

AGLOMERADOS DENSOS EN CALIENTE

Por OLEGARIO LLAMAZARES GOMEZ,
Ingeniero de Caminos.

Nos informa detalladamente el autor sobre los favorables resultados de la campaña de experimentación en el Alto Rin con el empleo de estos aglomerados, cuyo éxito se traducirá también en su gran aumento en Francia, por lo que considera de interés que se vayan proyectando revestimientos de este tipo en nuestro país con la profusión posible, para que, previo informe sobre los resultados, pueda llegarse en su día a una fórmula española, base de las consiguientes Normas.

La elección de pavimento.

Los riegos asfálticos superficiales han sido hasta ahora los revestimientos más generalizados para la protección de los firmes de carretera. En los últimos años se ha intensificado su aplicación, por el deseo de ir cubriendo con una capa bituminosa la mayor longitud posible de nuestras carreteras de macadam.

En la actualidad, en la red de carreteras del Estado la proporción de firmes con riego asfáltico es del orden del 30 por 100, que es de esperar siga aumentando. Pero hay que reconocer que este tipo de revestimiento superficial ya no es apto para los tramos de afirmado sometidos al intenso tráfico que produce el crecimiento constante de nuestro parque de vehículos. Principalmente la frecuencia de la circulación es la que exige asegurar una buena capa de rodadura, que aunque más cara de establecimiento, compensa económicamente por su duración y produce grandes ventajas al usuario por la comodidad, garantía y reducción de gastos de explotación.

Se fija en los Estados Unidos para los riegos asfálticos un límite máximo de 1.500 vehículos por día; para tráficos más intensos se recomiendan tipos de revestimientos de mejor calidad. Consideremos esto como orden de magnitud, sobre el que debemos indicar que juegan circunstancias especiales de cada caso (materiales disponibles, coste de ejecución, etc.), habiendo demostrado recientemente los franceses que con el abaratamiento conseguido en la producción intensiva de aglomerados asfálticos, pueden competir éstos con los riegos desde un tráfico medio diario de 750 vehículos, refiriéndonos, se entiende, al coste global establecimiento-conservación.

Se plantea en nuestro país, con el incremento del tráfico, la elección de un revestimiento de calidad para aplicar a los tramos de mayor circulación.

El dilema entre pavimentos rígidos y pavimentos flexibles es de fácil solución, al menos para nosotros. Los firmes de hormigón hidráulico son prohibitivos por su elevado coste, así como por su difícil repara-

ción en las aún temibles fisuraciones y efectos de *pumping*. Queda, pues, reducida su aplicación a pistas de aeropuertos y en la red de carreteras a algún tramo de acceso a zonas industriales con gran densidad de transporte pesado y, sobre todo, con vehículos de llanta rígida, como en las zonas en torno a nuestras azucareras.

Entre los pavimentos flexibles hay una gradación de calidad y coste, que depende fundamentalmente de las exigencias de granulometría.

El tarmacadam, que tiene gran aceptación en otros países, en los que resulta bastante económico y se ha beneficiado de todos los progresos de la mecanización para su fabricación y empleo, debemos descartarle. Nuestra producción de alquitrán es muy escasa y, en general, de mala calidad. Desde hace años he prescindido del empleo de este ligante por falta de adhesividad en varias remesas, que no obstante, cumplían las condiciones de la Orden de 23 de marzo de 1936. Pero no creo que merezca la pena la revisión de las características fijadas en aquellas normas; el empleo de alquitrán en la carretera está reservado a los países donde hay exceso de este producto, pero en España la destilación anual, que es del orden de 60 000 toneladas, es absorbida para la industria química y otros usos, en los que se le puede sacar mayor rendimiento económico.

Estrechando el cerco y siempre con la preocupación del coste por la insuficiencia de nuestras consignaciones, hay que dejar a un lado los hormigones asfálticos, de elevada compacidad y gran precisión en la mezcla.

Llegamos así a los aglomerados, entre los que cabe una extensa gama, limitada por los polos de una gran controversia: ¿Aglomerados en frío o aglomerados en caliente? Urge la definición para evitar los errores a que puede inducir esta denominación.

La palabra *frío* se refiere exclusivamente a los áridos, ya que en el primer tipo de aglomerado citado se calienta generalmente el ligante. Por el contrario, en los aglomerados en caliente se exige tam-

bien el caldeo y secado del árido con un control constante de la humedad de éste, de modo que no pueda pasar de un límite fijado.

Los aglomerados en caliente, por la posibilidad

pues, por esto, reduciendo el espesor del conjunto base-pavimento de un firme flexible, admitiéndose en los cálculos clásicos que el revestimiento de aglomerado de este tipo debe computarse con un espesor

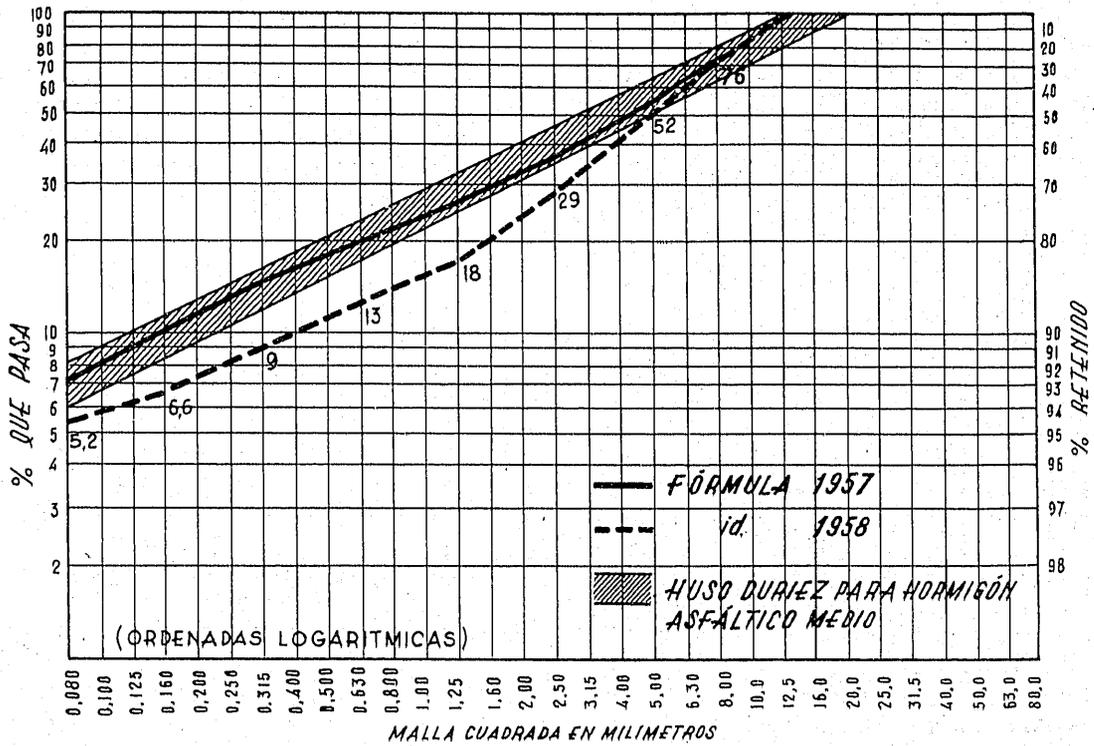


Fig. 1.ª — Curvas granulométricas.

que ofrecen de emplear, aun en tiempo frío, betunes duros, de gran viscosidad, son de más garantía contra la desagregación, así como contra la fractura y desgaste de la gravilla, por lo que permiten el empleo de áridos de peor calidad.

La ventaja, con ello, de aprovechar los materiales locales; aunque sean blandos o poco adherentes, puede reducir en muchos casos la diferencia de coste que existe entre ambos tipos de aglomerados a favor de los aglomerados en frío. La fabricación en caliente es el único procedimiento de conseguir revestimientos de gran calidad, comparables a los hormigones asfálticos. Considérese la seguridad que da la constancia de porcentaje de humedad en los áridos y de temperatura en la mezcla y extendido. Se consiguen así revestimientos estables, de mayor impermeabilidad y, por tanto, poco susceptibles al agua y a las variaciones de temperatura. Por ello están especialmente indicados para nuestras húmedas zonas del Norte y para las regiones del interior de clima extremado.

Otra cualidad muy digna de tenerse en cuenta de los aglomerados en caliente, es el denominado efecto-losa en este tipo de revestimiento, que trabaja como una losa de hormigón, flectando elásticamente bajo las cargas y aumentando la superficie de reparto. Influye,

virtual, que se equipara al doble del real. Esta reducción de espesor, debido a tal causa, ya fué prevista en los ábacos del estabilómetro de Heveem, en el que se incluye una escala reductora dependiente de la cohesión del revestimiento.

La disminución de espesor puede representar eco-



Fig. 2.ª — Corte de una gravera de la terraza del Rhin.

nomía en el afirmado, especialmente para los tramos sujetos a un tráfico intenso y pesado.

El efecto-losa, descubierto en 1955 en las pistas de experimentación de la W.A.S.H.O. (Western Association of State Highways Officials), en el Estado de Idaho, se manifiesta solamente en capas de espesor superior a 5 cm. Pero quizá pueda llegarse a conseguirle en menores espesores, con betunes de mayor resistencia a la flexión y a la fatiga, para lo que se confía en la adición de caucho, de acuerdo con los recientes experimentos en varios países, que auguran un gran éxito, debido al aumento de cohesión y ductilidad en el ligante.

El aglomerado en frío no puede ofrecer tantas ventajas y es siempre de más dudoso comportamiento, principalmente por la evolución de su estructura por el efecto del tráfico. El aumento de la superficie específica que produce la fragmentación de los áridos, el aumento de viscosidad y la disminución de la cantidad de ligante, como consecuencia de la evaporación de los solventes, son tres circunstancias que se suman para dar lugar a que al cabo de cuatro o seis años, según el tráfico circulante, este revestimiento pueda equipararse a un aglomerado denso con insuficiente dosificación de betún, en el que habrán aparecido grietas y peladuras y exigirá un nuevo revestimiento para capa de rodadura.

Queda, pues, como una ventaja de los aglomerados en frío su más reducido coste por una fabricación más sencilla, con instalación más barata que no necesita secador de áridos, ni un control tan riguroso en la fabricación. Pero con el abaratamiento en el coste de los aglomerados en caliente a que puede llegarse con la fabricación masiva, resultante de concentración de programas, los precios pueden ser comparables. También es preciso tener en cuenta que en los aglomerados en frío, por su permeabilidad, es conveniente la protección con una capa de sellado, lo que también supone un coste adicional.

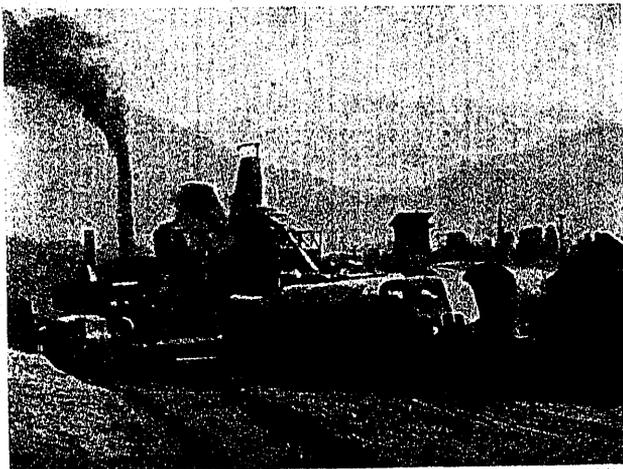


Fig. 3.^a — Planta de fabricación de 120 Tn./hora.

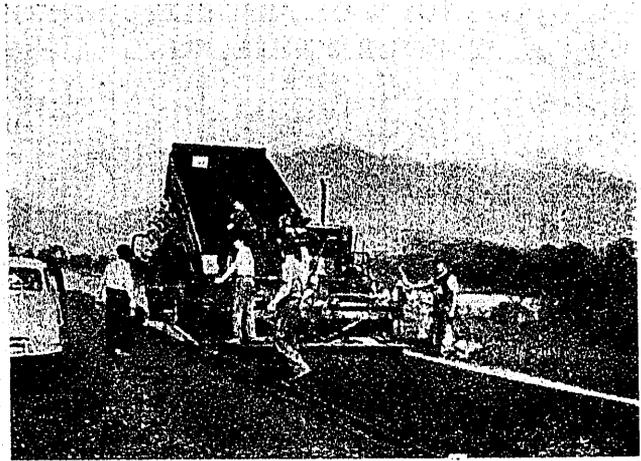


Fig. 4.^a — Aplicación de revestimiento con una extendidora de 100 Tn./hora.

En general, hay una clara tendencia en el mundo hacia los aglomerados en caliente; en Norteamérica, casi la totalidad de los pavimentos de hormigón asfáltico se hacen con *hot-mix*. También los ingleses han evolucionado hacia las mezclas que ellos llaman *dense rolled asphalt*, para los que las estadísticas dan duraciones superiores a los veinte años, frente a menos de diez para los aglomerados en frío, que allí se ejecutan con gran cuidado y se aplican sobre bases muy bien consolidadas y saneadas.

Según la información que tenemos de Rusia, dominan también allí los aglomerados densos, con severas exigencias de compacidad, debido sin duda al rigor del clima.

Y en cuanto a Francia, país vecino y bastante similar, en cuya técnica debemos inspirarnos, este tipo de aglomerados se ha impuesto a partir de 1954, llegando en 1957 a emplear cerca de un millón de metros cúbicos.

En España, el porcentaje de firmes con pavimento aglomerado asfáltico de diversos tipos no llega al 0,6 por 100 de la longitud de la red de carreteras del Estado. Ultimamente se ha extendido su aplicación a tramos de gran densidad de tráfico, incluidos en el Plan de Modernización de Carreteras, en general con granulometría bastante cerrada, adaptados a las normas del Laboratorio del Transporte.

Según más arriba apuntamos, consideramos muy interesante que se conozca en nuestro país el estado actual de la técnica francesa de aglomerados densos en caliente y sobre ella vamos a informar en el presente trabajo. Se basará éste principalmente en la campaña de experimentación del Departamento del Alto Rhin, cuyos resultados se dieron a conocer en las jornadas de estudios de Colmar, a las que asistí por orden del Ilmo. Sr. Director general de Carreteras, acompañando al Ilmo. Sr. Inspector general, D. Luis Caballero de Rodas y Colmeiro.

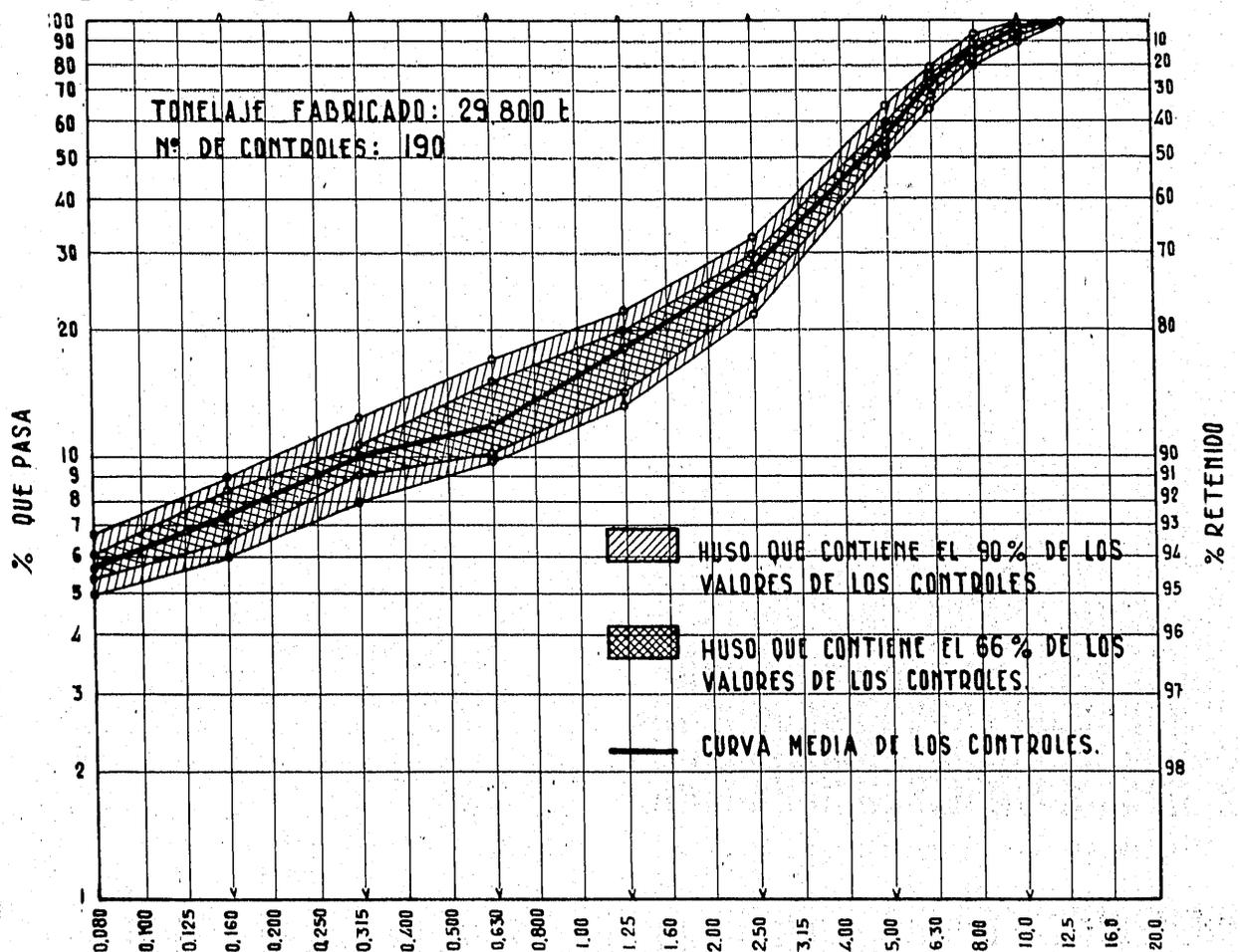
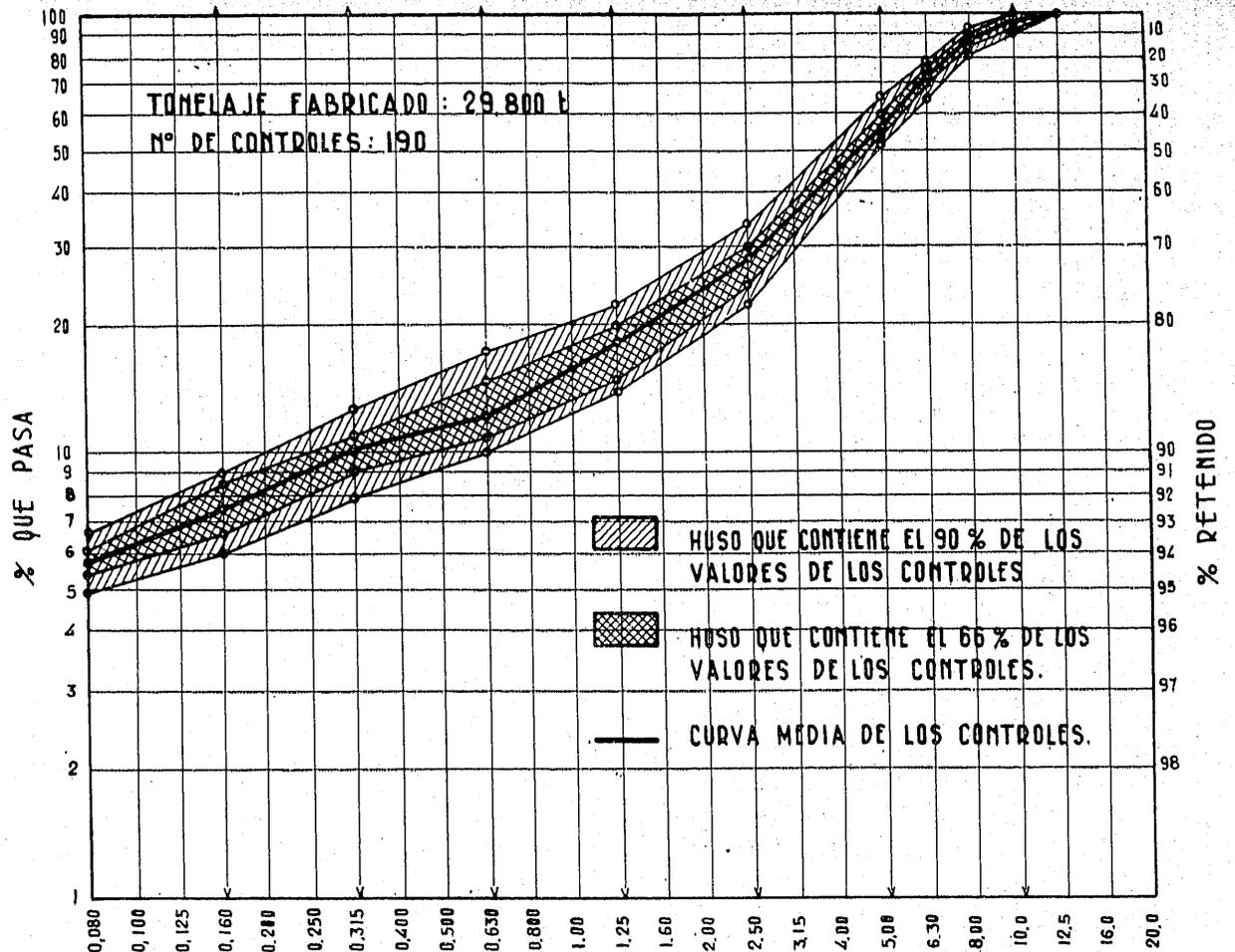


Fig. 5.^a — Aglomerados 1958. Gráficos de los controles granulométricos de la mezcla, llevados a cabo previa extracción de ligante, durante la fabricación.

Las fórmulas de aglomerado.

La campaña experimental del Alto Rhin se inició en 1949, dirigida principalmente a resolver la controversia establecida entre las ventajas de utilización de aglomerados densos o riegos superficiales, con vistas, si no a una generalización, al menos a una extensión masiva de los primeros. Se pretendía llegar a conclusiones prácticas y definitivas, como las que ahora han podido ofrecernos en el favorable balance técnico-económico de las jornadas de Colmar.

En el transcurso de los diez años de la campaña, los controles de laboratorio y la observación minuciosa de los pavimentos en servicio fueron aconsejando la evolución de las fórmulas de aglomerado, que se manifestaron principalmente en las siguientes modificaciones:

- Exigencia progresiva de material procedente de trituración hasta su totalidad.
- Reducción del tamaño máximo de la gravilla.
- Disminución del porcentaje de filler añadido.
- Empleo de betún asfáltico puro de penetración 80/100, reservándose el 180/200, exclusivamente para los días de temperaturas más bajas.
- Reducción en la proporción de ligante, que ha descendido del 7 al 5,5 por 100, referido al peso de los áridos.

Los áridos empleados proceden de las terrazas cuaternarias de los ríos de la región: Rhin, Doller, Thur y Fecht. Los aluviones del Rhin están constituidos por una mezcla de grava y arena, con proporciones aproximadas al 70 y 30 por 100; el tamaño máximo de la grava no llega a 10 cm., y en la arena una gran proporción es inferior a 1,25 mm., según se ha comprobado en los sucesivos ensayos granulométricos que reflejaron una gran homogeneidad en los bancos. En su composición mineralógica dominan la cuarcita y los basaltos cuarzosos, existiendo también algo de sílex, aceptable dada su adhesividad, superior a la que suele ofrecer este material. El coeficiente Los Angeles es del orden de 20, y la superficie específica oscila entre 60 y 80 m.²/Kg., llegando a 90 cuando se elimina por trituración toda la gravilla natural.

Los áridos de los otros ríos citados son de tamaño comparable, pero con mayor proporción de arena gruesa, procedente de granito descompuesto. Por ello, la superficie específica es menor, variando entre 40 y 50. El coeficiente Los Angeles se ha mantenido entre 22 y 26. Los aluviones están constituidos por bancos con poca uniformidad, y esto, unido a que a veces aparecen las gravas recubiertas con limo, dió lugar a importantes reducciones en la estabilidad de las mezclas producidas con algunos acopios. Esta circunstancia obligó a exigir un control más riguroso, ya que fué preciso seguir utilizando los áridos de estas procedencias, puesto que los del Rhin indudablemente mejores

por su granulometría natural, limpieza y uniformidad, resultaban prohibitivos por su distancia de transporte a muchos de los tramos revestidos.

La mejora del aglomerado a que se llegó con la trituración total, se debe principalmente a la mayor limpieza que se conseguía en los áridos con las caras de fractura, lo que está especialmente indicado para las gravillas de envoltura limosa, de difícil lavado, a las que antes aludíamos. Estimamos, pues, que no debe considerarse como condición indispensable esta de la trituración total, sobre todo cuando se trate de áridos limpios, bastando el 50 por 100 que suele imponerse para aumentar el rozamiento interno. Claró que con árido totalmente machacado se tiene la ventaja de que admite una mayor proporción de betún, con lo que se consigue un revestimiento de mayor duración.

La dimensión máxima de la gravilla ha pasado de 20 a 12 mm., con lo que se evitaron los efectos de segregación observados y se consiguió un aglomerado más compacto, bajando la proporción de huecos del 12 al 8 por 100. Nos referimos a huecos Duriez.

Se prescindió de la adición de filler cuando se comprobó que eran suficientes los finos naturales del árido utilizado. La proporción de los finos naturales aumentó considerablemente en los últimas fórmulas, como consecuencia de exigirse el machaqueo total del árido.

Pero también es preciso tener en cuenta la naturaleza de estos finos, pues hay los de tipo arcilloso, sensibles al agua, que pueden ser peligrosos. La calidad del filler natural de un acopio se estima determinando el *coeficiente de actividad de los finos* por el método de Lorthy, o sometiendo probetas de la mezcla proyectada al ensayo de inmersión-compresión (1).

En caso de mala calidad de los finos incorporados al árido, está indicada la adición de pequeñas cantidades de cal grasa, que floclula las partículas arcillosas y disminuye el riesgo de disgregación por humedades persistentes. De acuerdo con las investigaciones de Duriez, se puede añadir cal en proporciones inferiores al 2 por 100 del peso del árido; ésta produce un ligero endurecimiento del betún, pero no le envejece ni le causa ninguna alteración perjudicial al comportamiento del aglomerado. La cal se limita a fijar los ácidos nafténicos, formando sales tensioactivas que aumentan la adhesividad del ligante, por lo que da buenos resultados en los casos de gravillas síliceas.

El tipo de betún se modificó a partir de 1952; en los años anteriores se había empleado el 180/200,

(1) Ensayo de comprobación muy utilizado en Francia. Las probetas, cilíndricas, de 8 cm. de diámetro y 9 cm. de altura, moldeadas con una presión de 120 Kg./cm.², se someten a la compresión a una temperatura de 18° C., con velocidades de deformación de 1 mm./seg., unas, a las veinticuatro horas de moldeadas, y otras, después de siete días de inmersión. En las primeras se exige una resistencia mínima de 35 Kg./cm.² y en las sumérgidas menos de un 30 por 100 de reducción.

hasta que se comprobó que un betún más duro daba mayor estabilidad Marshall y una mejor adhesividad ligante-árido. Se adoptó, en consecuencia, el 80/100, utilizándose el otro tipo eventualmente en los días fríos del final de la campaña.

con la siguiente notación:

- P , porcentaje de ligante respecto al peso del árido
- K , módulo de riqueza.
- Σ , superficie específica en $m.^2/Kg.$

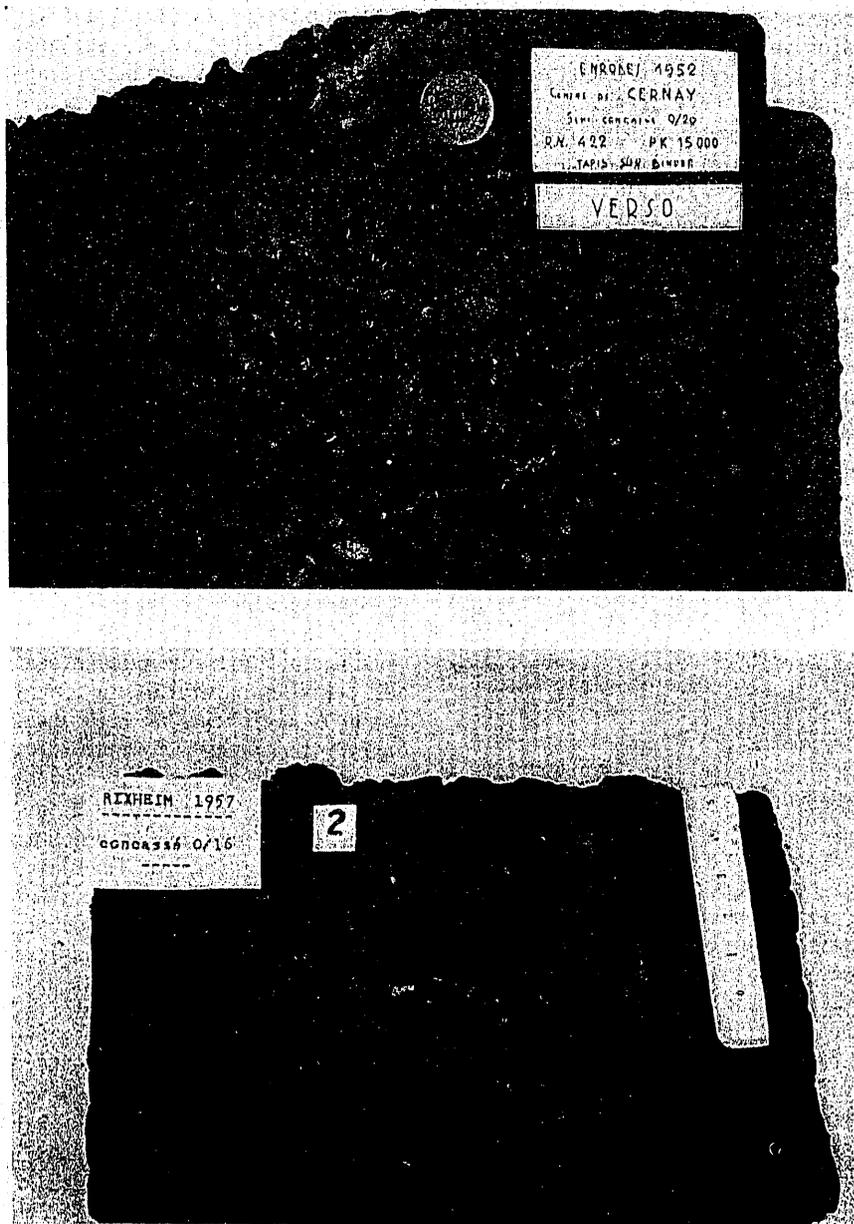


Fig. 6.^a — Aspecto de la superficie del tapiz. Campañas de 1952 y 1957. (Cortesía de M. Girardot, del Laboratorio Regional de Colmar.)

La dosificación de betún se fijó durante los primeros años por la fórmula de Duriez:

$$P = K \sqrt[5]{\Sigma}, \quad [I]$$

La superficie específica se determina con la precisión suficiente que da la expresión:

$$\Sigma = \frac{0,17 G + 0,33 g + 2,30 S + 12 s + 135 f}{100}, \quad [II]$$

en la cual las variables tienen los siguientes valores:

- G, es el tanto por ciento de gravilla mayor de 10 mm.
- g, es el tanto por ciento de gravilla fina, entre 5 y 10 milímetros.
- S, es el tanto por ciento de arena gruesa, entre 0,315 y 5 milímetros.
- s, es el tanto por ciento de arena fina, entre 0,085 y 0,315 milímetros.
- f, es el porcentaje total de filler, natural o agregado.

El procedimiento seguido es tomar veinte muestras de cada acopio y con ellas se saca una curva media, a cuyos porcentajes se aplica la fórmula [II].

A partir de 1952 se adoptó el método americano C.K.E. (Centrifuge Kerosene Equivalent), debido a Mr. Hveem, de la California Highway Division. Se basa este método en que la cantidad de ligante necesaria para aglomerar los áridos, de modo que resulte una mezcla estable, depende de la superficie de los elementos que es preciso envolver, con la salvedad, naturalmente, de otras cualidades físicas del material, como son la rugosidad y la porosidad. El profesor citado ha estudiado la correlación para numerosas muestras de áridos entre el porcentaje óptimo de ligante que se deduce de los ensayos directos de estabilidad — concretamente el del estabilómetro — y el porcentajes de keroseno que retiene una mezcla similar embebida en este producto después de sometida a una rotación que elimina el líquido sobrante.

El método se lleva a cabo saturando de keroseno una muestra representativa del árido, pero de tamaño menor de 5 mm., y sometiéndola después durante dos minutos a una fuerza centrífuga de 400 gr. (1). La cantidad de keroseno retenida es el C.K.E. El porcentaje de betún se obtiene con ayuda de ábacos en los que se corrige este valor según:

1.º La densidad de la mezcla. 2.º El porcentaje de árido de dimensión inferior a 5 mm.

El método, experimentado sistemáticamente desde hace más de quince años en el Departamento de Carreteras de California, ha dado resultados satisfactorios.

Aplicado este método en las plantas de fabricación del Alto Rhin, se estableció la correlación con los valores obtenidos por la fórmula Duriez [I], determinándose el módulo de riqueza; descendió éste en 1952 de 4,2 a 3,4, aumentándose a 3,6 en las campañas de 1956 y 1957, con lo que resultan porcentajes de ligante de 5,4 a 5,6 por 100. En la fórmula de 1958, con dimensión máxima menor en el árido, más proporción de arena fina y filler, el módulo de riqueza se aumentó a 3,7.

Los aglomerados más perfeccionados y de los que se espera mejor resultado, son los que corresponden

a los dos últimos años. Definimos a continuación, como resumen, sus respectivas fórmulas.

Aglomerado tipo 1957.

| | | |
|---|-----|---|
| Gravilla gruesa, entre 10 y 16 mm. | 22 | % |
| Gravilla fina, entre 5 y 10 mm. | 25 | » |
| Arena gruesa, entre 2,5 y 5 mm. | 23 | » |
| Arena fina, entre 0,08 y 2,5 mm. | 25 | » |
| Filler | 5 | » |
| Betún 80/100 | 5,6 | » |
| Proporción de huecos | 9 | » |

Aglomerado tipo 1958.

| | | |
|---|-----|---|
| Gravilla de 8 a 12 mm. | 25 | % |
| Gravilla fina y arena gruesa, entre 3 y 8 mm. ... | 35 | » |
| Arena fina, de 0,08 a 3 mm. | 33 | » |
| Filler | 7 | » |
| Betún 80/100 | 5,5 | » |
| Proporción de huecos | 8 | » |

En esta última fórmula la mezcla se obtuvo a partir de tres acopios: 0/3, 3/8 y 8/12 milímetros.

En la figura 1.ª se dibujan las curvas granulométricas (1) que corresponden a ambos tipos, y se comparan con el huso Duriez para hormigones asfálticos medios.

Respecto a la proporción de betún, cabe una corrección de $\pm 0,25$ por 100, de acuerdo con la posibilidad de deformación de la base del firme, con lo que corresponderá más ligante en los casos que se temen pequeños asientos y convenga, por tanto, un revestimiento más flexible. Para conseguir este mismo efecto, se pretende actuar no sobre la cantidad de betún, sino sobre su calidad, y próximamente se harán experiencias con betúnes especiales en un tramo de tráfico pesado.

Las fórmulas anteriores se refieren a aglomerados para capa de rodadura. En las mezclas que se emplean para reperfilado del firme o en capa inferior de los revestimientos de más de 5 cm. de espesor se adoptó algunas veces una fórmula diferente, del siguiente tipo:

| | | |
|---|----|---|
| Gravilla gruesa, entre 10 y 25 mm. | 43 | % |
| Gravilla fina, entre 5 y 10 mm. | 20 | » |
| Arena gruesa, entre 2 y 5 mm. | 17 | » |
| Arena fina, entre 0,08 y 2 mm. | 17 | » |
| Filler | 3 | » |
| Betún 80/100 | 5 | » |

Pero últimamente lo normal es utilizar una sola fórmula, con la única diferencia de reducir ligera-

(1) En el caso de que utilicen cribas de orificios para la identidad de tamizado, si d es el diámetro del orificio y l el lado de la malla cuadrada: $d = 1,25 l$.

(1) g , aceleración de la gravedad.

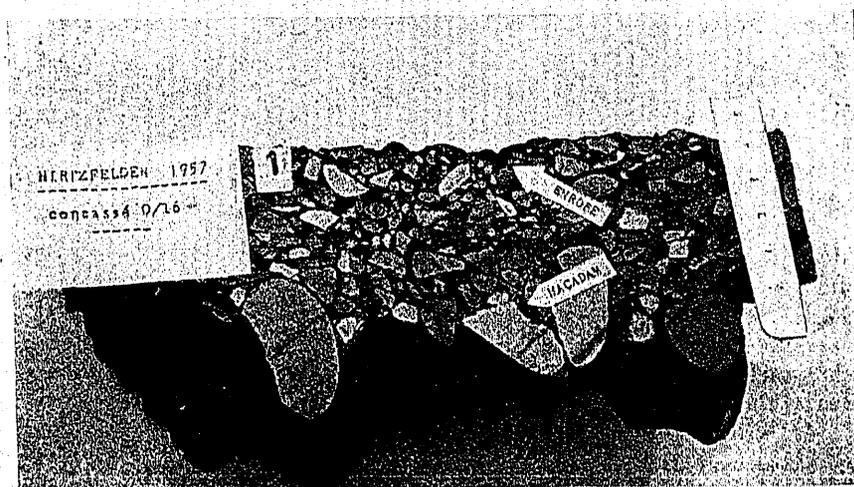
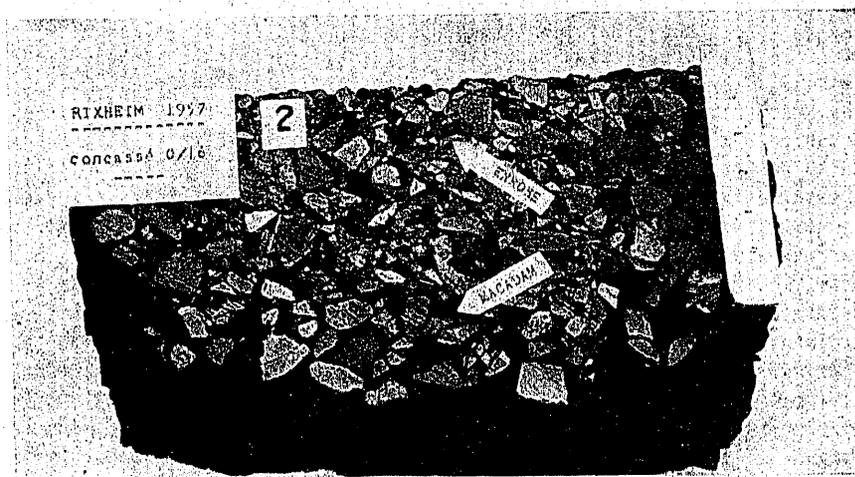
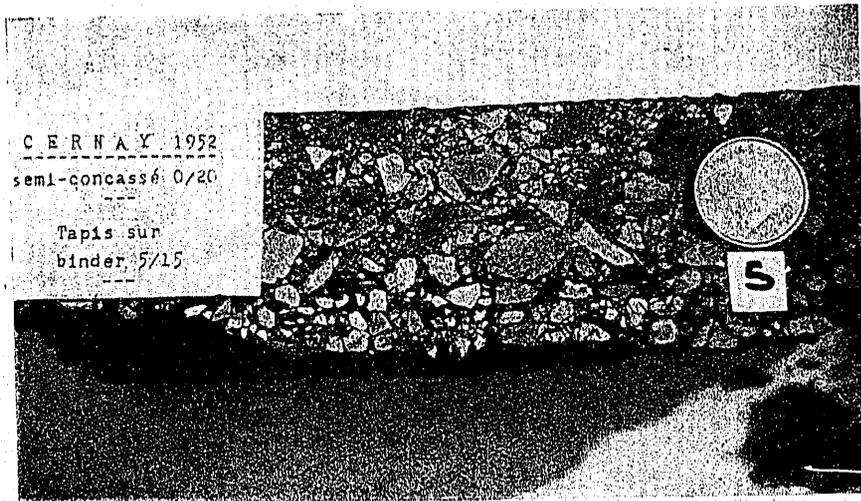


Fig. 7."— Corte transversal de tres muestras sacadas del pavimento. Campañas de 1952 y 1957. (Cortesía de M. Girardot, del Laboratorio Regional de Colmar.)

mente la proporción de ligante para el reperfilado o capas inferiores.

Consideramos de interés informar sobre la solución de aglomerados finos a la que han llegado otros departamentos que carecen de graveras y, sin embargo, tienen abundantes yacimientos de arenas duras: arenas gruesas de río, arenas de duna o de aluviones antiguos. La granulometría puede modificarse por molido.

Este tipo de mezcla pertenece igualmente al de aglomerados densos en caliente y debe adaptarse a las siguientes características:

| | | | | |
|----------------------------------|------|---|------|---|
| Arena, entre 3 y 5 mm. | 20 | à | 30 | » |
| Arena, entre 0,5 y 3 mm. | 55 | a | 30 | » |
| Arena, entre 0,08 y 0,5 mm. | 18 | a | 31 | » |
| Filler | 7 | a | 9 | » |
| Betún 180/200 | 6,75 | a | 7,25 | » |

Los límites en la proporción de filler dependen del tráfico de la carretera: el inferior, para tramos de circulación corriente, y el superior, para los que soportan más de 2 000 vehículos por día. También esto se tiene en cuenta para fijar el coeficiente de actividad del filler, que puede variar de 0,8 a 1,2. Pero, en todo caso, se exige como mínimo una relación de 0,7 en el ensayo de inmersión-compresión.

El tamaño máximo puede aumentarse hasta 7 milímetros, y en muchos casos se ha empleado como ligante un betún fluido y a veces con adición de un activante (la dosificación de ligante se fija entonces en el 7,50 por 100), que permite su aplicación con niveladora para reperfilados finos a razón de 30 a 40 kilogramos/m.² en dos capas. El tratamiento se complementa con capas de 20 Kg./m.² cada período de cinco años. Así se regenera la capa superior del revestimiento, y con estas aplicaciones sucesivas se consigue mayor flexibilidad y, por tanto, se evita el peligro de agrietado.

Fabricación y control.

El parque de material francés para aglomerados en caliente ha aumentado considerablemente en los últimos años. En la actualidad, las 32 Empresas especializadas en revestimientos de aglomerados densos en caliente cuentan con 88 plantas de capacidades comprendidas entre 20 y 120 Tn./hora. La capacidad de fabricación anual es de dos millones de metros cúbicos, y el máximo coeficiente de utilización que corresponde a 1957 es del 50 por 100.

En el Alto Rin se fué evolucionando hacia las plantas grandes, empleándose en las últimas campañas la Barber-Greene, con producción normal horaria de 120 toneladas. Son plantas de sistema continuo, que tienen la ventaja de menor coste de adquisición, menos gastos de funcionamiento, transporte más fácil y rápido; además, están especialmente indicadas

para casos como éste, en que se variaban poco las fórmulas de aglomerado; pues había que servir a grandes superficies de revestimiento de las mismas características.

No se empleó en ningún caso clasificador-dosificador, que es un aparato pesado y costoso que grava exageradamente la instalación. No crea granulometría, limitándose a comprobar la proporción constante de arena. La tendencia americana coincide con este criterio, como lo prueba que la mayoría de las plantas Barber-Greene que se han vendido los últimos años no se dotaron de ese dispositivo.

El rendimiento horario de fabricación dependió, principalmente, de la humedad de los áridos; cuando ésta es grande, además de aumentar el consumo de combustible, es más largo el período de secado, que requiere su tiempo y no se puede acortar por elevación de la temperatura, pues así puede conservarse el agua en el interior de la grava. La producción normal corresponde a una humedad del 2 por 100, que es la que, en general, se ha mantenido constante en las últimas campañas, gracias a la mejor ordenación de los acopios.

Otro inconveniente que hubo que corregir fué la segregación de los áridos, bien en acopios o después de la mezcla, al cargar ésta en los camiones.

En los primeros años se producían grandes segregaciones al acopiar el árido, ya que se descargaban los camiones en montón. Posteriormente, para evitar esto, se formaron los depósitos por estratos horizontales de poca altura, de las máximas dimensiones posibles en planta. Los estratos se nivelan con bulldozer, y con éste se empujan los áridos hacia el alimentador. Para evitar la segregación al cargar la mezcla, fué preciso disponer tolvas, cuya capacidad es del orden de un metro cúbico; en ellas se va depositando el aglomerado y se vacía de un sólo golpe en el camión.

Dado el ritmo de producción y de lo cara que resultaría una interrupción por falta de árido, se considera prudente acopiar los dos tercios del necesario para la campaña antes de que empiece la fabricación. También se prevén posibles interrupciones en el suministro de ligante, almacenando un volumen equivalente al consumo de dos o tres días.

El control de fabricación se fué haciendo cada vez más intenso; los ensayos de granulometría de los áridos, que no fueron sistemáticos al principio, se han multiplicado en el transcurso de los años, llegando a un promedio de una muestra por cada 100 metros cúbicos de árido empleado. En caso de circunstancias especiales, como nuevas instalaciones de machaqueo y cribado, o modificación de las existentes, se vigilan con mayor cuidado durante los dos primeros días, hasta que se tiene la garantía de una regularidad de producción.

Los ensayos de obra se llevan a cabo en los bien dotados camiones-laboratorios del Regional de Colmar. Se determina la superficie específica en los acopios de

nueva procedencia y sistemáticamente en los que no se extraen de las terrazas del Rhin, por causa de su poca uniformidad. El árido machacado se controla o a la salida de la machacadora o después en los acopios; se determina la granulometría y a veces se hace también el ensayo C.K.E.

Se exige menos del 0,5 por 100 de humedad en los áridos y se calientan a una temperatura de 130°, como la del ligante.

Para controlar la fabricación se hacen en obra los siguientes ensayos: 1. Dosificación de ligante. 2. Proporción de humedad de los áridos antes de entrar en el secador y antes de entrar en el mezclador. 3. Granulometría. 4. Temperatura a la salida del mezclador. Los ensayos se realizan con rapidez y en poco más de una hora pueden conocerse los resultados, para que se hagan las correcciones precisas antes de que se haya producido un volumen importante de mezcla imperfecta.

Para obtener un control aún más rápido, se va a proceder al empleo de material electrónico, con el que muy rápidamente y con gran exactitud puede determinarse el porcentaje de ligante y la densidad de la mezcla.

Se llevan cada día dos muestras de betún al laboratorio de Colmar para determinar la penetración y el punto de reblandecimiento por el método del anillo y la bola. También se hacen ensayos Marshall de muestras tomadas a la salida del mezclador y en algún caso de trozos sacados del pavimento.

Se ha pretendido llevar a cabo un análisis sistemático sobre estas muestras tomadas del firme. Para ello se cortan trozos de 35 X 30 cm., que se dividen en tres partes; sobre una se determina la granulometría y proporción de ligante; sobre otras, la compacidad, y la tercera, se vuelve a llevar a la carretera.

Aún no se ha hecho un suficiente número de ensayos para fijar conclusiones completas, pero sí bastantes para comprobar que la "atrición" (fragmentación del árido por rozamiento en el interior del revestimiento) tiene muy poca importancia, al contrario de lo que sucede en los aglomerados en frío. De los resultados se deduce que en el plazo de dos años el filler aumenta en un 1 por 100 y la arena en un 3 por 100. Interesa resaltar que no se ha apreciado diferencia entre los áridos del Rhin y los de otras procedencias de peor calidad, lo que corrobora otra de las ventajas de los aglomerados en caliente.

Extendido y compactación.

El extendido del aglomerado se hace directamente sobre el firme a revestir, o sea sin ningún riego de imprimación previo, cualquiera que sea el tipo de aquél: firme asfáltico, macadam, bases granulares consolidadas o bandas de ensanche.

La aplicación del revestimiento se ha hecho con extendedoras mecánicas Barber-Greene o con la ale-

mana Vögele, con un rendimiento horario de 100 toneladas. En las bandas laterales de las carreteras ensanchadas se emplean pequeñas Barber-Greene, tipo Junior, de 50 Tn./hora.

La planta de fabricación adoptada debe servirse por dos extendedoras Barber-Greene u otra máquina de rendimiento equiparable. Una de ellas puede incluso absorber toda la producción de la planta en caso de avería de la otra. Tienen el inconveniente de ser demasiado anchas para algunas carreteras, con la consiguiente obstaculización del tráfico y de los camiones alimentadores, por lo que se recomienda el tipo Junior citado para los caminos departamentales, especialmente en los trazados de montaña, ya que es muy manejable.

Durante la extensión del aglomerado se exige a éste una temperatura superior a los 100° C.

Los dos tipos de extendidora citados han dado buenos resultados, sin que, por tanto, se haya resuelto sobre la conveniencia del empleo de uno u otro. Puede anotarse como ventaja para los Barber-Greene que, por efecto de la cuchilla vibradora, se consigue una mayor compacidad en el extendido; por tanto, el cilindrado posterior producirá menos deformaciones en la sección perfilada.

Toda la compactación se ha llevado a cabo con cilindros de llanta metálica; se pasa primero un tandem de 6 Tn. y después uno de tres ruedas de 10 Tn. El cilindrado con llanta rígida produce, con frecuencia, fisuraciones en la gravilla que no suele apreciarse al principio, sino cuando se desgasta la película de betún que la recubre.

La mayor parte de los revestimientos se hicieron en buen tiempo y no se han tomado precauciones especiales intensificando la compactación en los tramos que se ejecutaron al final de las campañas. M. Durrien recomienda se tenga esto en cuenta en lo sucesivo, considerando que el efecto complementario del tráfico, para la compactación, es mucho menos eficaz cuando es baja la temperatura ambiente; por ello, si no se compacta bien inicialmente un aglomerado puesto en obra al final de la campaña, el revestimiento pasa el invierno en malas condiciones para resistir el tráfico y proteger de la humedad las capas de base, con muchas probabilidades de fracaso.

En las carreteras de poco tráfico se corre el mismo riesgo, aun para los aglomerados del principio de la campaña; así que en este caso tampoco puede confiarse en una compactación *a posteriori* y conseguir desde la puesta en obra una compacidad en el revestimiento muy próxima a la compacidad final, o sea a la que se llegaría después de sometido al efecto de un tráfico prolongado de gran tonelaje. En los aglomerados que hemos observado, el aumento de compacidad por el tráfico es, aproximadamente: en el primer año, pérdida del 2 por 100 de huecos; en el segundo año, pérdida del 2 por 100, y en el tercer año, pérdida del 1 por 100.

En lo sucesivo se tomarán muchas muestras de

los nuevos aglomerados, pues hay gran interés en conocer la evolución de la compacidad en el transcurso del tiempo. Ya se han comprobado diferencias de compacidad en una misma sección, correspondiendo las mayores a las muestras tomadas en las franjas que corresponden a la rodada del tráfico.

Se propone variar el sistema de compactación, adaptándose a las modernas orientaciones de la técnica americana; para ello se emplearán cilindros de neumáticos, limitando el papel de los de llanta metálica a borrar la huella del cilindrado de aquéllos. Debe empezarse con cilindros ligeros de neumáticos de baja presión, con lo que, cuando el aglomerado está aún caliente, con pocas pasadas se consigue una buena disposición y acoplamiento de las partículas de árido en la estructura del revestimiento; se pasa después un cilindro liso para borrar las huellas del primero. Se completa el cilindrado con un cilindro pesado de neumáticos de alta presión y se termina con un cilindro liso (se recomienda el tándem) para conseguir una superficie perfecta.

Empleo de los aglomerados.

Los aglomerados empezaron a emplearse en el Alto Rhin exclusivamente para capas de rodadura sobre carreteras en buen estado o regularizadas previamente con recargos de piedra machacada, en algún caso con riego de semipenetración. Las dotaciones se fijaron dependiendo solamente del tráfico entre 70 y 90 Kg./m.², o sea espesor de 3 a 4 cm. en el revestimiento.

Posteriormente, a partir de 1956, se sustituyó el antiguo sistema de regularización de la superficie del afirmado empleando también el aglomerado en capa de ligadura, con lo que se consigue el reperfilado y en muchos casos la reducción del bombeo excesivo con aplicación de cuñas o bandas laterales de 1,50 a 2 m. Con ello las dotaciones se han elevado de 160 a 190 kilogramos/m.²; hablamos de carreteras en mal estado, que necesitan un recargo previo con 100 a 130 kilogramos de aglomerado de calidad inferior y unos 60 kilogramos para la capa de rodadura.

En carreteras nuevas se considera suficiente 100 ó 120 Kg./m.², previendo además otra capa complementaria de 60 Kg. para corregir los efectos de la compactación por el tráfico.

En los tramos de gran tránsito de las carreteras antiguas se piensa en tantear los espesores del revestimiento haciendo pruebas en trozos contiguos con espesores que varíen entre 5 y 10 cm. y observando el comportamiento bajo el tráfico para determinar el espesor preciso. Es el medio más lógico, ya que se desconoce la resistencia del firme antiguo, y así no sólo se establece una capa de protección, sino que se asegura la indeformabilidad del cuerpo base-pavimento, por el efecto-losa antes citado.

Para dar una idea de la importancia de la campaña

de revestimientos en el Alto Rhin, incluimos a continuación un cuadro de los tonelajes empleados:

| AÑOS | Carreteras nacionales Toneladas | Caminos departamen- tales Toneladas | Vías urbanas Toneladas | TOTAL Toneladas |
|----------|---------------------------------------|--|------------------------------|--------------------|
| 1949 | 2.000 | — | — | 2.000 |
| 1950 | 3.000 | 6.900 | 300 | 10.200 |
| 1951 | 2.000 | 5.300 | 800 | 8.100 |
| 1952 | 36.000 | 18.000 | — | 54.000 |
| 1953 | 3.300 | 2.600 | 4.000 | 9.900 |
| 1954 | 20.900 | 30.300 | 9.000 | 60.200 |
| 1955 | — | — | — | — |
| 1956 | 44.800 | 39.900 | 6.600 | 91.300 |
| 1957 | 14.300 | 37.000 | 23.400 | 74.700 |
| Total... | 126.300 | 140.000 | 44.000 | 310.400 |

En el cuadro se advierte que las campañas de revestimiento tenían lugar cada segundo año; se debe a que los otros se reservaron para recargos de regularización. Como se ve, a partir de 1956 los revestimientos se llevaron a cabo todos los años, ya que, como antes se indicó, la reparación y perfilado de los firmes se hace también con aglomerado.

Comportamiento de los tramos revestidos.

El interés primordial de las Jornadas de Colmar era apreciar el estado de conservación de los revestimientos de las distintas campañas, apreciando sus defectos y deduciendo de ellos las correcciones precisas para llegar a una fórmula óptima de aglomerado. Es esta una preocupación de actualidad en Francia, donde se está llevando a cabo una gran encuesta, extendida a todos los Servicios del país sobre el comportamiento de los aglomerados, considerando: 1. El deslizamiento. 2. La disgregación en la superficie. 3. El desaglomerado. 4. La falta de adherencia con la capa de base. 5. La falta de estabilidad con altas temperaturas ambientes. 6. La permeabilidad. 7. La segregación de los materiales. 8. El agrietado.

Fueron sometidos a nuestro examen ocho tramos correspondientes a diferentes campañas y diferentes fórmulas de aglomerado. Se nos entregó una ficha de cada uno de los revestimientos a observar, en que se definía la composición de la mezcla y tráfico soportado, con otros datos y observaciones particulares, de cada caso. No las transcribiremos aquí para no alargar demasiado el presente trabajo y nos limitaremos a resumir nuestras impresiones sobre el comportamiento del aglomerado en la carretera.

Gran parte de los defectos observados son ajenos al revestimiento, puesto que se deben a asientos de

bases mal consolidadas o drenadas. Por esta causa se observan fisuraciones en algunos tramos. En otros ha quedado descubierto el macadam en los mordientes debido a espesor insuficiente de la capa de aglomerado.

Como defectos del propio aglomerado se aprecian en los revestimientos de las primeras campañas un exceso de ligante, con las deformaciones debidas a la falta de estabilidad que esto produce.

También se aprecia claramente la estructura poco homogénea a que dió lugar la segregación de la mezcla, con exceso de ligante en algunas partes y manchas brillantes correspondientes a zonas de mortero fino, deslizantes. Se observan alvéolos debidos al árido grueso que quedó arriba y fué arrancado por el tráfico. Hay defectos también en algunas juntas longitudinales, que se hicieron con recubrimiento insuficiente, produciéndose posteriormente disgregación en la superficie.

Todos ellos son defectos de ejecución, y aparte de éstos los únicos fracasos tuvieron lugar al principio, cuando no se conocían datos que ahora son familiares (equivalente de arena, coeficiente de actividad de los finos) y no se tenía una idea clara de las cualidades que había que exigir fundamentalmente a los aglomerados.

Esta campaña de experimentación ha enseñado mucho, y los tramos que vimos de 1956 y 1957 tienen un gran aspecto: aglomerados de tipo granudo, cerrados, muy homogéneos, con superficie antideslizante.

El balance técnico es francamente optimista. Los pavimentos defectuosos representan sólo un pequeño porcentaje de la obra ejecutada, y a la vista del estado actual de los revestimientos puede bien pronosticarse un período de más de diez años, sin necesidad de conservación alguna para las carreteras de tráfico medio. En cuanto a las carreteras de mayor tránsito de 4 000 a 5 000 vehículos/día, quizá pueda llegarse al mismo resultado aumentando el espesor del revestimiento.

Balance económico.

En el orden económico esta experiencia, bien programada y contrastada sobre revestimientos de aglomerados, ha demostrado que este tipo de pavimento (incluyendo regularización y capa de rodadura para acondicionamiento de firmes antiguos) puede competir con los procedimientos clásicos de recargo y riego, aun para las carreteras de tráfico no muy intenso, con menos de 750 vehículos diarios.

Sobre cimiento indeformable, como en el caso de tramos de nueva construcción con bases bien compactadas y saneadas, los períodos de duración pueden fijarse entre quince y veinte años, con pocos gastos de conservación, que se reducirán generalmente a un riego superficial o una capa de mortero fino. En las ca-

rrteras de gran tránsito, aunque sea preciso mayor conservación, el revestimiento es más rentable, máxime si se considera la gran economía en la explotación al reducirse considerablemente los gastos de tracción, sobre un firme con bajo coeficiente de viágrafo.

Se tiende a intensificar el empleo de los aglomerados, también por la consideración fundamental que para el abaratamiento de los precios unitarios supone la puesta en obra de grandes volúmenes. El coste viene dado por una fórmula regresiva en función del tonelaje, de la forma $A + \frac{B}{T}$.

Es por ello muy interesante una coordinación y concentración de programas, para que puedan utilizarse grandes plantas, llegando al mismo tiempo a su máxima utilización anual. Respecto a esto, consignaremos que en los datos obtenidos en las pasadas campañas se ha llegado a la conclusión de que entre los precios resultantes para la tonelada de aglomerado puesto en obra para los siguientes equipos y tonelaje anuales:

- Una planta de 120 toneladas/hora con dos extendedoras para 120 000 toneladas.
- Una planta de 50 toneladas/hora con una extendidora para 30 000 toneladas.

Hay una diferencia del 50 por 100, o sea que intensificando la producción se llega a la mitad del coste.

Considerando el programa normal del Departamento, que bien puede fijarse entre las 120 y 140 000 toneladas anuales entre carreteras nacionales, caminos departamentales y vías urbanas, el equipo óptimo es el primero de los citados, estableciendo la planta de mezcla en seis u ocho lugares como máximo. Para el transporte a pie de obra con distancias medias de 20 kilómetros se necesita una flota de 20 a 25 camiones. El rendimiento medio diario sería de 800 toneladas, pudiendo llegar a puntas de 1 400 toneladas.

Según M. Girardot, Ingeniero Director del Laboratorio de Colmar y encargado de las plantas de fabricación, el coste medio de la tonelada es de 3 500 francos para el aglomerado de mejor calidad, destinado a las capas de rodadura, y de 3 300 francos para el de regularización.

La descomposición de los precios fijados se adapta en media a los valores siguientes:

| | Para la capa de rodadura Francos | Para regularización Francos |
|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Aridos | 500 | 400 |
| Betún | 800 | 700 |
| Fabricación | 1 100 | 1 000 |
| Transporte ($d_m = 20$ Km.).... | 500 | 500 |
| Puesta en obra | 600 | 700 |
| | 3 500 | 3 300 |

Compararemos, para terminar, estos costes con los que resultan en la actualidad en España y en los Estados Unidos para aglomerados u hormigones asfálticos de tipo medio. Nos referiremos al coste del metro cúbico de revestimiento terminado, adoptando una densidad de 2,2 t./m.³ y partiendo del siguiente cambio: 1 dólar < > 55 pesetas y 100 francos < > 12 pesetas.

| Elementos del precio | COSTE DEL M. ³ EN PESETAS | | |
|---|--------------------------------------|---------|--------|
| | España | Francia | U.S.A. |
| Aridos | 200 | 130 | 80 |
| Betún | 270 | 180 | 150 |
| Fabricación | 350 | 300 | 200 |
| Transporte ($d_m = 20$ kilómetros) | 170 | 130 | 120 |
| Empleo | 200 | 190 | 100 |
| TOTAL | 1.190 | 930 | 650 |

Estas comparaciones no tienen gran valor, ya que adolecen de bastante inexactitud por la variación debida a los diferentes *standard* de vida de los tres países, salarios y costes de maquinaria y materiales. Pero sí se reflejan claramente algunas ideas en el adjunto cuadro.

El coste, bastante más reducido de los áridos en Francia que en España debido a una producción en gran escala, industrializada, muchas veces fabricada por la Administración que los suministra a los contratistas.

El betún también es mucho más barato en Francia, donde además se sirve a la planta de fabricación en vagones o camiones cisternas caloríferos a la tem-

peratura de empleo. En España, por el contrario, está muy gravado por el envase en bidones y el flete desde la destilería de Canarias.

Los bajos costes de los U.S.A. nos muestran a dónde han llegado por su gran experiencia y mecanización con un ejemplo muy estimulante hacia la intensificación del empleo de aglomerados asfálticos.

Conclusión.

Los favorables resultados de la campaña de experimentación del Alto Rhin han puesto de manifiesto la conveniencia de intensificar el empleo de aglomerados densos en caliente. En Francia, según nuestras noticias, este éxito se traducirá en un gran aumento de la producción anual de este tipo de mezclas asfálticas.

Consideramos que también en España podemos aprovecharnos de la experiencia francesa, puesto que esta clase de pavimento estará indicada en muchos casos a partir de ahora en que se impone la mejora del firme en los tramos de mayor circulación, que quedarán pronto definidos con la sistematización de aforos de tráfico que ha abordado la Dirección General de Carreteras.

Urge, por tanto, se interesen en ello nuestros compañeros encargados de la construcción y conservación de afirmados y que se vayan proyectando revestimientos de este tipo de aglomerados con la profusión posible. El intercambio de ideas y el informe sobre los resultados serán fundamentales para llegar, tras una racional y paciente evolución, a auténticas fórmulas españolas, base de unas Normas que no dudamos serán de gran aplicación en un futuro próximo.