

El proyecto de la nueva M-30

The design of the new M-30

Sandro Rocci. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático. Departamento de Ingeniería Civil: Transportes. ETSICCP. UPM Madrid. srocci@ciccp.es
Miguel Ángel del Val Melús. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático. Departamento de Ingeniería Civil: Transportes. ETSICCP. UPM Madrid. miguel.delval@upm.es

Resumen: Se describe cómo la génesis histórica de la autopista M-30 de circunvalación de Madrid ha dado lugar a unas disfunciones, que el programa de acondicionamiento emprendido por el Ayuntamiento de Madrid va a solucionar. Se pasa revista a los criterios de diseño que se han establecido para este magno proyecto, y se describen las actuaciones comprendidas en él. También se describen los firmes preconizados, y unos criterios para diseñar una nueva señalización más acorde con el carácter urbano de la autopista.

Palabras Clave: Autopista de circulación, Diseño, Firmes, Señalización, Trazado

Abstract: The article describes the characteristics and ensuing problems of the existing Madrid ring road, the M-30, and details the modification programme entrusted by the Madrid city Council to resolve these problems. The author indicates the design criteria employed in this project and the work involved in the same as well as describing the prescribed road surfaces and the criteria to design new road signalling more in line with the urban nature of the ring road.

Keywords: Ring road, Design, Road surface, Signalling, Alignment

1. Introducción histórica

Entre las numerosas actuaciones municipales de las últimas décadas, encaminadas a facilitar el transporte de los madrileños, y que en muchas ocasiones han supuesto "una de arena" para los usuarios del transporte individual, al fin a éstos les va a tocar "una de cal". Desde que en los años 60 del pasado siglo se planificara como parte de la Red arterial de Madrid el cinturón por excelencia, la M-30 (1), en materia de infraestructuras viarias los automovilistas madrileños sólo han recibido algunas actuaciones puntuales destinadas a corregir las disfunciones más notables de la red viaria urbana.

La realización de la M-30 tropezó con muchas dificultades que retrasaron su culminación hasta la década de los 80:

- La idea original contemplaba su cierre por el Norte a través del eje Costa Rica / Cuzco, que luego

fue sustituido por el eje Manoteras / Nudo Norte / Ilustración. Además de provocar la inexplicable presencia de una imponente salida a izquierdas hacia la c/ Costa Rica, este cambio de planes produjo el anómalo resultado de que la continuidad de la M-30 la aseguren los ramales de algún enlace (por ejemplo, el de Manoteras).

- La concepción de la M-30 como un *sistema de calzadas centrales* (para recorridos más largos) y *calzadas laterales* (que aseguran las conexiones con las carreteras transversales y con el viario urbano), unidas de vez en cuando por unos *ramales de conexión*, se limitó a la rama oriental de la M-30 (Avenida del Abroñigal o de la Paz) y, en cierto grado, también a la Avenida de la Ilustración; pero ha presentado algunas discontinuidades (2) que han reducido en gran medida la eficacia del sistema.

(1) Rebassadas ya una M-10 y una M-20 más teóricas que reales, y en todo caso diluidas en el tejido urbano.

(2) Como la que representó la de las calzadas laterales a su paso por el puente de Las Ventas, que fue remediada hace pocos años.

- Una concepción claramente ideologizada (3) del diseño de la Avenida de la Ilustración trajo como consecuencia que en la M-30, que en el resto de su trazado fue originalmente concebida como una autopista urbana de alta capacidad, aparecieran varias intersecciones reguladas por semáforos, con el consiguiente detrimento de su funcionamiento y la generación de una intensa presión ambiental sobre los barrios colindantes.

Es decir: una concepción original audaz para su época se ha visto luego desvirtuada por una política de parches sucesivos e incluso por cambios de criterio. A pesar de lo anterior (y también del marcado carácter estatal de su señalización (4)), la M-30 ha representado un notable éxito, y lo representa todavía: en alguno de sus tramos soporta sin excesivos problemas el paso diario de más de un cuarto de millón de vehículos. Sin su presencia sería no ya difícil, sino ni siquiera posible el desplazamiento de un enorme número de ciudadanos.

2. Las razones de una reforma

Hace ya mucho tiempo que la M-30 ha dejado de constituir una frontera entre la "almendra central" y un entorno más bien peri-urbano: este último también ha pasado a formar parte de la ciudad, consolidándose los barrios y desarrollándose (gracias a la buena accesibilidad que brinda la M-30) nuevas oficinas, centros de ocio y servicios que, incluso, han descongestionado el centro de la ciudad.

Por otro lado, no es de extrañar que una vía concebida hace casi medio siglo se atenga a unos criterios de diseño que hoy se han quedado en gran parte obsoletos:

1. Cuando se diseñó la M-30 prácticamente no se tuvieron en cuenta las consideraciones relacionadas con la protección del medio ambiente. La M-30 ha impreso una apreciable huella ecológica en el tejido urbano, en detrimento de la continuidad de los barrios (*efecto de barrera*) y también, en muchos casos, de su paisaje característico y aun de la calidad de vida de sus habitantes. En relación con esto, es especialmente notable el impacto ambiental del tramo de la actual M-30 contiguo al río Manzanares.

2. Los actuales enlaces de la M-30 con las vías radiales son especialmente delicados desde el punto de vista de la fluidez y de la seguridad:

(3) El "cierre en malla" preconizado por el autor del proyecto, José Antonio Fernández Ordóñez (a.e.p.a.), con mezcla de los tráfico locales con los de circunvalación.

(4) Incomprensible para la mayoría de los madrileños y para la totalidad de los forasteros.

- La sistemática prolongación de las vías radiales hacia el interior de la ciudad ha hecho que tenga cuatro tramos un enlace que hubiera tenido sólo tres, resultando mucho más complejo.

• En varios casos se producen salidas y entradas por la izquierda, algo que los conductores no familiarizados con la red viaria no esperan.

• A pesar de que su buen funcionamiento es uno de los objetivos básicos de una red arterial como la M-30, las conexiones de los enlaces no tienen una capacidad suficiente. Aunque los ramales que conectan con la parte de las vías radiales interior a la almendra central puedan tener unas características menos generosas (puesto que en la mayoría de los casos van a terminar en una circulación en régimen interrumpido por la acción de los semáforos urbanos), los que conectan con la parte de las vías radiales exterior a la almendra central deberían disponer al menos de dos carriles, y no tener cruces a nivel ni trenzados.

• Muchos enlaces tienen una configuración *en trébol completo*, cuyo funcionamiento es muy deficiente si los giros a la izquierda son intensos y los realizan vehículos que llegan agrupados por la acción de los semáforos de la red viaria urbana.

• En muchos sitios no se cumplen las reglas relativas a la continuidad de los carriles de paso y al equilibrio entre el número de éstos y el de los carriles de entrada o de salida (5), dando lugar una explotación poco optimizada.

• La gran proximidad de algunos enlaces perjudica al funcionamiento de la M-30, pues acerca las conexiones con ella y se producen trenzados de corta longitud; aunque al diversificar los accesos, hay una intensidad algo menor en las conexiones.

Por otro lado, a la M-30 nunca se le han aplicado métodos avanzados de gestión de la circulación como, por ejemplo, la dosificación de las entradas a ella (*ramp metering*) (6) para evitar congestionar su tronco.

(5) Antes de una salida, el número de los carriles (sin contar el de deceleración) no debe ser inferior en más de una unidad a la suma del número de los carriles de la salida y del de los del tronco después de ésta.

Después de una entrada, el número de los carriles (sin contar el de aceleración) no debe ser inferior en más de una unidad a la suma del número de los carriles de la entrada y del de los del tronco antes de ésta.

Si una salida o una entrada tiene dos carriles, el respeto de estas condiciones lleva a la necesidad de disponer un carril auxiliar en el tronco, antes de la salida o después de la entrada, en una longitud de 400 - 500 m.

(6) Consiste en regular el número de vehículos que accede al tronco a través de un ramal de entrada, para que la demanda no exceda la capacidad en ninguna sección de aquél, por medio de unos semáforos que den paso de uno en uno a los vehículos a una cadencia determinada por las condiciones de circulación en el tronco. Los vehículos en los ramales de entrada tienen unos tiempos de espera variables según el nivel de congestión, mientras que en el tronco se mantiene un flujo no congestionado. Con ello se consiguen aumentos de la capacidad del orden del 20 %.

El Ayuntamiento de Madrid ha considerado que, al pasar la M-30 a la competencia municipal (7), ha llegado el momento de someterla a una vasta remodelación que, con las técnicas disponibles a principios del siglo XXI, mejore la situación por medio de una inversión que va a figurar entre las primeras del mundo en su género: lo que Madrid merece y necesita.

Las líneas maestras de esta remodelación son las siguientes:

- a) Soterrar una gran parte del tronco y aun de algunos enlaces, recuperando suelo en superficie para otros usos (parques, equipamientos) y restituyendo la continuidad de la trama urbana. En los tramos subterráneos, hay que garantizar que no se produzcan retenciones como consecuencia de problemas que puedan aparecer "aguas abajo" (que se trasladarían remontando hacia "aguas arriba"). Por lo tanto, hay que diseñar con amplitud los tramos a cielo abierto en los que desagüen los subterráneos.
- b) Aumentar la capacidad del sistema viario en su conjunto, mejorando su continuidad y la fluidez de su explotación sin recurrir meramente a aumentar la huella ecológica. En particular, la M-30 perderá las intersecciones reguladas por semáforos de la Avenida de la Ilustración, proyecto que por su valor ingenieril se mantiene en su integridad pero al que se dota de una vía alternativa sin semáforos bajo la Avda. Monforte de Lemos.
- c) Aumentar la seguridad en la circulación, mejorando la legibilidad del sistema viario y reduciendo las maniobras difíciles.
- d) Con estos mismos dos últimos objetivos, remodelar todos los enlaces con las vías radiales exteriores de alta capacidad y con las demás vías de comunicación con el resto de la ciudad:

- Considerándolos no aisladamente, sino como partes de un mismo sistema.
- Destacando claramente la continuidad de la M-30, y manteniendo siempre los tres carriles básicos por calzada que ahora tiene en su casi totalidad (8).
- Completando algunos movimientos que actualmente faltan (ejemplo: Avenida de la Ilustración / Autovía de Colmenar).
- Facilitando la comprensión (la *legibilidad*) del funcionamiento de cada enlace, y de la señalización que lo apoya, aun para conductores no familiarizados con la red viaria madrileña. Los conductores esperan:

1. Que las salidas y entradas se hagan por la derecha y no por la izquierda.
2. Que la importancia del tráfico que sale o entra (su intensidad) sea menor que la del tráfico que sigue.

Donde no se cumplan las condiciones anteriores, la salida o la entrada se tratará como una bifurcación o una confluencia, respectivamente.

e) Las obras se desarrollarán con una incidencia mínima, tanto sobre los usuarios de la M-30 como sobre los ciudadanos de Madrid, en general.

3. La sección transversal

3.1. La anchura de los carriles

Para adecuar la capacidad del tronco a los tráfico que se deriven de las incorporaciones previstas en cada enlace, y mejorar el nivel de servicio (9), se ha considerado preferible aumentar el número de los carriles, aunque éstos resulten algo más estrechos:

- Solamente los vehículos para el transporte de presos exceden de 2,50 m de anchura.
- En las carreteras interurbanas, se considera que los carriles de 3,30 m son algo más seguros que el estándar de 3,50 m.
- Los carriles urbanos tienen, normalmente, 3,00 m de anchura.
- Los carriles estrechos logran una efectiva reducción de la velocidad.

A la vista de lo anterior, y con objeto de aprovechar al máximo el espacio disponible (por ejemplo, al pasar bajo los viaductos del arco Este de la M-30, o Av/ de la Paz) se ha recurrido a estrechar los carriles interiores de la nueva M-30 hasta un mínimo de 3,00 m; aunque donde no haya problemas de espacio se ha procurado que tengan una anchura de 3,25 m, y que el exterior (o la derecha) tenga 3,50 m, para concentrar en él los vehículos pesados y los autobuses (aunque no como un carril a ellos reservado).

En los tramos de trenzado los carriles deben tener como mínimo 3,25 m, y preferiblemente esta misma anchura, ya que el número de carriles será grande (cuatro o más) y se percibirá la amplitud de la sección completa, aunque pueda haber vehículos pesados en cualquier carril.

(7) El 4 de marzo de 2004.

(8) Actualmente los carriles básicos de las calzadas centrales se reducen a dos entre los enlaces con la plaza de José María Soler y de La Paloma, y sobre la obra de paso del enlace de La Zarzuela.

(9) El cual depende de la densidad de la circulación: a igualdad de intensidad, aumentar el número de carriles disminuye la densidad.

3.2. La anchura de los arcenes

En un contexto urbano, y más aún si es subterráneo, no resultan justificados los arcenes por los habituales motivos de seguridad o de capacidad:

- Su función de alojar una detención momentánea (por ejemplo, por una avería) la puede cumplir también un carril adicional: con la ventaja de que mientras esa circunstancia no se produzca, la Intensidad total se repartirá entre un número mayor de carriles, disminuyendo la densidad de la circulación y mejorando el nivel de servicio.
- La presencia de un arcén derecho de una anchura suficiente incita a su utilización abusiva (como un carril más) por los conductores más impacientes, sobre todo cuando haya congestión, o si piensan salir de la calzada o acaban de entrar a ella.

3.3. La plataforma en los túneles

3.3.1. Realizados con tuneladora

La aplicación de la norma estatal 3.1-IC "Trazado" conduciría, en los túneles, a una sección de tres carriles de 3,50 m con arcenes de 1,00 m a cada lado, con un gálibo libre de 5,00 m. Esto implica inscribir en el círculo interior del túnel un rectángulo de 12,50 m de lado y 5,00 de altura, inclinado con un peralte del 7 % (10); sobre él hay que contar con espacio para la señalización (0,80 m) y el falso techo de la ventilación (alrededor de 2,20 m).

Colocando una barrera de seguridad de hormigón adosada al hastial, se llegaría a un diámetro de excavación de algo más de 16 m, lo que se ha considerado excesivo. El remedio más oportuno es reducir algo el gálibo libre: con 4,60 m se llega a un diámetro de excavación de 15,50 m.

Esta sección no cumple estrictamente la norma estatal, pero se aproxima suficientemente a ella. Con ella será posible disponer en el futuro hasta cuatro carriles, con anchuras (de derecha a izquierda) de 3,25, 3,25, 3,00 y 3,00 m, y sin arcenes.

3.3.2. Realizados entre pantallas

La sección tipo entre pantallas admite más posibilidades, ya que las únicas limitaciones están representadas por los gálibos disponibles. El gálibo libre mínimo se ha previsto de 5 m, con carriles de entre 3,25 y 3,50 m de anchura, según la total disponible y el número de carriles. Las transicio-

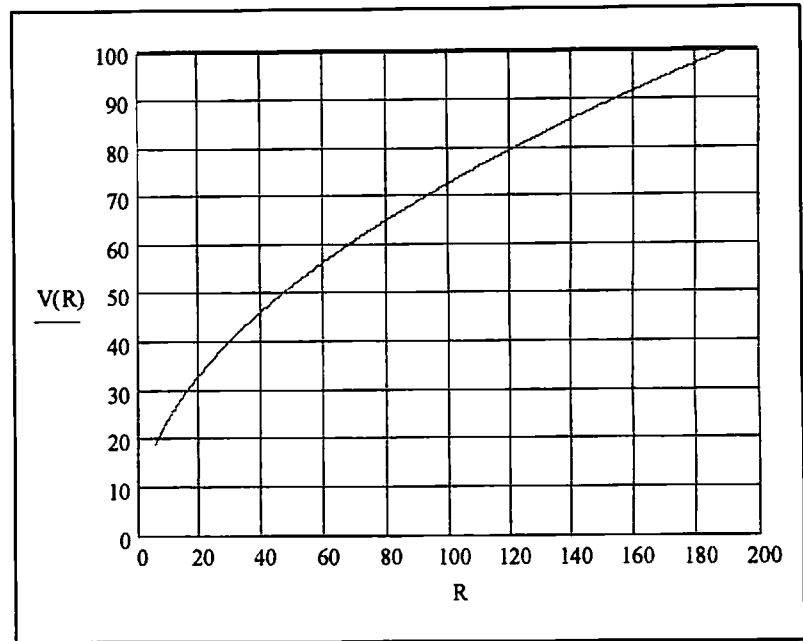


Fig. 1.

nes de la anchura se han previsto en un distancia mínima de 50 m por cada 10 cm de variación de la anchura, a fin de que sean poco perceptibles.

En los tramos subterráneos que discurren entre pantallas, especialmente en los ramales de los enlaces, el hastial interior de una curva limita la visibilidad. Definiendo el radio R por el borde interior de la calzada, y tomando un peralte del 5 % y una resistencia al deslizamiento transversal igual al 40 % de un total de 0,90 (11), un vehículo que circule a 1,5 m de dicho borde interior no podrá superar sin deslizar las velocidades que se muestran en la figura 1.

Por encima de $R = 190,55$ m la velocidad máxima por deslizamiento superaría los 100 km/h. Si, en principio, la velocidad en los túneles va a estar limitada a 80 km/h, parece razonable no dimensionar los despejes para una velocidad superior a 100 km/h.

Si $R > 190,55$ m, la variación del rozamiento longitudinal movilizado admisible es pequeña, y está del lado de la seguridad tomar $f_1 = 0,825$. Admitiendo un tiempo de percepción y reacción de 2 s, la distancia DD necesaria para detenerse a partir de la velocidad límite V, movilizando un rozamiento longitudinal admisible de 0,825, y con una inclinación i (%) de la rasante, será:

$$DD = 2 \cdot \frac{V}{3,6} + \frac{V^2}{254 \cdot \left(0,825 + \frac{i}{100}\right)} = 0,41 \cdot \sqrt{R+1,5} + \frac{0,41}{2 \cdot \left(0,825 + \frac{i}{100}\right)} \cdot (R+1,5)$$

Para $R > 190,55$ m, en la expresión anterior se tomará $V = 100$ km/h, y quedará

(11) Con lo cual queda disponible para frenar un 91,6 % de la resistencia total al deslizamiento.

(10) Las marcas viales exteriores, y la eventual acera o el arcén, quedarían en el exterior de este rectángulo.

$$DD = 55,56 + \frac{39,37}{0,825 + \frac{i}{100}}$$

la cual es del orden de 105 m. No se deben considerar visibilidades superiores a este último límite. La influencia de la inclinación i de la rasante también es pequeña.

El conductor se sitúa a 0,5 m del borde exterior del carril interior, es decir, a 2,5 m del borde interior de la calzada. El obstáculo que se debe poder percibir es la luz trasera de posición (anchura 0,3 m) de un vehículo detenido que tiene una anchura de 1,8 m: por tanto, se halla el obstáculo a 2,1 m del borde interior de la calzada. La visual es tangente al revestimiento del hastial interior del túnel, el cual está retranqueado d (m) respecto del borde interior de la calzada.

Comparando la distancia necesaria para detenerse con la distancia de visibilidad disponible, se han obtenido las siguientes relaciones aproximadas, que se representan en la figura adjunta para inclinaciones de la rasante iguales a -5 %, 0 % y +5 %:

• Para $R < 190,55$ m:

$$d = (0,1535 - 0,0028 \cdot i) \cdot R^{(0,6477 - 0,0003 \cdot i)}$$

• Para $R > 190,55$ m:

$$d = (18,077 - 0,0083 \cdot i) \cdot e^{-(0,0072 - 0,00008 \cdot i)R}$$

Estas curvas muestran dos zonas: la izquierda ($R < 190,55$ m), en la que lo reducido del radio sólo permite unas velocidades inferiores a 100 km/h; y la derecha, en la que entra en juego la limitación de la velocidad a 100 km/h, aunque el radio permitiría más. Se ve claramente que los radios comprendidos entre 150 y 230 m necesitan unos despejes superiores a 4 m.

Para 500 m de radio (el mínimo que requiere una tuneladora), con un despeje del orden de 50 cm se obtiene la visibilidad necesaria para detenerse a partir de 100 km/h. (Fig. 2).

Para situar la cara interna de la pantalla interior, hay que añadir a d el espesor del revestimiento, más 23 cm para el desplome del revestimiento (el paramento visible debe ser perpendicular al pavimento peraltado, para evitar un aspecto intranquilizador para los conductores).

4. Actuaciones en el arco Este de la M-30

3.1. Las calzadas centrales

Entre el enlace de Manoteras con la A-1 (Madrid - Burgos) y con la M-11 (acceso al aeropuerto de Barajas),

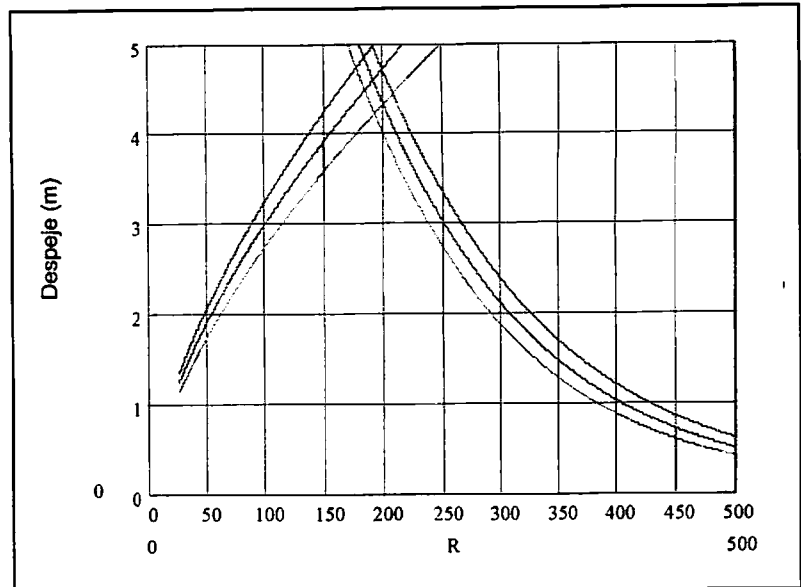


Fig. 2.

y el puente de los Tres Ojos bajo el ferrocarril, la actual M-30 forma un sistema viario de calzadas centrales y laterales que fue pionero en su época.

Las calzadas centrales de la M-30 tienen tres carriles básicos en cada sentido (12) que, sumados a los dos de las calzadas laterales, proporcionan una capacidad total básica de cinco carriles por sentido. Repartir este número de carriles entre calzadas separadas del mismo sentido tiene algunas ventajas:

- Se separa el tráfico que circula por las calzadas centrales del que lo hace por las laterales: el primero es más un tráfico de paso, y sus recorridos son más largos.
- Los movimientos de trenzado asociados a las entradas al sistema y a las salidas de él se pueden confinar en las calzadas laterales, sin perturbar a las centrales.

Por medio de las actuaciones que se comentan en este artículo, las calzadas centrales de la M-30 se prolongarán:

a) Por el Norte, en el llamado *by-pass* Norte (dos túneles cuya boquilla se halla al Sur del enlace de La Paloma): el cual pasará a representar la continuidad de la M-30, mientras que los tramos actuales a los que sustituya (13) conectarán las calzadas laterales con la A-1, la M-11 y la M-607 (Madrid - Colmenar Viejo), a través del enlace de

(12) Excepto en el tramo comprendido entre el enlace de La Paloma y el que conecta con la Pza/ José María Soler y la c/ Costa Rica, que tiene sólo dos carriles básicos. Una de las actuaciones incluidas en el conjunto que se comenta en este artículo subsana esta anomalía.

(13) Desde el enlace de La Paloma hasta el de Manoteras.

Manoferas y del Nudo Norte, amén de con otros destinos puramente municipales. El *by-pass* Norte alojará los tres carriles básicos de cada calzada central del arco Este de la M-30.

b) Por el Sur, en el llamado *by-pass* Sur (dos túneles cuya boquilla se halla al Sur del enlace con la A-3 (Madrid-Valencia); los tramos actuales a los que sustituya (14) conectarán las calzadas laterales con la A-4 (Madrid - Sevilla) a través del Nudo Sur.

Sólo dos de los tres carriles básicos de las calzadas centrales del arco Este de la M-30 se conectarán con los túneles del *by-pass* Sur; el tercero se reservará para las conexiones con la A-3. Las razones para aceptar esta aparente anomalía han sido las siguientes:

- No está tan claro si la continuidad de la M-30 estará representada por el *by-pass* Sur o por lo que va por superficie hacia el Nudo Sur. La circunvalación de la almendra central se podrá realizar por ambas vías, representando el *by-pass* Sur un atajo hasta el puente de Praga pero sin conexiones directas con la A-4.
- Los estudios y simulaciones del tráfico muestran que, desde y hacia las calzadas centrales del arco Este de la M-30, por superficie hacia y desde el Nudo Sur la demanda será mucho mayor (15) que por el *by-pass* Sur: tanto, que parece prudente disponer tres carriles para la primera opción. Si se asignaran sólo dos, aunque aún se estaría por debajo de la capacidad, la proximidad a ella haría que cualquier error en la estimación del tráfico tuviera unas consecuencias menos remediables.
- Es preciso que la entrada desde la A-3 al *by-pass* Sur se haga a carril propio, a la vista del tráfico que tendrá (16). La posibilidad de diseñar una convergencia con tres carriles que procedieran de la calzada central interior (Norte/Sur) tropieza con serias dificultades en alzado, pues el ramal de entrada tendrá que pasar bajo ella.
- Aunque la demanda del tráfico sea menor (17) que la citada en el punto anterior, ocurre algo parecido con la salida hacia la A-3 desde el *by-pass* Sur, cuya resolución por medio de un carril de deceleración o de una bifurcación tropieza con análogas dificultades en alzado, al tener que pasar bajo los carriles que, procedentes del puente actual sobre la Av/ de la Albufera, conectarán con la calzada central exterior (Sur/Norte).

- Asignar un tercer carril a las conexiones superficiales permite establecer un diseño más compacto en relación con las calzadas laterales, dentro de las evidentes limitaciones de espacio de la zona.

Por lo tanto:

- Apenas la calzada central Norte/Sur haya rebasado el puente de la Av/ del Mediterráneo con cinco carriles, los dos de la izquierda seguirán hacia el *by-pass* Sur; y los tres de la derecha saldrán hacia el puente actual sobre la Av/ Ciudad de Barcelona, formando los tres carriles izquierdos (de los cuatro que tiene). Al tercer carril (el derecho) del *by-pass* Sur entrará, a carril propio, un ramal de un carril procedente subterráneamente de la A-3.
- A los dos carriles procedentes del *by-pass* Sur se les adosarán, por la derecha, tres carriles procedentes del puente actual sobre la Av/ de la Albufera: los tres de la izquierda (de los cuatro que tiene). Con estos cinco carriles se pasará bajo los puentes de la Av/ del Mediterráneo y de la Estrella.

4.2. Las calzadas laterales

4.2.1. Su función

Las calzadas laterales, separadas de las centrales (18) y aproximadamente paralelas a ellas, actúan como colectoras y distribuidoras del tráfico entre las calzadas centrales y el resto de las vías.

Su diseño es análogo al de las calzadas centrales; pero su conexión con ellas se hace mediante unos *ramales de conexión* que salen o entran por la izquierda de las laterales, y que han de estar diseñados de manera que el tráfico de paso por las calzadas centrales no se vea muy perturbado por entradas procedentes de las laterales ni por salidas hacia éstas.

Es especialmente importante aplicar unos criterios correctos de diseño en relación con:

1. Mantener el número básico de carriles.
2. Guardar el debido equilibrio del número de carriles antes y después de una salida o de una entrada, tanto más cuanto que los ramales de conexión con la calzada central salen y entran por la izquierda.
3. Las dimensiones de los ramales de conexión.

Para explotar correctamente una calzada lateral, la complejidad de las entradas y las salidas, tanto por la de-

(14) Desde el enlace con la A-3 hasta el Nudo Sur.

(15) Casi 4 000 veh./h en superficie hacia el Sur, y más de 4 600 veh./h hacia el Norte, frente a unos 2 000 veh./h y unos 2 500 veh./h, respectivamente, por el *by-pass*.

(16) Más de 1 600 veh./h.

(17) Algo superior a 400 veh./h.

(18) La separación entre las calzadas centrales y las laterales es análoga a una mediana, aunque su función es diferente pues separa tráfico del mismo sentido. Debe, por su anchura algo estricta, llevar una barrera de seguridad para evitar la irrupción de un vehículo procedente de la otra calzada.

recha como por la izquierda, hace que resulte crítica una señalización adecuada (19) que pueda ser comprendida por los conductores, y muy especialmente por los no familiarizados con la red viaria.

4.2.2. El extremo Norte

Los tres carriles que tiene la calzada izquierda de la A-1 (Madrid - Burgos) en el enlace de Manoteras se prolongarán en la calzada lateral interior (Norte/Sur) de la M-30.

Dos carriles de la calzada lateral exterior (Sur/Norte) saldrán a la plataforma actual de la calzada central exterior (Sur/Norte) de la M-30 (20), antes del enlace de La Paloma; y después de él saldrá otro carril, recogiendo por la derecha dos carriles más procedentes de la Av/ Pío XII. De esta manera, la citada plataforma quedará con cinco carriles:

- Los tres de la izquierda se prolongarán en la A-1.
- Los dos de la derecha saldrán hacia la M-11, divergiendo más adelante en un carril hacia cada sentido de ésta.

4.2.3. El extremo Sur

La calzada lateral exterior (Sur/Norte) estará formada, en su origen, por dos carriles (21) procedentes de la intersección regulada por semáforos con la Av/ de la Albufera. Luego entrará, por la izquierda y a carril propio, un ramal de conexión procedente del carril derecho (de los cuatro que tiene) del actual puente sobre la Av/ de la Albufera: su tráfico no parece elevado (22). Esta calzada lateral quedará con tres carriles en el acceso al enlace con la A-3.

La calzada lateral interior (Norte/Sur) tendrá tres carriles apenas rebasada la bifurcación que dará acceso a un ramal subterráneo de dos carriles que conectará con la A-3. Una vez que estos tres carriles hayan pasado bajo el puente de la Av/ del Mediterráneo, el carril de la izquierda se perderá en un ramal de conexión que se incorporará por la derecha (23) a los tres carriles que, procedentes de la calzada central, se dirigirán hacia el puente sobre la Av/ Ciudad de Barcelona; a estos tres carriles se incorporará, por la derecha, un ramal de un carril procedente en subterráneo de la A-3, formando el cuarto carril (de los cuatro que dicho puente tiene). Más al Sur:

- De los dos carriles que habrán quedado en la calzada lateral interior, el derecho seguirá hacia la intersec-

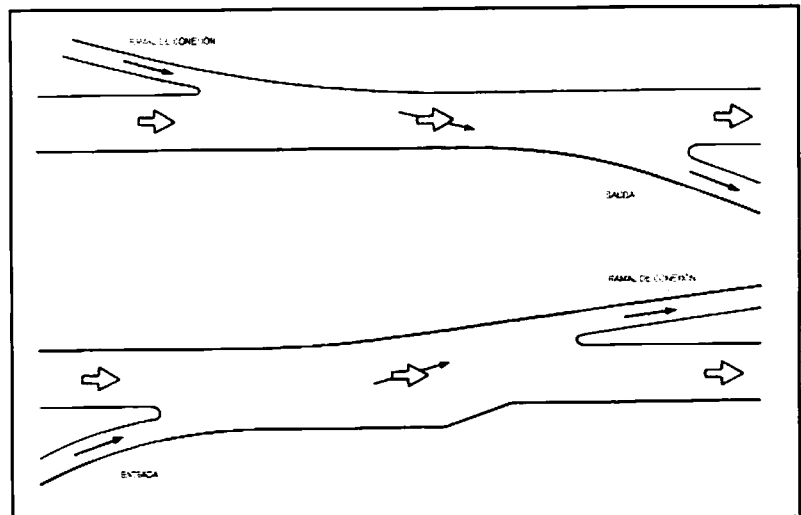


Fig. 3.

ción (regulada por semáforos) con la Av/ Ciudad de Barcelona, y el izquierdo seguirá hasta perderse en el cambio de sentido que existe un poco antes de dicha intersección.

- Entrará por la derecha, a carril propio, un ramal procedente de la c/ Carlos y Guillermo Fernández-Shaw: el cual se prolongará hasta la intersección con la Av/ Ciudad de Barcelona, para girar a la derecha hacia ésta.

4.3. Los ramales de conexión

Los ramales de conexión (*transfers*) entre las calzadas laterales y las centrales son parecidos a los ramales de un enlace entre dos autopistas: el tráfico por ellos es continuo y no interrumpido. Son relativamente cortos y llanos. Normalmente son precedidos o seguidos por un tramo de trenzado en la calzada lateral, según se indica en la figura 3.

Dado que estos ramales entran o salen por la izquierda, el tramo de trenzado en la calzada lateral es del tipo C definido por el Manual de Capacidad; una gran parte (cuando no la totalidad) del tráfico procedente del ramal de conexión se trenza con el tráfico de paso por la calzada lateral: esto requiere una mayor longitud de trenzado. Este tipo permite alojar unas mayores intensidades que los tipos A y B, más corrientes, en los que una salida por la derecha sigue a una entrada por el mismo lado y, por lo tanto, el tráfico de paso por la calzada lateral no participa en el trenzado.

La velocidad de circulación por un ramal de conexión es siempre del mismo orden de magnitud que por la calzada central, puesto que los conductores no modifican, en principio, su velocidad por la maniobra de conexión. El trazado de los ramales de conexión se ha acomodado a esta circunstancia. En particular, la *nariz* de salida debe ser percibida con una antelación mínima de unos 7 s antes de llegar a ella.

(19) En especial, la señalización de aviso previo.

(20) Convertida en el acceso desde el Sur al enlace de Manoteras.

(21) Hay un tercero, correspondiente a la entrada (por la izquierda) del cambio de sentido próximo a la intersección; pero se puede resolver con un carril de aceleración o, al menos, de espera.

(22) 285 veh./h.

(23) Mediante un largo carril de aceleración.

Aunque hubiera sido mejor que los ramales de conexión tuvieran dos carriles (24), no ha habido sitio para más que uno en el arco Este de la M-30. La anchura de este carril y la presencia de arceles serán análogas a las de las calzadas con las que conecta. En todos los casos menos tres (25), los ramales de conexión saldrán de carril propio y entrarán a carril propio.

El número de ramales de conexión previstos tras la remodelación del arco Este de la M-30 es el siguiente:

1. Tres, de la calzada central interior (Norte/Sur) a la lateral.
2. Cuatro, de la calzada lateral interior (Norte/Sur) a la central.
3. Tres, de la calzada central exterior (Sur/Norte) a la lateral.
4. Tres, de la calzada lateral exterior (Sur/Norte) a la central.

4.4. La remodelación de los enlaces

Aunque cada uno de ellos va a ser objeto de un artículo más pormenorizado en la Revista, se enumeran aquí (de Norte a Sur) los enlaces cuyo trazado va a ser modificado con motivo de la remodelación del arco Este de la M-30:

1. Enlace de La Paloma con la Av/ de Pío XII, la Av/ de Burgos y el túnel bajo la estación de Chamartín.
2. Enlace con la Pza. de José María Soler (c/ Costa Rica).
3. Enlace con la Av/ de América (A-2).
4. Enlace con el eje de O'Donnell (R-3) y con la Av/ del Marqués de Corbera.
5. Enlace con la Av/ del Mediterráneo (A-3).

El enlace de Las Ventas (c/ Alcalá) no se modificará, pues ha sido remodelado recientemente.

6. Actuaciones en el Norte

Hay un conjunto de actuaciones orientadas a resolver los problemas relacionados con la explotación (y, dentro de ella, a la inseguridad de la circulación) entre los enlaces del Puente de los Franceses y de Manoteras. Estas actuaciones van a ser objeto de un artículo más pormenorizado en este mismo número de la Revista.

(24) Aunque la demanda del tráfico pueda alojarse en un solo carril, es mejor disponer de dos a fin de tener la flexibilidad suficiente para acomodar distintas pautas del tráfico entre las calzadas laterales y las centrales.

(25) En estos tres casos, las conexiones que no salgan de carril propio o no entren a carril propio estarán dotados de carriles para cambiar de velocidad.

La más importante es la destinada a eliminar las cuatro glorietas partidas (26) reguladas por semáforos de la actual Av/ de la Ilustración, regenerando el espacio urbano de la misma. Para ello:

a) Se canalizará el tráfico de paso por la circunvalación, desde el Sur del enlace de La Paloma hasta la glorieta de José Francisco de Isla, en dos túneles (uno por calzada) que discurrirán bajo la c/ Monforte de Lemos. Es éste el denominado *by-pass* Norte.

b) Se dejará para el tráfico local la actual Av/ de la Ilustración, entre la M-607 (Madrid - Colmenar Viejo) y la glorieta de José Francisco de Isla:

- Mejorando su enlace con la M-607, al dotarlo de un ramal en círculo para el giro a la izquierda desde la Av/ de la Ilustración hacia la M-607, del que carece en la actualidad. Esta carencia ha provocado una transferencia del tráfico hacia la Av/ del Cardenal Herrera Oria.
- Potenciando el eje que representa la Av/ del Ventisquero de la Condesa, la cual pasará en túnel bajo la Av/ del Cardenal Herrera Oria y conectará con la Av/ de la Ilustración mediante un enlace subterráneo.

El *by-pass* Norte se complementará con una nueva conexión, directa y subterránea, con la A-1 (Madrid - Burgos), que terminará a la altura del enlace que se está modificando para potenciar el acceso al nuevo barrio de Sanchinarro. De esta manera el enlace de Manoteras se descargará de la mayoría de los vehículos que desde la M-30 (Oeste) vayan hacia la A-1, y viceversa. El enlace entre el *by-pass* Norte y la nueva conexión con la A-1 también será subterráneo, y de tres tramos.

Además, se mejorará el tramo inicial de la M-607 (Madrid - Colmenar Viejo), suprimiendo el tapón que representa al paso actual (con sólo dos carriles) bajo la Av/ del Cardenal Herrera Oria, y remodelando el enlace con esta última avenida.

El tramo de la actual M-30 comprendido entre la glorieta de José Francisco de Isla y el enlace con la c/ Arroyomolinos mantendrá sus tres carriles básicos por calzada (27); pero se dispondrá un cuarto carril auxiliar:

- En la calzada exterior (Este/Oeste), desde la entrada del ramal de dos carriles (28) procedente de la Av/ de

(26) La Pza/ de José María Soler, Conde de Floridablanca; la glorieta de las Reales Academias; la Pza/ de Juan Pablo Fomere; y la glorieta de José Francisco de Isla.

(27) Ampliando a tres carriles por calzada en el puente sobre la carretera de El Pardo, donde (inexplicablemente) ahora sólo hay dos.

(28) El carril izquierdo entrará a carril propio, y el derecho mediante un carril auxiliar (el quinto de la calzada exterior) que se perderá en la salida a la glorieta de Nueva Zelanda.

la Ilustración hasta la salida (en dos carriles (29)) a la M-40 en el enlace de La Zarzuela.

- En la calzada interior (Oeste/Este), desde la entrada del ramal de un carril procedente de la M-40 en el enlace de La Zarzuela, hasta la salida a la glorieta de Francisco Bayeu y Subías; y desde la entrada procedente de dicha glorieta, hasta la salida de un ramal de dos carriles (30) hacia la Av/ de la Ilustración.

Para que las salidas desde la M-30 hacia la M-40 se hagan en dos carriles (en vez de en uno solo), se remodelará el enlace con la c/ Arroyomolinos sin perturbar las obras de paso existentes.

6. Actuaciones en el Sur

Estas actuaciones van a ser objeto de un artículo más pormenorizado en la Revista. La pieza más importante es el llamado *by-pass* Sur: dos túneles (ejecutados con tuneladora) de tres carriles cada uno, entre el enlace con la A-3 (Madrid - Valencia) y con la Av/ del Mediterráneo, y el enlace con la A-42 (Madrid - Toledo) en el puente de Praga. Este *by-pass* separará el tráfico de circunvalación del radial que se dirige al Sur (A-4, Madrid - Sevilla) o procede de él.

También se ha incluido en este conjunto de actuaciones una conexión directa y subterránea de la c/ Embajadores con el acceso al Nudo SuperSur y la A-4, que mejora la conectividad de dicha calle pasándola bajo la actual M-30.

7. Actuaciones en el Oeste: el tramo del río Manzanares

Es ésta, ciertamente, el conjunto más ambicioso de actuaciones de la remodelación de la M-30, y el que más va a regenerar un espacio urbano ahora muy degradado por la presencia de una autopista urbana en superficie a menos de 1,5 km de la Puerta del Sol. Estas actuaciones van a ser objeto de un artículo más pormenorizado en la Revista, y la definición exacta de su trazado se *ha afinado* a la vista de las condiciones impuestas por la Confederación Hidrográfica del Tajo; pero desde un punto de vista funcional el alcance que se pretende dar a estas actuaciones es el siguiente:

a) El *by-pass* Sur conectará con un enlace subterráneo situado en el entorno del puente de Praga (31). Este enlace conectará también:

(29) El carril derecho saldrá mediante un carril de deceleración.

(30) El carril izquierdo saldrá desde carril propio, y el derecho mediante un carril auxiliar (el quinto de la calzada interior) procedente de la entrada desde la glorieta de Nueva Zelanda.

(31) Este puente mantendrá, en superficie, la continuidad del Pº de Santa María de la Cabeza hacia la A-42 (Madrid - Toledo).

- Con el Pº de Santa María de la Cabeza y la A-42 (Madrid - Toledo).
- Con el tramo soterrado de la M-30, contiguo al río Manzanares.
- Con la actual plataforma de la M-30 a ambos lados del río, aguas abajo del puente de Praga, que conectarán con el Nudo Sur.

b) Cada una de las calzadas del tramo soterrado de la M-30 discurrirá por una margen del río Manzanares, desde el enlace subterráneo del puente de Praga hasta el enlace (también subterráneo) del puente del Rey. El número de carriles básicos se elevará en este tramo a cuatro por calzada. El paso bajo el histórico puente de Toledo requerirá la escisión de cada calzada en dos semicalzadas, de forma parecida a lo que ocurre actualmente en superficie.

c) En correspondencia con el actual enlace con la Av/ de Portugal (Madrid - Badajoz) en las inmediaciones del puente del Rey, la calzada que aguas debajo de este puente discurrirá bajo la margen izquierda del río pasará a la otra margen, saliendo a la superficie junto a la otra calzada en el Pº del Marqués de Monistrol. El eje Av/ de Portugal / Glorieta de San Vicente será también subterráneo.

8. Los firmes y pavimentos

8.1. Introducción

Es probablemente una obviedad resaltar la importancia de los pavimentos en la funcionalidad de cualquier vía, tanto urbana como interurbana. Sin embargo, es reseñable que estudios recientes hayan puesto de manifiesto que los usuarios reconocen, de una manera consciente y sin dudar, esa importancia. En definitiva, la seguridad de la circulación y la comodidad de los ocupantes de los vehículos dependen en buena medida de las características superficiales de los pavimentos: en especial de la resistencia al deslizamiento y de la regularidad superficial, y eso lo saben perfectamente los técnicos, pero también los ciudadanos.

Por supuesto, no pueden olvidarse los aspectos estructurales, teniendo en cuenta que en la actualidad, y posiblemente también en el futuro, la M-30 soporta en casi todos sus tramos (32) unas importantes intensidades de vehículos pesados, aunque supongan una reducida proporción de las intensidades totales. Además, en muchos tramos, los cimientos de los firmes desafortunadamente son (y van a seguir siendo donde no se cambie el trazado) de muy mala calidad, sobre todo por la naturaleza de los terrenos, que en ocasiones son incluso rellenos antrópicos depositados sobre antiguos cauces.

(32) Salvo quizás en su arco Noroeste.

Tanto desde el punto de vista funcional como desde el estructural, la reforma de la M-30 requiere cuantiosas inversiones en el apartado específico de los firmes y pavimentos, dirigidas no sólo a los tramos nuevos sino también a los que se van a mantener sin cambios en el trazado, en los que resulta imprescindible al menos una rehabilitación superficial. Sin embargo, no hay que contemplar sólo la fase de construcción, sino también la de conservación: y mucho más cuando su planificación ha de tener presente los también cuantiosos recursos económicos que serán requeridos en el futuro, y la elevada complejidad de organizar las correspondientes actuaciones de una manera eficiente.

Sin que esto suponga contradicción alguna con lo que se acaba de indicar, por la magnitud y por la diversidad de los proyectos de reforma de la M-30, hay aspectos en ellos que se han dejado relativamente abiertos. En el caso de los firmes y pavimentos se han establecido unas directrices generales e, incluso, una definición precisa de las distintas soluciones que deben ser tenidas en cuenta. Sin embargo, es probable que algunas de las actuaciones deban ser redefinidas a la vista de los procesos constructivos que finalmente se vayan a aplicar para poder ajustarse a los plazos relativamente estrictos de los que se dispone, y de la insoslayable obligación de ejecutar las obras con unas molestias mínimas para los ciudadanos. Por otro lado, desde el ya señalado punto de vista de la conservación, se ha empezado a elaborar un plan de organización de las actuaciones integrado en el sistema de gestión de la futura M-30 que, en la medida en que se vaya perfilando, puede quizás aconsejar la revisión de alguna de las propuestas que se han hecho en la fase de proyecto.

8.2. Consideraciones previas

Aunque la definición de las distintas soluciones de pavimentación para la futura M-30 pueda parecer sencilla, en última instancia es el resultado de un relativamente dilatado período de reflexión y de discusión, en el que han participado principalmente los autores de este artículo y el profesor Manuel Melis. A continuación, se va a intentar dejar constancia, de la manera más clara y ordenada posible, de las bases de esa reflexión; entre ellas destacan, como casi resulta obvio, las centradas en los pavimentos de los tramos subterráneos.

- No se conoce con suficiente precisión cuál es la composición del tráfico de la M-30, *si bien se han instalado ya las básculas dinámicas para su estudio en detalle*. Sin embargo, a partir de los datos disponibles y asumiendo determinadas hipótesis más o menos discutibles, se ha podido hacer una estimación aceptable. Ciertamente el tráfico pesado es relativamente

intenso; pero es muy poco probable que la categoría del tráfico pesado supere en ningún tramo la T0, lo que por supuesto tampoco es desdeñable. Se ha llegado a la conclusión, bastante evidente, de que colocar básculas dinámicas proporcionaría sin duda una gran cantidad de información, no tanto para modificar las bases del proyecto (es muy dudoso que haber dispuesto de ellas con antelación hubiera servido para llegar a diseños de firme sustancialmente diferentes) como por el hecho de que esta información será de suma utilidad para la gestión de la futura M-30. Más en concreto, si se dispone de básculas dinámicas y de un adecuado plan de explotación de sus registros, se tendrá un material utilísimo para las investigaciones relacionadas con el comportamiento de los firmes a medio y largo plazo. Por todo ello se ha aprobado una propuesta de adquisición de básculas dinámicas, tanto fijas como móviles (las denominadas de tipo *manta*), e incluso ya se ha recibido el primer equipo.

- En la evaluación del estado estructural de los firmes actualmente en servicio resulta casi imprescindible utilizar diversos equipos, a fin de poder contar con mediciones que resulten complementarias para poder llegar a un diagnóstico correcto y preciso. De todas formas, como es bien sabido, una cosa es la medida de deflexiones (Indicativas del estado general del macizo resistente, siempre y cuando éste sea relativamente flexible) y otra muy diferente la detección de huecos bajo la estructura del firme, problema que preocupa sobremanera a los actuales gestores de la M-30, sobre todo en el arco Este. Para la detección de esos eventuales huecos habrá que utilizar técnicas geofísicas, cuyo mayor inconveniente es que la interpretación de sus mediciones no es en la práctica nada sencilla.

- El dimensionamiento analítico de los firmes (es decir, el basado directa y explícitamente en el cálculo) no es necesariamente mejor que el dimensionamiento puramente empírico. Realmente, en la mayor parte de los casos lo más apropiado puede ser recurrir a métodos mixtos, en los que se combina el cálculo con las aproximaciones empíricas (en este sentido los franceses, hace ya una década, y más recientemente los norteamericanos han realizado notables avances). No hay que olvidar, además, que cuando se trabaja en el dominio de la elasticidad (lo más habitual y lo más práctico, salvo para el estudio de algunos fenómenos concretos), los resultados de los análisis de las tensiones y las deformaciones están fuertemente condicionados por las leyes de fatiga que se utilicen.

- Al valorar la calidad del diseño de los firmes se suele dar por sentado en España la insuficiente durabilidad de éstos, infiriéndose entonces que dicha calidad del

diseño es demasiado baja. Sin embargo, una valoración rigurosa no es sencilla. A veces, es verdad que hay deficiencias en el diseño, sobre todo en lo que se refiere a una eventual sobre-valoración de la capacidad estructural de los suelos, o a una insuficiencia del espesor de las capas inferiores del firme. Pero las causas de los fallos prematuros tienen su origen más habitualmente en el proceso de ejecución: impericia del constructor, ignorancia del director de las obras, o incluso porque la calidad de los materiales o el espesor de las capas no son los previstos. En ocasiones, lo que ocurre simplemente es que el crecimiento de la intensidad del tráfico pesado ha sido muy superior a la que era razonable considerar en los procesos de planeamiento y de proyecto.

- En cuanto a las unidades de obra que deben ser utilizadas en las capas inferiores de los firmes, parece claro que en ningún tramo de la M-30 se deberían utilizar ahorras: por la escasa disponibilidad de materiales de calidad en la región de Madrid, por razones constructivas (sobre todo en lo que se refiere a la compactación) y por la dudosa fiabilidad de su comportamiento a largo plazo. En general, resulta una opción preferible el suelocemento, pero más aún las bases de hormigón de baja resistencia típicas de los firmes de las vías urbanas de Madrid.

- En los tramos subterráneos se debe considerar que un pavimento bituminoso siempre supone una cierta carga de fuego, aunque por supuesto tanto menor cuanto menor sea su espesor. Que de esta carga de fuego deba deducirse que se trata de superficies que no deben emplearse en los túneles es el origen de una discusión que no está cerrada en absoluto. Lo que resulta imprescindible, en todo caso, es que la superficie de circulación sea cerrada, para que no pueda retener líquidos. En consecuencia, deben considerarse prohibidas las mezclas drenantes y, por la misma razón, deberían probablemente considerarse también prohibidos los microaglomerados de granulometría discontinua del tipo M. Sin embargo, los microaglomerados del tipo F sí podrían considerarse aceptables, y de emplearse se aprovecharían sus innegables ventajas, tales como reflexión difusa de la luz, relativamente baja sonoridad, etc.

- Conseguir una magnífica regularidad superficial con un pavimento de hormigón puede no ser fácil, pero es un objetivo perfectamente alcanzable. Requiere disponer de medios de nivelación adecuados y, probablemente, la incorporación de aditivos (fluidificantes) que faciliten la colocación. En todo caso, hay que partir de una formulación ajustada. Es muy importante, además, garantizar la homogeneidad de los suministros de hormigón.

- En los tramos subterráneos realizados con tuneladora (sección circular), el pavimento se enfrenta, desde un punto de vista puramente mecánico (debido a que ha de colocarse sobre una estructura de hormigón dispuesta aproximadamente en el centro de la sección excavada), a una situación como la de los pavimentos sobre puentes y viaductos, con la ventaja de que las variaciones de temperatura y de humedad son muy pequeñas. Por tanto, las soluciones posibles serían las siguientes:

- Pavimento bituminoso de pequeño espesor (es importante exigir en todo caso, en la línea ya indicada, una suficiente regularidad superficial a la estructura subyacente).

- Pavimento de hormigón incorporado (la mejor solución, aunque en España sea muy poco habitual).

- Pavimento de hormigón adherido.

- Pavimento de hormigón superpuesto

- Un elevado contraste entre las marcas viales y el pavimento es esencial pero en los tramos subterráneos no se deben emplear marcas convencionales. En la separación entre carriles bastan unas pinturas con un alto contenido de microesferas de vidrio que garanticen una elevada reflectancia, consiguiéndose así un buen contraste incluso sobre una superficie de hormigón (no debe olvidarse que en los tramos subterráneos hay una iluminación permanente y es obligatorio circular con las luces encendidas). En las marcas viales de borde de calzada sí conviene disponer de sistemas luminosos de guía; pero no pueden estar embutidos en el pavimento, porque eso sería una gran complicación constructiva.

- Los modernos betunes sintéticos pueden ser, al menos en teoría, de cualquier color e incluso incoloros; tienen un precio muy elevado (probablemente más diez veces el precio de un betún convencional) y hasta ahora se han empleado fundamentalmente con fines estéticos en parques, paseos, etc. No hay que olvidar que a largo plazo cualquier superficie utilizada para la circulación de vehículos tiende a oscurecer por los humos y por el desgaste de los neumáticos; ni que, en cualquier caso, lo que acaba predominando es el color de los áridos empleados. Si se quisiera construir una superficie asfáltica lo más clara posible habría que recurrir a áridos blancos; y para que se tratase de áridos resistentes al pulimento, habría que emplear áridos artificiales.

- Tanto en Europa como en Estados Unidos, dentro de los túneles hay ahora mismo una marcada tendencia a construir pavimentos de hormigón (preferentemente, continuos de hormigón armado), sobre todo para minimizar las necesidades de conservación. Si éste es el ob-

jetivo prioritario (y probablemente deba serlo), habrá que organizar la puesta en obra para conseguir resultados suficientemente buenos (en términos sobre todo de regularidad superficial) sin exceder de los plazos establecidos para la ejecución. Hay que evaluar los diversos procedimientos constructivos existentes, no debiendo descartarse por supuesto la eventualidad de hormigonar sobre encofrados fijos.

- En los pavimentos continuos de hormigón armado se podrían utilizar barras (solución tradicional) o flejes (solución algo más moderna, aunque en los últimos tiempos ha caído en franco desuso). Aparte de algunas diferencias en la puesta en obra (los flejes se suministran en rollos, lo que podría facilitar su transporte y suponer menores necesidades de soldadura), la cuantía de acero se puede teóricamente reducir algo con los flejes, pues su superficie específica de contacto con el hormigón es mayor.

- Las exigencias de resistencia al deslizamiento y de regularidad superficial deben ser acordes con las velocidades de circulación (las cuales estarán limitadas a 70 - 80 km/h). En todo caso, debe quedar garantizado una elevada resistencia al deslizamiento, asumiendo que el límite de velocidad será sobrepasado (incluso a los infractores hay que ofrecerles una seguridad suficiente). Por otro lado, aunque dentro de un túnel nunca llueva, no se puede ser más tolerante en los tramos subterráneos que en los situados en el exterior. Por el contrario, no es necesario garantizar que el que circule a velocidades elevadas no sienta incomodidad, aunque si se fuese de entrada poco exigente con la regularidad superficial se podría llegar a situaciones que los usuarios considerarían inaceptables.

- Sea cual fuere la naturaleza de la superficie del pavimento, debe tener una elevada microtextura (que ha de permanecer con valores prácticamente invariables a lo largo del tiempo); una suficiente macro-textura (que dependerá también del tipo de superficie que se adopte); y una mega-textura nula (que sólo sería el reflejo de una deficiente puesta en obra y que resultaría de todo punto inaceptable).

- Para intentar conseguir una buena regularidad superficial, el fresado es una medicina que sería preferible no tener que tomar. Cuanto menos haya que fresar, mejor: porque si bien es cierto que se pueden reducir así sustancialmente las irregularidades, se pueden introducir respuestas *extrañas* en el pavimento desde el punto de vista de la sonoridad y, lo que es más grave, desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento. Aunque actualmente una buena opción son los micro-fresados (sobre pavimentos asfálticos), el resultado puede ser dudoso desde los puntos de vista señalados.

8.3. Situaciones contempladas en el proyecto

Las situaciones de pavimentación cuya resolución se ha planteado explícitamente en la reforma de la M-30 son las seis siguientes:

- Tramos subterráneos excavados con tuneladora.
- Tramos subterráneos excavados entre pantallas.
- Rampas de acceso y de salida de los tramos subterráneos.
- Conexiones con los firmes existentes.
- Tramos exteriores sobre explanada.
- Tramos exteriores sobre tableros de estructura.

8.3.1. Tramos subterráneos excavados con tuneladora

Se ha propuesto como pavimento la propia losa de hormigón estructural que separa la zona de circulación de la parte inferior restringida a los vehículos de servicio y de emergencia, con las siguientes especificaciones adicionales:

- En relación con el acabado de la superficie, especialmente en lo referido a la regularidad superficial, habrá que cumplir las prescripciones contenidas en el artículo 550 (Pavimentos de hormigón) del PG-3. Aunque algunos constructores la consideren difícil, esta exigencia se puede asumir perfectamente si se ponen los medios adecuados para ello.
- La textura se ha de conseguir mediante la incrustación de gravillas, combinada con una denudación química de la superficie. El coeficiente de pulimento acelerado de dichas gravillas debe ser al menos de 0,55, lo que podría suponer la necesidad de recurrir a áridos artificiales.

8.3.2. Tramos subterráneos excavados entre pantallas

Para garantizar un adecuado apoyo de los firmes sin tener que recurrir a la estabilización de los suelos *in situ*, que en estos tramos complicaría en exceso los procesos constructivos, debe garantizarse la presencia de un suelo seleccionado (33) en al menos 100 cm de espesor.

Sobre esa explanada se prevé colocar 25 cm de base de hormigón de 12,5 MPa de resistencia característica a compresión a los 28 días (según lo establecido en el Pliego de prescripciones técnicas generales del Ayuntamiento de Madrid). A esta capa se le exigirán idénticas condiciones de terminación que las que se le piden a la unidad de obra denominada *hormigón magro vibrado* en el artículo 551 del PG-3.

(33) Artículo 330 del PG-3.

Como pavimento se dispondrá uno continuo de hormigón armado, con las siguientes características fundamentales (exigiéndose en todo caso las especificaciones establecidas en el artículo 550 del PG-3):

- 25 cm de espesor
- Resistencia característica mínima del hormigón a flexotracción a los 28 días: 4,5 Mpa
- Cuantía geométrica de la armadura longitudinal: 0,7 %

8.3.3. Rampas de acceso y de salida de los tramos subterráneos

Está previsto que se apliquen las mismas soluciones que se han definido en el apartado anterior.

8.3.4. Conexiones con los firmes existentes

Las soluciones son las definidas en el apartado siguiente. Los detalles de las uniones entre el firme antiguo y el firme se supeditarán en cada caso a la máxima simplicidad constructiva.

8.3.5. Tramos exteriores sobre explanada

Si los suelos de la traza son adecuados o seleccionados, la explanada debe formarse mediante una estabilización *in situ* con cemento (del tipo S-EST 3, según el artículo 512 del PG-3), en un espesor de 30 cm.

Si los suelos de la traza son tolerables, se deben aportar 80 cm de suelos adecuados o 60 cm de suelos seleccionados. En ambos casos, los 30 cm superiores de los suelos aportados deben estabilizarse *in situ* con cemento (tipo S-EST 3).

Si los suelos de la traza son marginales, se deben aportar 105 cm de suelos adecuados u 80 cm de suelos seleccionados. En ambos casos, los 30 cm superiores de los suelos aportados deben estabilizarse *in situ* con cemento (tipo S-EST 3).

En cualquier caso, la capa inferior del firme estará formada por 30 cm de suelocemento fabricado en central (artículo 513 del PG-3) o por 25 cm de base de hormigón de 12,5 MPa de resistencia característica mínima a compresión a los 28 días (según el Pliego de prescripciones técnicas generales del Ayuntamiento de Madrid).

Sobre la capa inferior se colocarán 25 cm de mezclas bituminosas en caliente con la siguiente distribución (de abajo arriba):

- 13 cm de de mezcla tipo S25 (artículo 542 del PG-3)
- 9 cm de de mezcla tipo S25 (artículo 542 del PG-3)
- 3 cm de microaglomerado tipo M10 (artículo 543 del PG-3)

8.3.6. Tramos exteriores sobre tableros de estructura

En el caso de tableros de hormigón, debe exigirse un acabado de su superficie (regularidad superficial) que haga que no se requiera capa de regularización. A menudo los constructores indican que esto no es posible; pero no es así en absoluto si los procesos constructivos son los adecuados.

En todos los casos se procederá a impermeabilizar los tableros:

- En el caso de tableros de chapa metálica (si los hubiere), la impermeabilización se llevará a cabo, tras una imprimación con betún-epoxi diluido, con una película de betún-epoxi en un espesor de 2 mm.
- En el caso de tableros con superficie de hormigón, la impermeabilización se debe llevar a cabo mediante la aplicación de dos capas sucesivas de lechada bituminosa LB-4 con incorporación de fibras, con un espesor total de unos 4 - 8 mm.

En todos los casos el pavimento debe estar compuesto por una única capa de mezcla bituminosa de granulometría discontinua (artículo 543 del PG-3) del tipo M10, con un espesor de 3 cm.

9. Señalización

La nueva M-30 (toda ella, y no sólo los tramos sobre los que se actúe) necesita y merece una nueva señalización de orientación, más conforme con su nuevo carácter municipal y, sobre todo, más comprensible para el conductor no familiarizado con ella que la actual, derivada de la normativa estatal recogida en la Norma 8.1-IC "Señalización vertical". Aunque su desarrollo no haya sido culminado, se señalan a continuación los rasgos más destacados:

- Menor volumen de información:
 - Antes de una salida, sólo se proporcionará información sobre los destinos a los que aquella conduce; y para los movimientos de paso, sobre los destinos correspondientes a la siguiente salida.
 - No se rebasarán las dos líneas de texto. Esto permitirá unos carteles de menor dimensión, y unos apoyos menos contundentes que los actuales: pórticos más ligeros, e incluso colgar los carteles de los puentes, evitando así que éstos resulten ocultos por la señalización.
- Adopción de toponimia claramente municipal. Así, Aparecerán nombres que ahora no figuran: Av/ de América, Av/ del Mediterráneo, etc.
- El cajetín propio de la M-30 se situará sobre el cartel, y no dentro de él. ♦