos concernientes a las frecuencias y los histogramas de utilización del sistema por los usuarios, la agresividad ha sido calculada considerando exclusivamente las cargas máximas sobre los ejes, proporcionadas por el constructor:

- Vehículo de 4 ejes simples equipados de ruedas simples y gemelas.
- Presión de inflado: 0.689 MPa. La presión de contacto neumático-pavimento ha sido fijada a 0.62 MPa para todos los ejes, en ausencia de datos más precisos.
- Cargas máximas por eje:
  - eje n°1 de ruedas simples: 7.5 toneladas, sea 3.75 t/rueda
  - eje n°2 de ruedas gemelas: 12 toneladas, sea 3 t/rueda
  - ejes n°3 y 4 de ruedas gemelas: 10.5 toneladas, sea 2.625 t/rueda

Sin histogramas de carga precisos, la toma en cuenta de las cargas máximas se traduce muy probablemente en una sobre evaluación de la agresividad real del tráfico, pudiendo conllevar un fino sobre dimensionamiento de las estructuras de pavimento.

- CA1: coeficiente de agresividad promedio de los vehículos, evaluado en relación al eje de referencia del dimensionamiento estándar francés (eje simple de ruedas gemelas de peso total del 130 kN),

#### 4.4.2. *Toma en cuenta de la canalización total de la circulación*

Consideramos, para caracterizar el barrido lateral del tráfico carretero común el histograma de las excentricidades adoptado en general, principalmente para la reproducción del barrido en el carrusel de fatiga del LCPC. Las deformaciones de tracción-flexión creadas en la capa de EME2 dentro del eje central de la banda de rodamiento (excentricidad nula) por la carga de referencia de 130 kN son calculadas mediante Alize. El coeficiente adicional CAc que traduce la canalización del tráfico de tranvías se obtiene según el procedimiento descrito anteriormente.

#### 4.4.3. *Toma en cuenta de los efectos de cruces*

La distancia mínima entre los ejes de circulación de ruedas de dos ramas al momento de los cruces es igualmente 0.95 m (valor a confirmar en sitio real). El aumento de la agresividad de las ramas que resulta (coeficiente Crt), para la rueda cargada a 58.86 kN (=6 toneladas, cf. Eje n°2), adoptando la hipótesis complementaria siguiente: la situación de cruces se aplica a 10% del tráfico (valores utilizados para los dimensionamientos de los carriles de tranvía sobre neumáticos de la RATP – Transportes Parisinos).

#### 4.4.4. *Evaluación de los efectos de borde*

En razón de la canalización total del tráfico en sitio propio y del confinamiento específico al medio urbano, una reducción del ancho de la estructura puede prevista. Esta situación conduce a un aumento de la agresividad del tráfico. En efecto la circulación de los vehículos a proximidad inmediata de los bordes longitudinales del pavimento induce un aumento de las sollicitaciones de tracción-flexión en los materiales. En ausencia de datos concernientes el corte transversal del futuro pavimento, este coeficiente Clg no es tomado en cuenta.

#### 4.4.5. *Tráfico de MetroBus para el dimensionamiento*

El tráfico del MetroBus para el dimensionamiento del pavimento es fijado por el GDF de México. Es evaluado a 1752 vehículos por semana en 2 carriles, sea 876 vehículos por semana en cada carril, y finalmente:

Tráfico promedio diario anual: MJA = 126 vehículos por día/por sentido

La vida de servicio del pavimento, igualmente especificada por el GDF, es de 30 años. La tasa de crecimiento anual del tráfico en toda esta vida de servicio es fijada a 5% (crecimiento lineal). El tráfico acumulado para el dimensionamiento se eleva así a: NPL = 2.38 millones de vehículos MetroBus.

Por otra parte, se recuerda que el dimensionamiento ha sido efectuado suponiendo que todos los vehículos MetroBus están cargados a su peso máximo (número máximo de pasajeros en cada viaje), sea 40.5 toneladas. A título de comparación, el peso total rodante en carga del BusWay de Nantes es solamente de 29 toneladas.

#### 4.5. *Resultados de los dimensionamientos*

Para el conjunto de las estructuras obtenidas, el criterio determinante en el dimensionamiento es la deformación de tracción por flexión en el fondo de la capa de base en EME2 de las estructuras asfálticas. El criterio concerniente a la deformación vertical en la cima del suelo no es alcanzado jamás, lo que proviene directamente de la rigidez de las capas de asiento.

Tal como en la práctica cotidiana, los valores de los espesores propuestos para el material EME2 son redondeados al centímetro superior.

Finalmente, los resultados de las modelizaciones han permitido establecer un catálogo de estructuras asfálticas muy completo, adaptables a las diferentes situaciones. Este catálogo toma en cuenta la utilización de estructuras estándares (capa estructural más capa de rodamiento) sobre suelos cuya resistencia varía de 50 MPa (PF2), valor bajo para una plataforma de pavimento a fuerte tráfico donde un tratamiento del suelo sería previsible, hasta 200 MPa (PF4). Los espesores de las capas de base construidas con las EME2 (de desempeños conformes a las especificaciones de las normas francesas) varían de 16 cm a 23 cm para Q2.

La capa de rodamiento es siempre en BBME de 7 cm pero es posible de utilizar también los BBSG.

## **CONCLUSIONES**

Sobre la base de las características de cargas sobre los ejes de MetroBus determinadas por el GDF de México, varias configuraciones de estructuras asfálticas han sido dimensionadas. La vida de servicio de las estructuras tomada en cuenta en los dimensionamientos es de 30 años.

Estos tipos de estructuras son usuales y probadas en Francia, principalmente en contextos de utilización idénticos o muy cercanos del MetroBus de México.

Los dimensionamientos han sido realizados considerando hipótesis variables concernientes a la resistencia de la plataforma de soporte: 50 MPa (resistencia baja, a evitar de ser posible), 120 y 200 MPa (muy buena plataforma) y la calidad de los materiales (Q1 o Q2).

Los dimensionamientos descritos aquí son probablemente más seguros. Ellos podrían ser objeto de optimización mediando por parte del GDF de la Ciudad de México datos complementarios concernientes a:

- las características del equipo rodante,
- las modalidades de frecuentación del sistema de transporte MetroBus por los usuarios,
- la naturaleza y las características de los suelos y macizos suportando los futuros pavimentos,
- las características de las soluciones de tratamiento del suelo y de capas de formación eventuales que serán puestas en obra,
- los desempeños mecánicos realmente obtenidos para los materiales asfálticos BBME y EME2, tales como los puestos en obra en el contexto de los trabajos del MetroBus.

Es conveniente señalar que los dimensionamientos propuestos por el presente documento se aplican a las partes de las vialidades situadas en sitio propio, a excepción de las partes compartidas con otros vehículos, así como los cruceros con la vialidad urbana existente. Estas partes del carril deberán obligatoriamente ser el objeto de estudios específicos de dimensionamiento, tomando en cuenta el cruce de las solicitaciones soportadas por los materiales de pavimento en estas partes del itinerario.

En fin, la selección entre las clases de desempeños mecánicos Q1 y Q2 (incluso desempeños intermediarios) se efectuará sobre la base de la evaluación exhaustiva de las condiciones locales propias de la obra del MetroBus. Esta selección deberá obligatoriamente integrar el hecho que las EME2 deberán ser formuladas según el método francés de formulación de las mezclas asfálticas (versión española disponible en el primer trimestre 2011) [10]. Estos son materiales muy exigentes al nivel de los constituyentes y de las condiciones de fabricación y de puesta en obra, necesitando equipos de construcción y trenes de compactación irreprochables de alto nivel de tecnicidad, y equipos de trabajo perfectamente formados.

## RÉFÉRENCES

1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2010). "Censo Nacional de Población y Vivienda 2010".
2. Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal. (2010). "MetroBus. Movilidad de Vanguardia". pp 1-13.
3. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (1994), "Conception et dimensionnement des structures de chaussées: Guide technique". pp 260.
4. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (1992), "Le Guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme: Guide technique". Vol. 1 et 2. pp 200.
5. AFNOR. Norme NF EN 12697 -1 a -43. "Mélanges bitumineux - Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud".
6. AFNOR. Norme NF EN 13108 -6 a -21. "Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux".
7. AFNOR. Norme NF 98-150-1 "Enrobés hydrocarbonés – Exécution des assises de chaussées, couche de liaison et couche de roulement".
8. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions. (2000). "Dimensionnement des structures des chaussées urbaines - Méthodologie de conception d'un catalogue adapté au contexte local". pp 58.
9. Guide technique SETRA – LCPC (novembre 1988) - Renforcement en enrobés à modules élevés en traversées d'agglomérations
10. Guide de formulation des enrobés – LCPC (mars 2011) - Manual de ayuda a la formulación de mezclas bituminosas
11. AFNOR. Norme NF EN 12697-22, "Mélange bitumineux - Détermination de la résistance aux déformations permanentes"