



PROVINCIA DE BUENOS AIRES
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

DIRECCION DE VIALIDAD

**"CONCENTRACION CRITICA" DE FILLER, SU ORIGEN
Y SIGNIFICADO EN LA DOSIFICACION DE
MEZCLAS ASFALTICAS**

POR EL

Doctor CELESTINO L. RUIZ

••

S U M A R I O

- 1) Origen del criterio de "concentración crítica" del filler (C_c)
- 2) Papel del filler en las mezclas asfálticas. Area superficial y vacíos.
- 3) Consideraciones geométricas. Radio medio de los vacíos del agregado mineral y su importancia.
- 4) Estructura del sistema filler-betún aislado.
- 5) Sistema filler-betún en las mezclas densas preparadas y colocadas en caliente.
- 6) Propiedades de los betunes asfálticos en las películas finas.
- 7) Conclusiones.
- 8) Bibliografía mencionada.

•••

La Plata, Febrero de 1960
BIBLIOTECA Y PUBLICACIONES

Publicación N.º 11

REPUBLICA ARGENTINA
PROVINCIA DE BUENOS AIRES

GOBERNADOR DE LA PROVINCIA
Doctor OSCAR EDUARDO ALENDE

VICEGOBERNADOR
Doctor Arturo Andrés Crosetti

MINISTRO DE GOBIERNO
Doctor Felipe Francisco Díaz O'Kelly

MINISTRO DE ECONOMIA Y HACIENDA
Doctor Aldo Ferrer

MINISTRO DE OBRAS PUBLICAS
Ingeniero Horacio Jorge Zubiri

MINISTRO DE SALUD PUBLICA Y ASISTENCIA SOCIAL
Doctor Pascual Actis Caporale

MINISTRO DE EDUCACION
Doctor Ataúlfo Pérez Aznar

MINISTRO DE ASUNTOS AGRARIOS
Señor Bernardo Barrere

MINISTRO DE ACCION SOCIAL
Señor Antonio César Monti

SUBSECRETARIO DEL MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
Ingeniero Belgrande Ermindo Magno

DIRECCION DE VIALIDAD

DIRECTORIO

Presidente	Ingeniero Civil Rafael Balcells
Vicepresidente	Ingeniero Civil Enrique Humet
Vocales	Ingeniero Civil Luis A. Bonet
	Ingeniero Civil Juan A. Cibraro
	Ingeniero Civil Adolfo P. Grisi
	Señor Rodolfo C. Molinari
Vocales Suplentes	Ingeniero Agrónomo Aldo A. Mosse
	Ingeniero Civil Alejandro Dechert
	Ingeniero Civil Juan F. García Balado
	Señor Hermindo Guitelman
	Ingeniero Civil Héctor N. Morcillo
	Señor Antonio Posse
Secretario	Ingeniero Civil Luis M. Zalazar
	Señor Carmelo T. Merlo

INGENIERO JEFE

Ingeniero Civil Julio César Astuti

JEFES DE DEPARTAMENTO

Estudios y Proyectos	Agrimensor José A. Del Soldato, 2º Jefe
Construcciones	Ingeniero Civil Víctor Carri
Contable	Contador Vicente R. Arturi
Jurídico	Doctor Julio A. Migoni
Conservación	Ingeniero Civil Oreste Borelli
Talleres	Ingeniero Civil Ricardo Ortiz

COMISION DE PUBLICACIONES

Presidente	Agrimensor Carlos A. Marotta
Secretario	Doctor Rolando R. Tucci
Vocales	Ingeniero Civil Víctor Carri
	Ingeniero Civil César J. Luisoni
	Ingeniero Civil Julio C. Astuti
	Señor Carmelo T. Merlo
	Contador Vicente R. Arturi

PROVINCIA DE BUENOS AIRES

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

DIRECCION DE VIALIDAD

“CONCENTRACION CRITICA” DE FILLER, SU ORIGEN
Y SIGNIFICADO EN LA DOSIFICACION DE
MEZCLAS ASFALTICAS

POR EL

Doctor CELESTINO L. RUIZ

••

S U M A R I O

- 1) Origen del criterio de “concentración crítica” del filler (C_c)
- 2) Papel del filler en las mezclas asfálticas. Area superficial y vacíos.
- 3) Consideraciones geométricas. Radio medio de los vacíos del agregado mineral y su importancia.
- 4) Estructura del sistema filler-betún aislado.
- 5) Sistema filler-betún en las mezclas densas preparadas y colocadas en caliente.
- 6) Propiedades de los betunes asfálticos en las películas finas.
- 7) Conclusiones.
- 8) Bibliografía mencionada.

• • •

La Plata, Febrero de 1960

BIBLIOTECA Y PUBLICACIONES

Publicación N.º 11

1) ORIGEN DEL CRITERIO DE "CONCENTRACION CRITICA" DEL FILLER (C_s)

En el conjunto de características que determinan la calidad de un pavimento asfáltico cumplen un rol esencial las propiedades denominadas corrientemente flexibilidad, estabilidad y durabilidad (1). En este trabajo nos ocuparemos de la primera, la flexibilidad y su relación con el contenido de filler, recordando desde ya que ninguna de ellas excluye a las restantes y que el servicio útil exige que guarden armonía entre sí y con las condiciones de trabajo.

Desde un punto de vista práctico entendemos con el término flexibilidad la capacidad de una capa asfáltica para adaptarse a la inferior de apoyo acompañando sus deformaciones sin fisuramiento. Físicamente la exigencia de flexibilidad implica que la capa asfáltica pueda sufrir deformaciones que puedan ser parcialmente permanentes sin entrar en la condición de falla por fluencia plástica o rotura.

La flexibilidad es, en general, opuesta a la estabilidad, por ello, la tendencia a juzgar las mezclas asfálticas extrapolando el criterio utilizado en los pavimentos rígidos ha llevado a incrementar la estabilidad en perjuicio de la flexibilidad; su consecuencia ha sido utilizar las mezclas prácticamente denominadas "secas" que acusan fisuramiento más o menos marcado según las condiciones de trabajo de cada caso práctico. Esto es particularmente importante cuando las carpetas apoyan sobre bases relativamente débiles para los esfuerzos del tránsito que deben soportar, problema de gran interés en nuestro país planteado concretamente por Humet en la IX Reunión del Asfalto. (2)

Uno de los medios utilizados desde hace años para elevar la estabilidad de las mezclas de "asfalto artificial", también conocido por la denominación inglesa "sheet-asphalt", ampliamente utilizadas en la pavimentación urbana, es el uso excesivo de filler, particularmente en mezclas preparadas con arenas naturales con partículas de forma redondeada. Hace casi veinte años el autor tuvo oportunidad de encararlo por deficiencias de dichas carpetas en la Capital Federal (3) y posteriormente se ha insistido en este criterio en varios casos, particularmente con mezclas del tipo arena-asfalto preparadas con arenas naturales no graduadas de baja estabilidad inherente.

Lo expresado llevó como lógica consecuencia a la necesidad de establecer algún criterio para evitar el uso excesivo de filler calcáreo y más aún cuando se utilizan fillers, como la cal hidratada, de mayor poder espesante. Este fue el motivo del trabajo del autor titulado "Sobre las Propiedades Mecánicas del Sistema Filler-Betún" leído por primera vez en el año 1943 con motivo de las Reuniones de Representantes Técnicos de Productores y Consumidores de Asfalto que dieron origen a la actual Comisión Permanente del Asfalto; posteriormente ha sido reproducido en distintas oportunidades (4). En este trabajo se presenta y funda el criterio de "concentración crítica" (C_s) del filler en el sistema filler-betún.

Esencialmente este criterio se basa en considerar que las clásicas mezclas densas preparadas y colocadas en caliente como concreto asfáltico, sheet-asphalt, arena-asfalto, están constituidas por un esqueleto granular formado por los agregados gruesos y finos (excluido el filler) compactados, cuyos vacíos están ocupados parcialmente por el sistema cohesivo formado por esa dispersión del filler en el medio continuo betún asfáltico. La capacidad para sufrir deformaciones sin fisuramiento, es decir su flexibilidad, implica la existencia de deformaciones del esqueleto granular sin romper la trabazón interna dada

por la compactación, con la consiguiente deformación del sistema cohesivo en los espacios libres entre las partículas de los agregados gruesos y finos. Lógicamente, la incapacidad del medio cohesivo filler-betún para sufrir estas deformaciones sin rotura implica fisuramiento, por lo tanto la flexibilidad es una consecuencia de la magnitud y naturaleza de las deformaciones que pueda alcanzar sin falla el medio cohesivo filler-betún por los esfuerzos aplicados.

Es sabido que las deformaciones que sufren los betunes-asfálticos utilizados en pavimentación son función del esfuerzo aplicado, tiempo de aplicación y temperatura. A bajas temperaturas y corto tiempo de aplicación de los esfuerzos, tienden a compactarse como materiales elásticos; las deformaciones antes de la rotura son pequeñas y esencialmente recuperables cumpliéndose en primera aproximación la ley de Hook. Ellas quedan descritas por un módulo de elasticidad. En cambio a temperatura ambiente o mayores y con esfuerzos de larga duración (mayores del 0,01 seg.) se comportan como material viscoso en primera aproximación, las deformaciones para igual esfuerzo son grandes y función del esfuerzo, tiempo y temperatura. A temperatura constante quedan descritas por la viscosidad absoluta (η) cumpliéndose en primera aproximación la ley de Newton. El betún asfáltico impone sus características a las mezclas asfálticas, en consecuencia la flexibilidad de las mismas debe lógicamente ser función de las mismas variables, hecho que la práctica ha mostrado reiteradamente. (x).

El agregado de filler a un betún asfáltico modifica la relación entre esfuerzos y deformaciones considerando tiempo y temperatura constantes. En nuestro trabajo (4) se demostró que hasta una cierta relación en volumen entre determinado filler y el betún, el agregado de filler aumenta la resistencia viscosa del betún a temperatura constante y en consecuencia su módulo de deformación, de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$\eta_{cv} = \eta_0 \cdot e^{K \cdot C_v} \text{ , o bien } \ln \frac{\eta_{cv}}{\eta_0} = K \cdot C_v$$

donde:

η_0 y η_{cv} — son los coeficientes de viscosidad del betún solo y de la dispersión filler-betún.

C_v — es la concentración en volumen del filler en el sistema filler-betún, es decir, el volumen de filler en la unidad del sistema, o sea:

$$C_v = \frac{\text{Filler}}{\text{Filler} + \text{Betún}} \text{ en vol.}$$

K — es una constante propia de cada filler que determina la ley de crecimiento de la viscosidad en función de C_v , su valor es mínimo para

(x) Recientemente Van der Poel (5) ha propuesto con criterio teórico-práctico describir el comportamiento de los betunes asfálticos y las mezclas por un módulo S , denominado "stiffnes" en idioma inglés, igual a la razón entre el esfuerzo de tracción aplicado y la deformación total, describiendo al material por el valor S y su variación en función del tiempo de aplicación del esfuerzo y la temperatura. La "stiffnes" ha sido denominada por los autores franceses "módulo de elasticidad generalizado" y por otros "módulo de rigidez"; en esencia, no es más que un "módulo de deformación".

Considerando el caso de un betún asfáltico de 100 de penetración (25-100-5) con un índice de penetración igual a cero, el valor de dicho módulo de deformación varía enormemente en distintas condiciones prácticas, como se indica

Temperatura	Tiempo de aplicación del esfuerzo	Módulo de deformación S kg/cm ²
50°C	1 mes	$1,32 \times 10^{-5}$
50°C	1 hora	8×10^{-6}
-10°C	0,02 seg.	1×10^{-4}

Los dos primeros corresponden a deformaciones esencialmente viscosas, el tercero a elásticas; la fragilidad varía inversamente con el módulo de deformación y la resistencia a la rotura directamente.

El módulo de deformación en las mezclas asfálticas es de un orden cien veces superior al del betún utilizado, se mencionan valores de 20×10^4 kg/cm² para esfuerzos de corta duración y a temperaturas bajas y solo de 1×10^3 kg/cm² y aún menores para esfuerzos de larga duración y a altas temperaturas.

partículas redondeadas y crece con la irregularidad de forma y fineza de las partículas.

\ln — logaritmo natural.

e — base de los logaritmos naturales.

En consecuencia, hasta cierto valor de C_v propio de cada filler, el agregado de filler aumenta la magnitud de la resistencia opuesta a la deformación pero no modifica su naturaleza, que sigue siendo esencialmente viscosa. El agregado de filler produce el mismo efecto que una reducción de la temperatura, es decir, incrementa la viscosidad o bien su módulo de deformación.

Por arriba de ese cierto valor de C_v propio para cada filler las dispersiones filler-betún acusan una desviación cada vez más marcada del flujo viscoso. Junto al flujo viscoso se desarrolla cierta rigidez (viscosidad estructural) y para valores de C_v elevados la rigidez predomina sobre el carácter viscoso. En otros términos, por arriba de cierta relación filler-betún la capacidad de deformación a carga y temperatura constante disminuye rápidamente. Investigaciones posteriores de Rigden (18) han confirmado que por arriba de cierta concentración en volumen de filler existe viscosidad estructural por interferencia de las partículas o agregación de las mismas.

Por otra parte, el filler no modifica la susceptibilidad térmica propia del betún en los límites de validez de la ley mencionada, y a las temperaturas de mezclado el sistema filler-betún moja y recubre la superficie de los agregados pétreos.

Esta influencia en la magnitud y naturaleza de la resistencia a la deformación de las mezclas filler-betún era conocida a través de sus características técnicas. Evans, Taylor, Gonell, Wilhelmi, etc. habían demostrado que el agregado de fillers a los betunes asfálticos eleva el punto de ablandamiento, decrece la penetración y la ductilidad e incrementa la resistencia a la tracción. Estos cambios son aproximadamente directamente proporcionales al contenido de filler hasta un cierto valor crítico; por arriba del mismo se modifican aceleradamente y el sistema tiende a comportarse como un sólido rígido. Se explica este comportamiento por la formación de una estructura interna que determina la existencia de cierto valor de fluencia por interferencia entre las partículas por arriba de cierta relación entre el filler y el betún.

En el trabajo mencionado se denominó a la concentración de filler donde el sistema deja de ser viscoso, es decir, hasta donde se cumple la ley ya mencionada, "concentración crítica" designándola con el símbolo C_c . Dado que el máximo de validez de la ley es un valor constante del producto $K \cdot C_v$, se comprende que C_c es tanto menor cuanto mayor es la constante K ; es decir C_c decrece con la irregularidad de forma de las partículas de un filler y su fineza.

De lo dicho surge que para conservar la capacidad de deformación viscosa del sistema filler + betún es necesario que la concentración en volumen del filler en la unidad de volumen del sistema sea igual o menor que C_c y en consecuencia esta característica del filler puede servir para establecer la relación betún-filler máxima para asegurar la capacidad de deformación sin rotura del sistema cohesivo filler-betún.

La determinación de C_c en base al valor de la viscosidad absoluta de las dispersiones de filler en betún no se presta como un ensayo práctico de rutina, los métodos experimentales no tienen la sencillez y rapidez que estas tareas exigen. En consecuencia se imponía hallar un camino que permitiera determinar la concentración crítica de un determinado filler en forma sencilla y rápida.

La "concentración crítica" interpretada en base a las ideas de Bingham (6) sobre el flujo de las dispersiones, corresponde a una dispersión de las partículas del filler en el betún en el estado más suelto posible pero con contacto entre ellas, es decir cuando el esfuerzo aplicado es consumido en la deformación viscosa del medio continuo betún y la resistencia friccional entre las partículas tienden a un mínimo. Dicho arreglo de las partículas es el que aproximadamente cabe esperar en el sedimento obtenido por simple

reposo de dispersiones de filler en un medio líquido fluido y con parentesco químico con los betunes tal como el Kerosene.

La experiencia confirmó esta hipótesis. La **concentración en volumen del filler por unidad de volumen del sedimento** es prácticamente análoga a la deducida de las medidas de viscosidad absoluta para el filler dispersado en el betún. De esta concordancia surgió una técnica sencilla, fácil y rápida para determinar el valor C_s de un determinado filler en base a la cual puede calcularse la relación volumen (o peso) del filler y el betún. Esta técnica es la que se ha generalizado en nuestro medio.

Para la determinación de la "concentración crítica" se añade por pequeñas porciones un peso conocido de filler secado a 100-105°C a 20 cm³ de Kerosene seco sobre cloruro de calcio contenidos en un tubo graduado al 0,1 cm³ de 25 cm³ y diámetro interno de 15 mm ± 1 mm. Se sumerge el tubo en un baño de agua en ebullición y se agita el contenido con un alambre fino hasta eliminar totalmente el aire. Se retira del baño y deja sedimentar en reposo completo 24 horas, luego se lee el volumen del sedimento. El peso de filler empleado debe ser tal que el volumen del sedimento esté comprendido entre 8 y 12 cm³. La "concentración crítica" (C_s) se calcula por la fórmula:

$$C_s = \frac{P}{V \cdot \rho}$$

donde:

P peso de filler en g.

V volumen del sedimento en cm³.

ρ peso específico del filler seco.

En consecuencia la relación crítica en volumen, entre el filler y el betún es:

Filler = C_s .

Betún = 1 - C_s .

La relación filler-betún indicada por el valor C_s es la máxima que puede emplearse cuando se desea utilizar al filler como medio de incrementar la consistencia del betún asfáltico y con ello la estabilidad de la mezcla sin sacrificar su flexibilidad. Este criterio no significa que no puedan utilizarse concentraciones mayores de filler, sólo indica que la mayor estabilidad obtenida se consigue con sacrificio parcial de la flexibilidad.

El criterio de "concentración crítica" ha sido ampliamente utilizado en nuestro país en la dosificación de mezclas tipo concreto, "sheet-asphalt" y arena-asfalto; ha sido también empleado en otros países sudamericanos y en estudio sobre el tema, como por ejemplo los trabajos realizados en el LEMIT por Añón Suárez (7) y Pinilla (8). La Dirección de Vialidad de la provincia de Buenos Aires lo ha adoptado para la dosificación del filler en mezclas densas preparadas y colocadas en caliente y en estos últimos años lo utiliza también la Dirección Nacional de Vialidad.

Los resultados obtenidos son satisfactorios y concordantes con el criterio empírico de dosificación basado en la observación práctica. Basta mencionar el bien conocido Bull. N° 105 del año 1955 del Highway Research Board (10) donde se sugiere el uso 1, 2 partes en peso de filler para 1 de betún. Para nuestros fillers calcáreos $C_s = 0,33$ o sea:

Filler en volumen 0,33; en peso 0,33 x 2,65 = 0,874

Betún en volumen 0,67; en peso 0,67 x 1,01 = 0,676

o sea 1,29 partes en peso de filler para 1 de betún, lo que claramente indica que esta recomendación implica utilizar una proporción de filler ligeramente inferior a la indicada por el C_s .

La gran ventaja del criterio de C_s es que determina la relación propia y particular de cada filler. Esto es primordial cuando se usa como filler las cales hidratadas de alto y variable poder espesante, es decir bajo C_s , evitando así el error de reemplazar un filler

por igual peso de otro con mayor valor espesante lo que equivale a sobre fillerizar el sistema (4).

El criterio de concentración crítica ha merecido también en nuestro medio algunas observaciones y críticas, particularmente en el trabajo de Nevitt (9) leído en nuestra última Reunión del Asfalto en Tucumán y su discusión. El motivo básico de este trabajo es precisamente comentar estas observaciones y aclarar el alcance del criterio de concentración crítica en base a la experiencia ganada en todos estos años de aplicación práctica.

La observación más importante de Nevitt es que el criterio de concentración crítica implica considerar la existencia de una mezcla o sistema filler-betún que actúa como ligante de los agregados pétreos, es decir diferenciar al filler del resto de los agregados en la estructura de la mezcla. Dicho autor no admite tal diferencia y a su juicio el filler es un agregado más, caracterizado por su fineza; por otra parte acepta que el betún recubre a todos los agregados con películas actuando éstas como medio ligante.

En este trabajo se demuestra que simples consideraciones geométricas determinan la existencia del sistema filler-betún, que éste es el que recubre las partículas y ocupa parcialmente los vacíos en las mezclas compactadas de tipo denso preparadas y colocadas en caliente como el concreto asfáltico, sheet-asphalt y arena-asfalto para las cuales fue propuesto el criterio de la "concentración crítica".

Por otra parte, se muestra que este criterio surge también independientemente de la función del filler como llenador o relleno de los espacios entre las partículas de los agregados mayores. Como se verá más adelante, la concentración crítica, como índice de la relación filler-betún, consideramos que representa armónicamente la óptima condición para la resistencia viscosa, capacidad de deformación sin falla y máxima compacidad por la acción de relleno del filler en este tipo de mezclas asfálticas.

Recordamos que el criterio de "concentración crítica" no ha sido propuesto como un ensayo de calidad de los fillers, es sólo un criterio de máxima dosificación de filler para el tipo de mezclas densas preparadas y colocadas en caliente, orientado a conservar la flexibilidad evitando un exceso de filler. Por esta razón debe ser aplicado a fillers que reúnen las condiciones de aprobación, particularmente naturaleza y fineza.

Por último creemos oportuno dejar aclarado que el criterio de "concentración crítica" es un límite arbitrario del problema de la influencia del contenido de filler en la flexibilidad de este tipo de carpetas asfálticas cuya aplicación es justificable por sus resultados hasta que se conozca otro mejor. Es evidente que un estudio riguroso debe estar basado en la capacidad para sufrir las deformaciones impuestas por las condiciones de trabajo (esfuerzos, tiempo, temperatura, repeticiones) particularmente en el ámbito donde el comportamiento tiende a la máxima fragilidad y relacionadas con las características de las capas de apoyo. Este problema es sumamente complejo y estudios preliminares (18) muestran que los esfuerzos dinámicos del tránsito pueden provocar esfuerzos de flexión que sobrepasan la resistencia del material llevando a la formación de fisuras, situación en la que cumple un rol la fatiga del material. Todo lleva a suponer que será necesario establecer un cierto rango del "módulo de deformación" a la menor temperatura que pueda alcanzar la carpeta para asegurar simultáneamente la resistencia y evitar el fisuramiento teniendo en cuenta en cada caso las deformaciones de la capa de apoyo.

El problema en cuestión debe ser abordado en el presente con un criterio similar al de los clásicos ensayos empíricos de estabilidad, correlacionando observaciones de comportamiento práctico con medidas de laboratorio en determinado juego de condiciones. Los ensayos de estabilidad permiten juzgar el material en el ámbito plástico donde el esqueleto granular juega un rol básico. En cambio en el ámbito elástico es el ligante bituminoso el que ejerce el papel básico y en consecuencia la influencia de los agregados sobre sus propiedades, particularmente del filler, tiene importancia capital.

2) PAPEL DEL FILLER EN LAS MEZCLAS ASFALTICAS.
AREA SUPERFICIAL Y VACIOS

Resumiendo la voluminosa bibliografía sobre el tema, puede decirse que el agregado de filler a las mezclas densas preparadas y colocadas en caliente se justifica por las siguientes observaciones prácticas:

- a) El filler actúa como relleno con respecto a los agregados mayores disminuyendo los espacios libres entre sus partículas; ello se traduce en un mejor cerrado de la mezcla sin necesidad de incrementar exageradamente el contenido de betún asfáltico. Es lógico que la necesidad de esta actividad como relleno depende de los vacíos de la arena compactada; cuando la arena está bien graduada y la forma de las partículas permite una ajustada distribución, la necesidad de agregar filler es menor y aún puede llegar a ser inconveniente por disminuir exageradamente el espacio libre de partículas que debe ser ocupado parcialmente por el betún asfáltico y en consecuencia sería necesario dosificar mezclas pobres en ligante de menor durabilidad.
- b) El agregado de filler incrementa la resistencia a la deformación (estabilidad) de las mezclas, lo que tiene importancia particular en el caso de las de tipo fino como el "sheet-asphalt" y "arena-asfalto".
- c) El filler incrementa la durabilidad de las mezclas. Por una parte al disminuir la porosidad y dificultar la entrada de los agentes agresivos agua y aire, por la otra por la acción específica de los verdaderos fillers (calcáreos, cal hidratada, cemento portland) que mejoran la resistencia al desplazamiento del betún por acción del agua.

Las acciones a) y b) están relacionadas con el tamaño y forma de las partículas, la c) a los mismos factores y a su estructura química.

Para explicar la acción del filler en las mezclas es necesario tener presente que ella está íntimamente vinculada al contenido de betún asfáltico, por ello consideremos en primer término las orientaciones básicas seguidas en las teorías de la estructura y dosificación del betún asfáltico para las mezclas densas y graduadas sin sentar ninguna hipótesis previa con respecto al filler. Ellas pueden reunirse en dos grupos fundamentales:

- a) Las basadas en el "área superficial" de los agregados, aceptando que cada partícula individual y aislada está recubierta de una película bituminosa homogénea cuyo espesor óptimo pretende determinarse y con él la cantidad de asfalto.
- b) Las basadas en el llenado parcial de los espacios entre partículas de los agregados compactados (**) con el betún asfáltico.

Estas dos orientaciones derivan de considerar separadamente características del agregado que en realidad actúan en conjunto; nos referimos al área superficial y los vacíos. Precisamente por esta razón ninguna de ellas responde íntegramente al problema, aún considerándolo solamente desde el punto de vista geométrico para todo tipo de mezclas.

El recubrimiento de cada partícula de los agregados, inclusive el filler, por una película bituminosa, es una necesidad y una realidad en todo tipo de mezcla si se consideran las partículas aisladas, caso límite del estado suelto de las mezclas que corresponde a los procesos de mezclado, transporte y colocación. Aún en estos procesos las partículas no están separadas, se presentan hacinadas recubriendo las más finas a las mayores.

El proceso de compactación determina que las partículas queden en contacto íntimo y arreglo cerrado; esto determina el adelgazamiento de las películas del ligante en las superficies de contacto y su desplazamiento hacia el espacio libre de partículas. Para que ello sea posible es necesario que el volumen de ligante sea inferior al de los espacios libres para asegurar la formación del esqueleto granular de la mezcla.

(**) En este trabajo consideramos el caso de agregados no porosos en los cuales el espacio entre partículas se confunde con los vacíos. Para agregados porosos es necesario tomar en cuenta el betún absorbido que no actúa como ligante.

En consecuencia, si se considera una mezcla compactada en servicio, el concepto de película bituminosa homogénea recubriendo los agregados no es una realidad física; el hecho de que el espacio libre entre partículas esté ocupado en gran parte por el ligante da la impresión de que éste está en forma de películas recubriendo las partículas. A la inversa, en la misma mezcla antes de la compactación las partículas están hacinadas pero conservan su individualidad, el caso límite es considerarlas aisladas y rodeadas de una película homogénea.

La cantidad de ligante y el área superficial de los agregados son los factores determinantes del espesor de la película de recubrimiento en el estado suelto. Los espacios libres entre partículas en la mezcla compactada y la cantidad de ligante son los determinantes del llenado parcial de aquéllos. El espesor de la película primaria determina la magnitud del flujo del ligante hacia los vacíos durante la compactación.

Lo expresado muestra que el área superficial y los vacíos del agregado mineral compactados son factores conjuntos que no se excluyen. Esto es muy importante cuando se considera que la cantidad de filler es el factor determinante del área superficial de los agregados totales.

Desde el punto de vista geométrico existe una diferencia esencial cuando se considera el área superficial y los vacíos en función del tamaño de las partículas. El área superficial aumenta marcadamente con la disminución del tamaño máximo, en cambio los vacíos del agregado mineral compactado se incrementan en un grado mucho menor.

Para aclarar conceptos, mencionamos en primer término el modelo más simple y susceptible de cálculo geométrico estudiado por Manegold, Hoffman y Solf (11), sistemas de esferas iguales de diámetro pequeño con respecto al recipiente que las contiene. Dispuestas según un determinado arreglo, el espacio vacío es independiente del diámetro de esfera elegido, en cambio el área superficial crece con el cuadrado de aquél.

Volviendo a las mezclas reales, su complejidad no permite un cálculo geométrico, en cambio un simple examen de las variables determinantes del área superficial y los vacíos permiten afirmar que el volumen de betún asfáltico requerido para formar una película de espesor constante crece con el área superficial de los agregados utilizados, según una ley muy superior al incremento de vacíos que la mayor fineza puede determinar. Dado que los vacíos deben recibir el betún al ser compactada la mezcla, esta vinculación entre área superficial y vacíos cumple un rol básico para establecer cualquier principio de dosificación.

El área superficial es una característica que depende exclusivamente de los agregados presentes. Ella es función del tamaño máximo de partículas, de la curva de distribución por tamaño y, en igualdad de estas características, de la rugosidad superficial, forma de las partículas y porosidad del material constituyente de las partículas. Es bien conocido el clásico cuadro de Ostwald que muestra el crecimiento del área superficial por subdivisión de un cubo de lado igual a 1 cm que ilustra sobre la importancia del tamaño de partícula en la magnitud del área superficial en el rango que interesa, desde 1 cm de lado hasta 1 micrón.

Lado del cubo	Número de cubos	Superficie total	
cm		cm ²	
1	1	6	Volumen 1 cm ³
0,1	1.000	60	
0,01	1.000.000	600	
0,001	10 ⁹	6.000	
0,0001	10 ¹²	60.000	

Los vacíos del agregado mineral compactado dependen en primer término del trabajo de compactación aplicado durante la etapa constructiva y posteriormente por acción del tránsito. A igualdad de técnica de compactación la resistencia opuesta por las mez-

clas es variable y conduce distinta reducción de vacíos. Para fines de comparación y estudio es necesario aplicar una técnica de compactación fija y en cierto grado representativa de las condiciones de servicio, tal como la utilizada en el método Marshall para mezclas densas y graduadas preparadas y colocadas en caliente.

Aceptando una técnica de compactación constante los vacíos del agregado mineral compactado en la mezcla dependen de varios factores:

- La cantidad de asfalto en volumen debe ser siempre menor que los vacíos para permitir la compactación. Como en todo sistema granular-cohesivo existe una cantidad óptima de asfalto que permite el máximo acomodamiento de las partículas en forma similar al clásico ensayo Proctor para los suelos.
- De la gradación granulométrica. Los "vacíos mínimos" se obtienen cuando existe una cantidad de material inferior a cada tamaño capaz de ocupar los vacíos de la fracción mayor sin interferir en su acomodamiento; esto ocurre con agregados cuya curva granulométrica es continua y ligeramente cóncava. La experiencia ha mostrado que la cantidad de filler que conduce a un mínimo de vacíos en el total de los agregados es excesiva de acuerdo a la práctica corriente; en las curvas granulométricas aconsejadas para mezclas de tipo concreto asfáltico, sheet-asphalt o arena-asfalto el porcentaje de material que pasa la malla N° 200 (74 micrones) es menor que el óptimo para obtener vacíos mínimos. Ello implica que se busca empíricamente evitar que un exceso de peso N° 200 interfiera en el acomodamiento de los agregados gruesos y finos para formar la estructura granular de la mezcla y dejar espacio para recibir mayor cantidad de ligante. La ausencia de material inferior a determinado tamaño (por ejemplo N° 10) incrementa los vacíos y da origen a mezclas "abiertas". La presencia de exceso de este material fino al necesario para colmatar los vacíos de la fracción gruesa, abre la estructura granular de ésta y si el exceso es suficiente las partículas mayores pierden contacto directo entre ellas y quedan dispersas en el fino. Si la proporción de finos es inferior a la necesaria para colmatar los vacíos de la gruesa en su máximo grado de acomodación, la fracción fina no recibe en grado suficiente el esfuerzo de compactación por quedar encerrada en los espacios libres de la estructura granular gruesa y se compacta en menor grado.
- Para igual gradación pero distinto tamaño máximo, los vacíos crecen con la disminución del tamaño máximo. Este incremento de vacíos es muy inferior al aumento correspondiente del área superficial.
- Para mezclas de una determinada gradación granulométrica y tamaño máximo de los agregados la resistencia opuesta a un esfuerzo de compactación constante depende de la irregularidad de la forma de las partículas. Las más diformes tienden a acomodarse menos que las poliédricas o redondeadas.

3) CONSIDERACIONES GEOMETRICAS - RADIO MEDIO DE LOS VACIOS DEL AGREGADO MINERAL Y SU IMPORTANCIA

Dado que el medio ligante en toda mezcla asfáltica debe recubrir la superficie de los agregados en estado suelto y ocupar parcialmente los espacios libres entre partículas en el estado compactado, es evidente que la cantidad de betún debe ser función de alguna característica del agregado que vincule el área superficial y los espacios libres de partículas en el estado de compactación en que se encuentran en las condiciones de servicio.

Veamos ahora simples consideraciones geométricas que permiten relacionar el área superficial y los vacíos del agregado, en un sistema de partículas. Sean n partículas cuyo volumen sólido total es V_s , d es el diámetro si las partículas son iguales o bien el diámetro medio estadístico si son de diferente tamaño. S_t es la superficie total, f_s y f_v

son dos factores de forma para la superficie y el volumen respectivamente; en el caso de esferas $f_s = \pi$ y $f_v = \pi/6$, para partículas no esféricas $f_s > \pi$ y $f_v < \pi/6$.

Se tiene:

$$S_t = n \cdot f_s \cdot d^2 \quad V_s = n \cdot f_v \cdot d^3$$

Si se disponen las partículas según un determinado arreglo ocupan un volumen total V_t ; para la unidad de V_t existe un cierto espacio de poros entre las partículas, función de la distribución de las mismas, p , o sea la porosidad del sistema. Si $V_t = 1$, $1 - p$, es el llamado volumen sólido V_s o concentración en volumen C_v , es decir volumen sólido por unidad de volumen total.

La porosidad p mide el grado de acomodación de las partículas en base a la variable V_t . En Mecánica de los Suelos para expresar el grado de acomodación se evita la variable V_t utilizando la razón de vacíos, e , es decir el cociente del volumen de poros y sólido,

$$e = \frac{p}{1-p} = \frac{p}{V_s} = \frac{p}{C_v}$$

En el caso de las mezclas asfálticas se acostumbra expresar el grado de acomodación de las partículas del agregado en el estado compactado por los vacíos del agregado mineral (V.M.A.) es decir por la porosidad porcentual del sistema granular libre de betún.

$$V.M.A. = p \cdot 100 \quad e = \frac{V.M.A.}{100 - V.M.A.}$$

Conocida la composición en volumen de una mezcla asfáltica es posible calcular el grado de acomodación de cualquier fracción granulométrica expresada por su razón de vacíos en el estado en que se encuentra en la mezcla compactada y suponiendo que falten las restantes.

El grado de acomodación de las partículas que se consideren varía desde un máximo de densificación con íntima trabazón al que corresponde una razón de vacíos mínima, e_m , hasta el estado más suelto posible donde todavía conservan contacto las partículas al que corresponde una razón de vacíos mayor e_s . Un estado intermedio con razón de vacíos e queda definido en cada material por el grado de densidad D que varía de 0 hasta 1, en base a valores propios de e_m y e_s que le correspondan.

$$D = \frac{e_s - e}{e_s - e_m}$$

Cuando $e > e_s$ las partículas no se tocan y están dispersas en el medio que ocupa el espacio libre de partículas. Con partículas de forma regular es posible imaginar un valor de $e > e_s$ donde las partículas en reposo no se tocan pero sí se desplazan unas con respecto a las otras o giran se tocan sus envolturas de revolución.

El área superficial de un sistema de partículas queda definida por la superficie específica S_v , o sea la superficie por unidad de volumen sólido, independiente de la densidad del sólido (ρ). También se utiliza la superficie por unidad de peso S_p , función de la densidad del sólido. Se tiene:

$$\frac{S_t}{V_s} = S_v \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \right); \quad \frac{S_t}{\rho \cdot V_s} = S_p; \quad S_v = \frac{n \cdot f_s \cdot d^2}{n \cdot f_v \cdot d^3} = \frac{f_s}{f_v} \cdot \frac{1}{d}$$

Para partículas de forma geométrica definida el factor f_s/f_v es fácilmente calculable. Para esferas $S_v = 6/d$, para cubos de lado l , $S_v = 6/l$. Para partículas de forma irregular se han ideado métodos indirectos de medida.

La superficie específica de un sistema de partículas puede ser determinada por cálculo partiendo del tamaño determinado por medida microscópica, tamizado, sedimentación, etc. o bien por métodos indirectos entre los cuales el más utilizado es por medida de la permeabilidad a gases o líquidos.

La relación entre los espacios libres de partículas y el área superficial de los agregados en una mezcla asfáltica puede establecerse en base al llamado **radio hidráulico medio equivalente** m , definido como la razón entre el volumen de poros y la superficie de las partículas, hidráulicamente

$$m = \frac{\text{Volumen de poros}}{\text{Superficie de las partículas}} = \frac{\text{Sección perpendicular del conducto}}{\text{Perímetro del conducto}}$$

equivalente a un conducto donde m es la razón del área de la sección normal a la dirección de flujo y el perímetro.

Si la porosidad de un sistema de partículas es p , $1-p$ es el volumen sólido cuya superficie será $S_v (1-p)$, se tiene:

$$m = \frac{p}{S_v (1-p)} = \frac{e}{S_v} \quad (\text{cm}) \quad (\text{I})$$

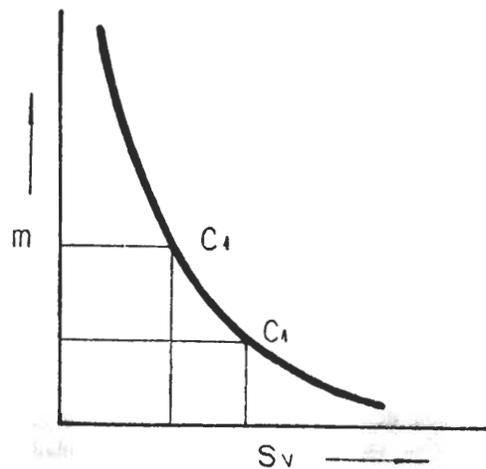


GRAFICO N° 1.

La ecuación (I) muestra que para mezclas asfálticas compactadas a un mismo grado expresado por una razón vacíos $e^1 = \text{constante del agregado}$ considerado libre de betún, el radio equivalente de poros m cae hiperbólicamente con el crecimiento de la superficie específica del agregado. En el caso que los espacios libres entre partículas estén ocupados integralmente por el betún, m tiene el sentido físico del espesor máximo de la película bituminosa que puede recubrir a las partículas del agregado aisladas y que a su vez ocupen los vacíos al compactar hasta la razón de vacíos e_1 . Gráfico N° 1.

Esto nos explica claramente que cuanto mayor es la fineza o sea mayor superficie, menor es el espesor de la película de betún si no se desea llegar a la sobre-colmatación de los vacíos al compactar la mezcla. La experiencia práctica así lo ha demostrado. Desde el comienzo de la aplicación exclusiva del concepto de área superficial, las fórmulas conducían a porcentajes aceptables para mezclas gruesas e invariablemente a exceso de betún con las finas. Esta observación condujo a la introducción de factores de corrección tendientes a reducir el espesor de película en función de la fineza.

Al respecto basta mencionar las clásicas curvas de Hveem para calcular el porcentaje de betún en base a la gradación granulométrica. En abscisas se indica el área superficial de los agregados calculada con los datos de tamizado, en ordenadas se indica el "Índice de Betún" (lbs. por pie² de área), determinado por vía experimental en base a la resistencia a la deformación óptima en el estabilómetro de Hveem.

El "Índice de Betún" cae hiperbólicamente al crecer el área superficial, en realidad

él no es más que una expresión del espesor de película obtenida con un volumen de betún inferior a los vacíos del material compactado, condición absolutamente necesaria para lograr estabilidad satisfactoria. En otros términos, se pretende llegar a un contenido óptimo de betún en base al área superficial exclusivamente y se termina por un método que indirectamente depende también de los vacíos. Lo dicho es válido para otras fórmulas basadas en el área superficial si se interpreta el sentido físico de las constantes experimentales utilizadas.

Las consideraciones mencionadas indican que desde el punto de vista geométrico interesa en primer término establecer el grado de densificación máximo que pueden alcanzar los agregados en la mezcla durante su vida útil, expresado como vacíos del agregado compactado, razón de vacíos o concentración de volumen sólido. El volumen de betún debe ser necesariamente algo inferior al espacio libre de partículas al estado compactado. La formación de películas bituminosas en el estado suelto, sólo puede interpretarse considerando a dicho volumen extendido sobre la superficie del agregado, por lo tanto las consideraciones sobre área superficial y espesor de película no son el punto de partida, son la consecuencia de las consideraciones geométricas indicadas.

El espesor de película debe contemplar necesariamente el volumen de los vacíos compactados; a nuestro juicio la mejor expresión es el radio medio m (fórmula I) tomando el valor de la razón de vacíos a que corresponde en cada caso al estado compactado de la mezcla.

4) ESTRUCTURA DEL SISTEMA FILLER-BETUN AISLADO

Las orientaciones básicas sobre la estructura del sistema filler-betún en las mezclas asfálticas son dos:

- Considerar que el filler se comporta en forma análoga al resto de los agregados mayores de los cuales sólo se diferencia por un tamaño máximo arbitrario igual aproximadamente a 74μ (tamiz N° 200). En el estado suelto de la mezcla se acepta que cada partícula está rodeada de una película de betún asfáltico igual que los agregados mayores; la compactación determina que los espacios entre las partículas más grandes sean ocupados por las más chicas y así sucesivamente. El espacio ocupado por aire (vacíos de la mezcla) está formado por un gran número de pequeños glóbulos de aire. La acción ligante o cohesiva es debida a las películas de betún que recubren las partículas al quedar en contacto.
- El filler se incorpora al betún asfáltico, las partículas quedan dispersas en él, el betún continúa siendo una fase continua. Este sistema fluido moja y rodea las partículas mayores en el estado suelto, por compactación el conjunto filler-betún es desplazado hacia los espacios libres entre las partículas mayores a los que no llega a ocupar totalmente. El espacio ocupado por aire en cada hueco entre partículas mayores, está constituido por una o muy pocas burbujas de aire. La acción cohesiva en este caso la cumple el conjunto filler-betún que ocupa los espacios libres entre las partículas mayores.

En la literatura técnica existe una inclinación a adoptar una u otra orientación en forma subjetiva; a nuestro juicio ello no está de acuerdo a la realidad dado que son posibles los dos casos en distintos tipos de mezclas, pero en cada caso particular la estructura queda determinada por simples consideraciones geométricas directamente vinculadas a lo expresado en el apartado anterior.

Con cualquier relación en volumen entre filler y betún se concibe que las partículas de filler aisladas estén recubiertas de películas bituminosas cuyo espesor medio será función del volumen de betún y del área superficial del filler. Al compactarse el sistema las partículas se acercan fluyendo el betún hacia los vacíos. Cuando el volumen de betún es igual al del espacio libre entre las partículas, no puede alcanzarse mayor densificación del filler y el betún forma un medio de dispersión continuo. Si dicho volumen es menor,

cabe esperar una mayor densificación del filler y si el volumen de betún es suficientemente reducido quedan espacios libres ocupados por aire. En consecuencia la estructura del sistema filler-betún compactado queda determinada por la relación entre el volumen de betún y espacios libres entre las partículas del filler, es decir el grado de densificación alcanzado por este último.

El grado de acomodación de las partículas de filler puede variar desde un máximo, al que corresponde mínima porosidad y razón de vacíos suponiendo un contenido de betún inferior a la porosidad mínima y que el trabajo de compactación es suficientemente intenso, hasta el estado suelto o disperso en el cual las partículas no se tocan y están suspendidas en el medio continuo betún. Un estado intermedio es aquél donde las partículas conservan un mínimo de contacto entre sí pero están lo más sueltas posibles, es decir, el que corresponde a la "concentración crítica".

Para una determinada relación en volumen filler-betún la estructura del sistema compactado está fijada por esa relación y en consecuencia no es aleatorio aceptar uno u otro de los criterios mencionados.

Para concentraciones en volumen de filler igual o inferiores a la concentración crítica C_s , el volumen de betún ocupa totalmente los espacios libres entre partículas formando un medio de dispersión continuo, es decir, una dispersión de filler en el betún. Esta dispersión se obtiene por simple agregado y agitación del filler al betún fundido y la compactación posterior no densifica el sistema. Con estas relaciones puede suponerse a cada partícula de filler aislada recubierta de una película de betún de espesor medio determinable conociendo el volumen de betún y el área superficial del filler.

Para concentraciones en volumen de filler superiores a la crítica C_s puede ocupar o no totalmente los vacíos entre las partículas del filler según el grado de densificación, es decir del trabajo de compactación aplicado. Si la concentración es suficientemente alta, el volumen de betún puede ser aún inferior a los espacios libres en el máximo grado de acomodamiento.

Se ha considerado oportuno determinar estas distintas posibilidades con un filler calcáreo corriente. Para ello se prepararon mezclas con cantidades crecientes de betún asfáltico tipo 180-200, calentando ambos componentes a 150°C mezclando a dicha temperatura hasta uniformidad y compactando probetas según la técnica del ensayo de estabilidad Hubbard-Field. Esto es posible hasta 15 g de betún para 100 g de filler; cantidades mayores conducen a mezclas plásticas de difícil moldeo.

En base a la composición y pesos específicos de los componentes y las probetas y de la superficie específica del filler (2000 cm/g) determinada por permeabilidad, se han obtenido los valores representados en el gráfico N° 2 donde se relaciona los vacíos del filler compactado (V.M.A. = 100.p) supuesto libre de betún y los vacíos ocupados por aire en el sistema, con el contenido de betún asfáltico. Para cada mezcla se indica la razón de vacíos (e) del filler considerado libre de betún, el radio medio de poros (m) calculado por la fórmula I, el espesor medio de la película de betún y la concentración en

$$\text{volumen } C_v \text{ del filler en el sistema o sea la relación } \frac{F}{F+B} \text{ en volumen.}$$

La curva I del gráfico N° 2 muestra que bajos porcentajes de betún determinan un valor de porosidad (V.M.A.) del filler superior al máximo de densificación obtenido por vibrado y golpeteo del filler solo (28,5), luego decrece la porosidad pasando por un mínimo con 14 de betún para aumentar posteriormente. Con esta cantidad de betún se llega a un mínimo de vacíos del sistema ocupados por aire (curva II); este mínimo no es cero por la imposibilidad práctica de evitar la oclusión de aire durante la preparación de las mezclas.

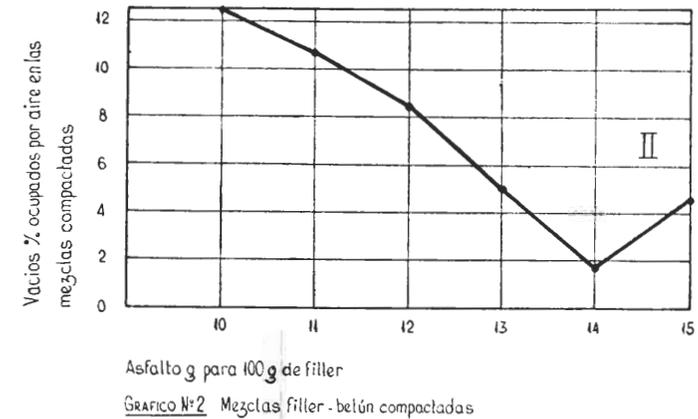
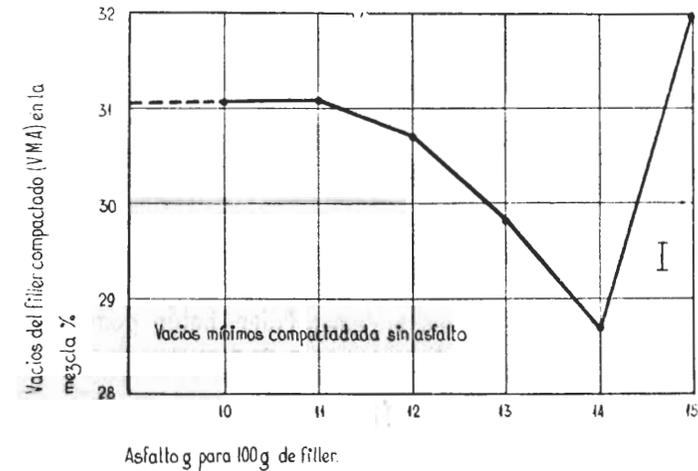
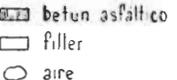


GRAFICO N° 2 Mezclas filler - betún compactadas

Razon de vacíos C	0,45	0,45	0,445	0,425	0,40	0,47
$C_v \cdot \frac{F}{F+B}$ en vol.	0,785	0,77	0,75	0,74	0,725	0,71
Radio medio de los poros m en micrones	0,84	0,84	0,825	0,79	0,74	0,87
Espesor de la película asfáltica en micrones sobre las partículas aisladas		0,5	0,55	0,6	0,7	0,86

En el cuadro N° 1 hemos representado esquemáticamente la estructura del sistema. La columna II representa el sistema con el máximo grado de acomodación de las partículas de filler estando los espacios libres ocupados totalmente por el betún. Esta es aproximadamente la estructura con 14 g de betún asfáltico para 100 g de filler; en ella el betún forma una fase continua salvo la pequeña cantidad de aire ocluido, las partículas de filler están en el grado máximo de acomodación para la técnica aplicada. Si se imaginan las partículas separadas, puede considerarse que están recubiertas de una película bituminosa con espesor medio de 0,7 micrones, si se las compacta reconstruyen el sistema inicial.

La columna I representa una reducción de betún; no se produce la correspondiente disminución del volumen total porque ya existe la estructura máxima entre las partículas; a la inversa se observa un aumento del radio medio de poros probablemente porque la reducción de betún hace más difícil la compactación. Necesariamente existe

Cuadro N°1. Diferentes sistemas filler-betún-compactados				
Filler usado calcareo, pasa n° 200, 78%, p. 265; C _s = 0,31. S _p = 2000 cm ³ /g, S _v = 5300 cm ³ /cm ³				
Columna	I	II	III	IV
Esquema de la dispersión 				
Tipo	Máxima densificación		Estado mas suelto con contacto. C _s	Estados dispersos
Vacios % del filler considerado libre de betún (VMA)	Igual o ligeramente superiores a 28.	28	69	Mayores de 69
Vacios ocupados por aire % de la mezcla	Superior a cero	nulos	nulos	nulos
Concentración en vol del filler. C _v = $\frac{F}{F+B}$	Mayores de 0,72	0,72	0,31 = C _s	Menores de 0,31
Razon de vacios, e, del filler considerado libre de betún	Igual o ligeramente superiores a 0,39	0,39	2,22	Superiores a 2,22
Radio medio (m) en micrones de los vacios del filler considerados libres de betún	Igual o ligeramente superiores a 0,74	0,74	4,2	Superiores a 4,2
Espesor en micrones de la película bituminosa sobre las partículas aisladas	Menores de 0,7	0,7	4,2	Superiores a 4,2
Composición en peso: betún asfáltico en g para 100 g de filler	Menos de 14,7	14,7	84	Mayor de 84

inclusión de aire y la fase dispersa tiende a ser cada vez más discontinua por la presencia de vacíos ocupados por aire. La estructura es aquí análoga a la de las mezclas asfálticas completas, son micro-mezclas donde el filler forma una micro-estructura granular semejante a la originada por los agregados mayores en las mezclas asfálticas. Corresponden a este tipo las mezclas con menos de 14 g de asfalto para 100g de filler del gráfico N° 2.

Al incrementar el contenido de betún sobre el indicado por la columna II, la estructura interna se abre por superar el volumen de betún al espacio libre y existe aumento del volumen total. La estructura abierta determina menor rigidez y la dificultad para su moldeo. Si se sigue incrementando el contenido de betún es evidente que se llegará a una concentración de filler donde la estructura tiene su expresión mínima, columna III, las partículas se encuentran en el estado más suelto posible pero conservando contacto entre sí, es decir en la condición de "concentración crítica" C_s = 0,31 con este filler.

Un incremento mayor de betún, columna IV, determina una dispersión de las partículas de filler en el medio continuo asfáltico sin contacto obligado entre ellas. En el estado III o IV el sistema filler-betún fluidifica por calentamiento y puede mojar y extenderse sobre otras superficies con la única limitación geométrica de que el espesor de película estará limitado por el diámetro de las partículas de filler.

Relacionando el gráfico N° 2 con el cuadro N° 1 para concentraciones en volumen de este filler menores de C_v = 0,72 el sistema filler-betún compactado debe ser descripto como una dispersión de filler en betún. Sólo pueden concebirse películas de betún suponiendo a las partículas de filler aisladas. Entre 0,31 y 0,72 el betún presente puede o no ocupar totalmente los espacios libres entre las partículas del filler de acuerdo al grado de densificación del filler. Esto plantea el problema de medir, la densificación del filler en el sistema filler-betún que ocupa los espacios libres entre las partículas de los agregados mayores en una mezcla asfáltica, que será considerado más adelante. Para valores de la concentración de filler en volumen menores de 0,31 el sistema filler-betún, aún sin compactar, sólo puede ser descripto como una dispersión dado que siempre el betún ocupa totalmente los espacios entre partículas.

Para valores de la concentración de filler (C_v) mayores de 0,72 existe una micro estructura granular en el sistema. Los valores C_v para cada caso son particulares de cada filler y deben ser función de la fineza y forma de las partículas.

Lee y Marwick (17) han estudiado la relación entre un esfuerzo constante y la velocidad de deformación para mezclas compactadas de distintos fillers y ligantes bituminosos en función de la cantidad de filler. Cuando el contenido de ligante es inferior a los vacíos del filler compactado (columna I de nuestro cuadro N° 1) la deformación antes de la rotura tiende a un mínimo; cuando es justo dicho valor (columna II) la deformación es mayor y la velocidad de deformación es mínima ofreciendo el máximo de resistencia al esfuerzo; para mayores contenidos de ligante (columnas III y IV) crece la deformación y la velocidad de deformación. Con el criterio de máxima resistencia a la deformación del sistema de dichos autores, el contenido óptimo de ligante corresponde a la columna II. Lógicamente esto sólo es válido si el sistema alcanza el grado de densificación indicado.

5) SISTEMA FILLER-BETUN EN LAS MEZCLAS DENSAS PREPARADAS Y COLOCADAS EN CALIENTE

Para aplicar el criterio de la "concentración crítica" C_s mencionado a una mezcla asfáltica densa del tipo concreto, sheet-asphalt o arena-asfalto, es necesario concebir la estructura de la mezcla de la siguiente manera:

- En el estado compactado existe una estructura granular esquelética formada por los agregados mayores (gruesos y finos) cuyos vacíos entre partículas están ocupados parcialmente por el sistema filler-betún, el resto son los vacíos de la mezcla ocupados por aire. Se comprende que el filler existente en los vacíos de la estructura granular actúa como relleno y la cantidad del mismo no debe perturbar la formación del esqueleto granular, en el caso contrario el exceso de filler abre al mismo.
- En el estado suelto las partículas mayores están recubiertas de películas del sistema filler-betún cuyo espesor máximo no puede lógicamente ser menor que el diámetro de las partículas del filler.

Para demostrar esta hipótesis hemos estudiado experimentalmente, con mezclas preparadas con un mismo criterio de dosificación del betún asfáltico independiente del

criterio de "concentración crítica" del filler y compactadas con un mismo trabajo de compactación, la influencia de cantidades crecientes de filler en: a) área superficial del agregado total incluyendo el filler; b) espacio entre partículas de los agregados mayores considerados libres de betún y filler; c) espacio entre partículas del agregado total libre de betún; d) radio medio de los vacíos en los casos b y c; e) espesor de la película de recubrimiento en estado suelto para los casos b y c; f) grado de densificación del filler en los espacios libres del esqueleto granular.

Los resultados experimentales deben dar respuesta a las previsiones geométricas antes mencionadas en la condición de trabajo de las mezclas; por otra parte permitirán relacionar los valores obtenidos sin intervención del criterio de "concentración crítica" con la relación establecida "a priori" por él en base al valor C_s hallado para el filler usado.

Para tal fin se operó con arena graduada que responde a las exigencias granulométricas para "sheet-asphalt" mezclada con filler calcáreo comercial en proporciones del 0 al 25 por ciento de filler en peso de este último sobre el agregado total. El contenido óptimo de betún asfáltico se dosificó en cada caso según el método Marshall (12) y se indica entre paréntesis para cada mezcla en el gráfico N° 3. Las probetas se compactaron por dicho método.

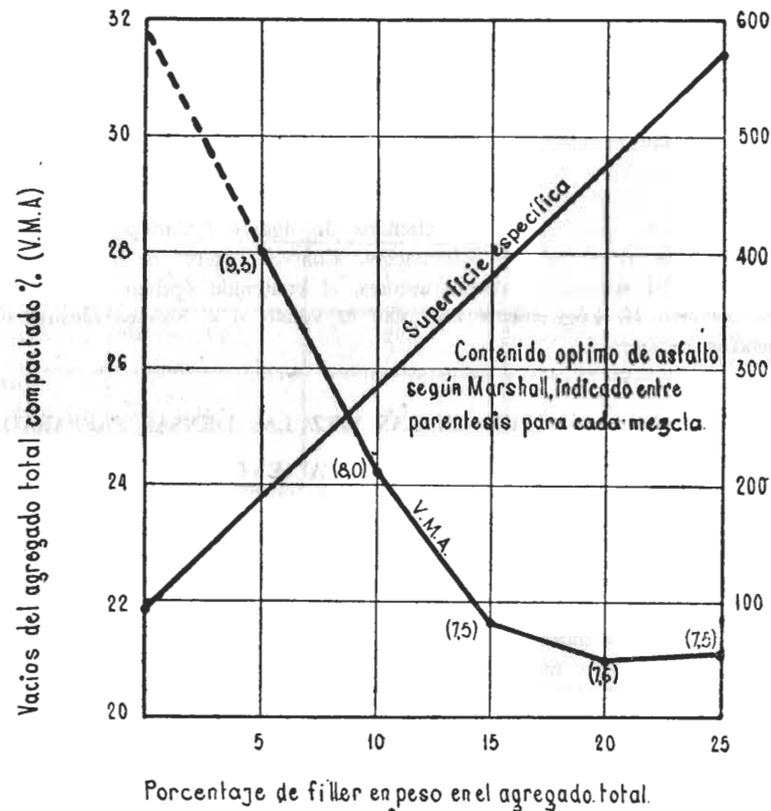


Gráfico N° 3. Mezclas de sheet-asphalt con la misma arena y distinto contenido del mismo filler dosificadas según Marshall.

En base a los pesos específicos de cada componente y el de las probetas, se calculó en la forma corriente la composición en volumen de cada mezcla. Por separado se calculó

la superficie específica de la arena (95 cm²/g) y por permeabilidad al aire se determinó la del filler (2000 cm²/g).

La proporción de filler se llevó solamente hasta el 25 por ciento del agregado total, dado que para mayores contenidos de filler es aleatoria la determinación del contenido óptimo de betún por el método Marshall, confirmándose así lo indicado en la referencia (12), por tratarse de mezclas consideradas críticas por dicho método por su excesiva "fluencia Marshall".

En el gráfico N° 3 se representan los vacíos del agregado total (V.M.A.) y el área superficial en función del contenido de filler en el agregado.

A cada incremento de filler le corresponde uno proporcional del área superficial del agregado total por ser una propiedad aditiva. Los vacíos del agregado total compactado (V.M.A.) disminuyen linealmente hasta algo más del 10 por ciento de filler, luego más lentamente tendiendo a un valor aproximadamente constante.

En el gráfico N° 4 se presentan los vacíos ocupados por aire de la mezcla com-

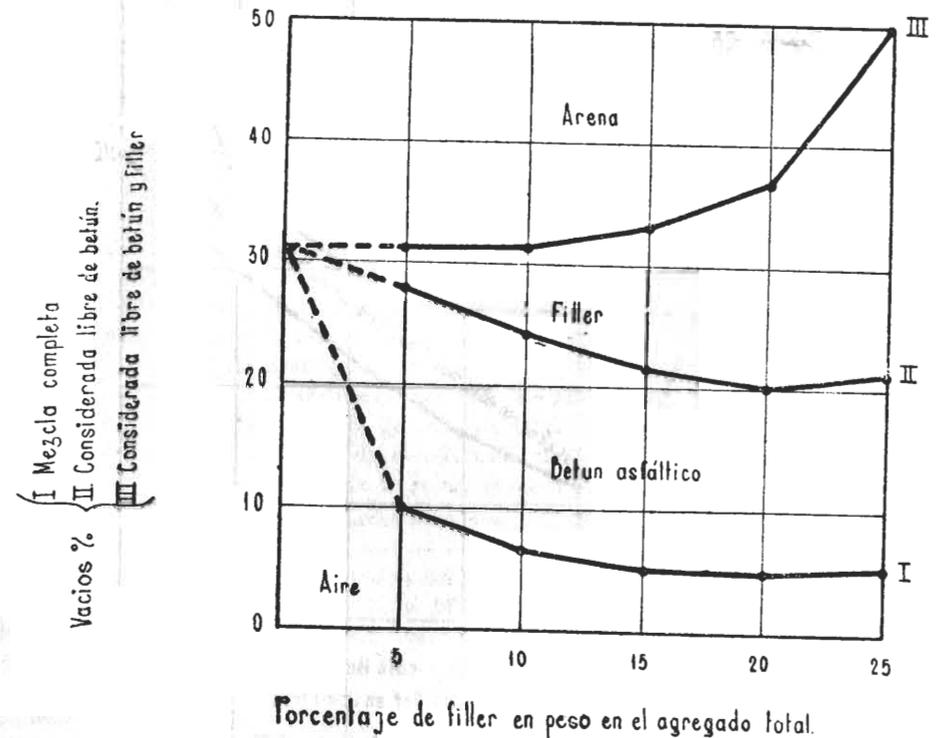


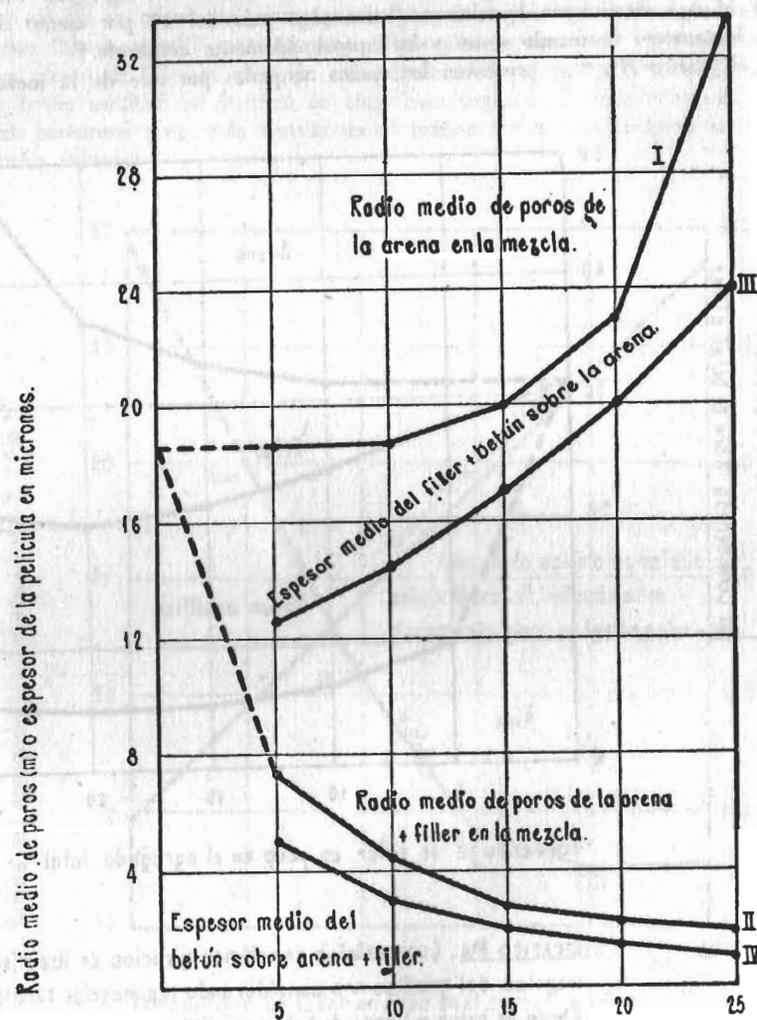
Gráfico N° 4. Composición en volumen y vacíos de las mismas mezclas del gráfico N° 3 considerando las mezclas totales, libres de betún y libres de betún más filler.

pleta en la curva I, los vacíos del agregado total considerado libre de betún, II y los de la arena libre de betún y filler, III, en el grado de arreglo que tienen en la mezcla compactada; todos en función del contenido de filler en el agregado total.

Estas curvas muestran claramente que los espacios libres entre las partículas de arena sola se mantienen constantes hasta 12-13 por ciento de filler; este sólo actúa como relleno disminuyendo los vacíos del conjunto. En otros términos, existe en la mezcla

una estructura granular formada por la trabazón de las partículas de arena cuyo espacio libre constante está ocupado por aire, betún y filler en proporción variable.

Para contenidos de filler superiores al 12-13 por ciento el espacio libre de la arena sola crece continuamente pese a que el volumen de filler más betún es inferior a los vacíos de la arena sola. Esto sólo puede interpretarse como una interferencia del filler en la acomodación de las partículas de arena que se traduce en una estructura granular de la arena sola más abierta; ello implica que la acción de recebo del filler es compensada por la abertura de la estructura granular de la arena y los vacíos del agregado total tienden a un valor constante como lo indica claramente la curva II del gráfico N° 4. Para contenidos de filler superiores al 20 por ciento es evidente que la estructura granular de la arena sola es tan abierta que el conjunto tiende a una dispersión de partículas de arena en el sistema filler-betún.



Porcentaje de filler en peso en el agregado total

GRÁFICO N° 5.- Radio medio de poros y espesor de película de las partículas aisladas en las mismas mezclas de los gráficos N° 3 y 4.

Lo expresado muestra claramente que un contenido de 12-13 por ciento de filler marca el máximo crítico para la acción de recebo del filler conservando la estructura granular esquelética de la mezcla aportada por la arena.

Esta conclusión se aprecia aún más claramente en el gráfico N° 5. La curva I expresa el cambio del radio medio de los poros entre las partículas de arena sola, calculados por la fórmula I, en función del contenido de filler. La curva II, la acción de recebo del filler disminuyendo el radio medio de poros del agregado total.

En consecuencia tanto los vacíos como los radios medio de poros revelan claramente la existencia de dos tipos de estructura granular extremos y una zona intermedia. La diferencia básica es que hasta cierto contenido de filler crítico éste actúa como recebo de la estructura granular constante formada por la arena; por arriba de dicho valor crítico las partículas de arena tienen un arreglo más abierto y tienden a quedar dispersas en el filler. Lógicamente en el primer caso la estructura granular de la arena impone sus características a la mezcla, actuando el filler-betún de relleno cohesivo, en el segundo el sistema filler-betún es el factor determinante y la arena un diluyente.

La curva I del gráfico N° 5 marca claramente estos dos tipos de estructura. En este ejemplo el radio medio de poros de la estructura granular de la arena formada por la compactación Marshall es de 18,5 micrones y se mantiene aproximadamente constante hasta el contenido crítico de filler; para mayores porcentajes crece rápidamente.

En el gráfico N° 5 se indica el espesor medio de la película (volumen del betún + filler/área de la arena) de betún-filler recubriendo la superficie de la arena (curva III) y el del betún solo recubriendo la superficie de la arena más filler (IV). Ambos espesores son inferiores al radio medio de los poros que las contienen al estado compactado, es decir, geoméricamente compatibles. La marcha de las curvas III y IV no dan indicación alguna sobre los dos tipos de estructura de la mezcla ya mencionados lo que demuestra que el criterio exclusivo de área superficial no basta para describir la estructura de las mismas.

La existencia de una proporción de filler crítica en el agregado total de la mezcla necesaria para conservar la estructura granular de la arena indica que cuando el filler adquiere cierto grado de densificación en los espacios libres de la arena por la compactación aplicada a la mezcla, un mayor contenido de filler puede densificarse más pero al mismo tiempo se abre la estructura granular de la arena. (**).

Puede calcularse el grado de densificación del filler, expresado por la razón de vacíos (e), en los espacios libres de la arena, es decir:

$$\frac{\text{Vacíos de la arena} - \text{volumen del filler}}{\text{Volumen del filler}} = e$$

En la mezcla con 10 por ciento de filler, tenemos $e = 3,2$, es decir, que con escasa densificación del filler se está cerca del valor crítico mencionado. En el gráfico N° 6 se representa la razón de vacíos del filler en los espacios libres de la arena en las distintas mezclas; la marcha de la curva muestra que la compactación Marshall no permite alcanzar elevada densificación de filler y que aún con elevado tenor de filler solo es ligeramente mayor que la que corresponde a la concentración crítica indicada en el cuadro N° 1.

Las relaciones establecidas hasta ahora en este apartado son independientes del criterio de "concentración crítica". Para el filler usado ésta es $C_s = 0,31$, es decir que

(***) Gonella, Font y Petroni (21) en sus estudios de dosificación de mezclas conchilla, filler, asfalto utilizando el método de dosificación indicado en base al llenado parcial de los vacíos con el sistema filler-betún, llegan también a la conclusión que existe un volumen crítico de este último para mantener la estructura granular de la conchilla. Sus C_v del filler agregado son bajas pero es necesario tener presente que la conchilla utilizada contiene 9 % de pasa N° 200 que puede actuar como filler. Recalculando sus datos en base a esta suposición en su mezcla N° 2, el radio medio de poros de la conchilla es de 22 micrones y el espesor de la película filler más betún sobre la conchilla retenida en el N° 200, es de 18,2 micrones, es decir de un orden ligeramente superior al determinado con nuestra arena. El espesor de la película de filler-betún en ambos casos es del mismo orden que la mencionada por Mack (15) para sus mezclas arena-filler-asfalto que varía de 12,4 a 19,9 micrones según el origen del betún asfáltico.

se recomendaría usar una concentración en volumen de filler en el sistema filler-betún ligeramente menor, por ejemplo 0,30 como máximo.

En las mezclas con distinto contenido de filler el betún óptimo ha sido determi-

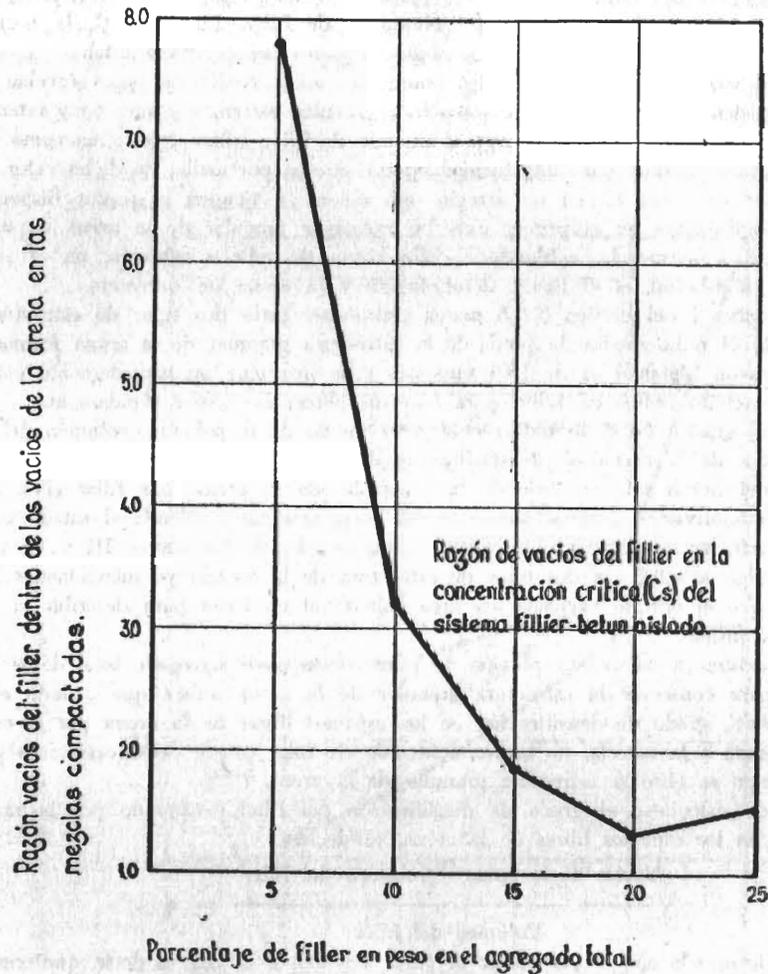


GRAFICO N° 6 Densificación del filler en las mismas mezclas de los gráficos N° 3, 4 y 5

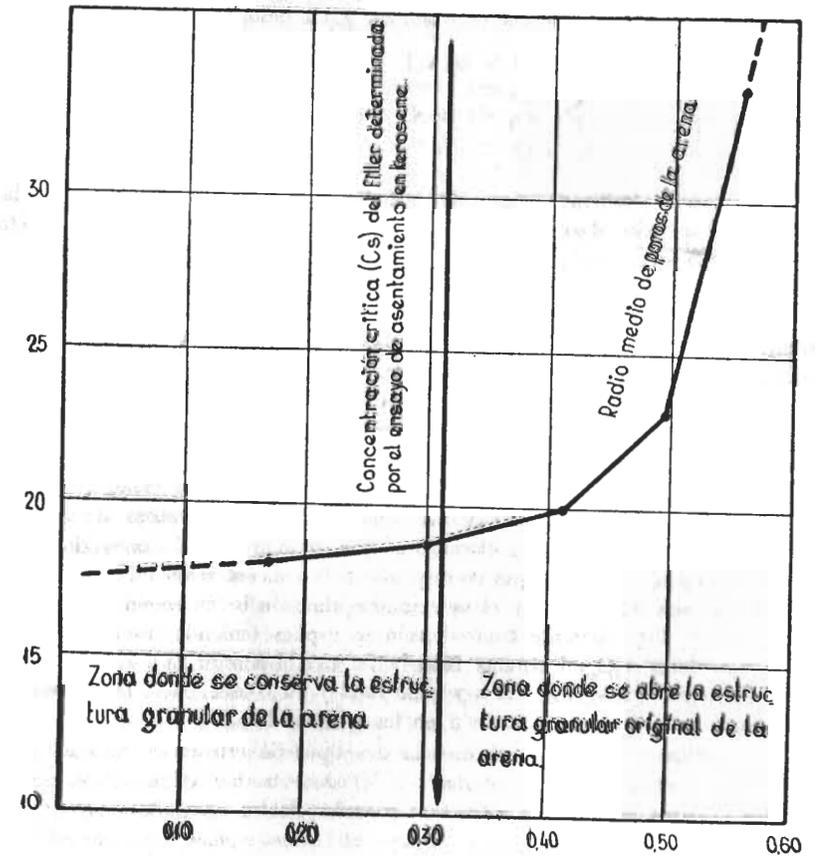
nado según el método Marshall. A cada contenido de filler le corresponde un óptimo de betún y en consecuencia una cierta concentración de filler en el sistema filler-betún (C_v), hallada independientemente de toda consideración previa sobre esta relación, es decir utilizando exclusivamente el método Marshall de dosificación. En el gráfico N° 3 se indica el betún óptimo para cada contenido de filler, lo que permite calcular la concentración en volumen de filler en el sistema filler-betún que resulta óptima según Marshall en cada caso.

El gráfico N° 7 relaciona esta concentración en volumen del filler en el sistema filler-betún C_v con el radio medio de poro de la estructura granular de la arena, que es un índice del grado de compactación logrado por ella en la mezcla. El valor $C_v = C_s$ coincide casi exactamente con el comienzo de la tendencia a abrir la estructura granular

de la arena que corresponde a las mayores relaciones $\frac{F}{F+B} = C_v$. Esto implica que

aplicando al método de dosificación Marshall el criterio de "concentración crítica" el valor C_s es un medio de conservar en la mezcla la estructura granular máxima que pueden lograr los agregados mayores frente a un trabajo de compactación constante, es decir, coincidente con el máximo de actividad como relleno de filler que no puede ser previsto

Radio medio en micrones de los vacíos de la arena en las mezclas compactadas



Concentración en volumen del filler en el sistema filler-betún, $C_v = \frac{F}{F+B}$, en las mismas mezclas, de los gráficos N° 3, 4, 5 y 6 dosificadas según Marshall.

GRAFICO N° 7.- Influencia del filler en la estructura granular de la arena y su relación con la concentración crítica (C_s).

por el método Marshall solo. Esto es lo que interesa en mezclas densas del tipo arena-asfalto, sheet-asphalt o concreto asfáltico para las cuales fue propuesto el criterio de concentración crítica de filler.

Comparemos ahora el método de dosificación por llenado de vacíos con el Marshall. Para dosificar una mezcla tipo sheet-asphalt con la arena utilizada en base al criterio de "concentración crítica" de filler solo se necesita conocer los vacíos de la misma

lubricada y compactada y el valor C_s del filler; luego se ocupa el 80 % de los vacíos de la arena con un sistema filler-betún cuya concentración en volumen de filler es ligeramente menor que la indicada por el C_s del filler.

- Vacíos de la arena compactada = 31,8 %
- Vacíos a ocupar con filler-betún = $31,8 \times 0,8 = 25,4$ %
- Vacíos finales de la mezcla = $31,8 \times 0,2 = 6,4$ %
- C_s del filler = 0,31; se adopta como máximo 0,30 %
- Filler en vol. = $0,30 \times 25,4 = 7,3$ %
- Betún en vol. = $0,70 \times 25,4 = 17,8$ %

Composición de la mezcla en volumen y en peso:

	6,4 % en vol.		-	por	ciento	en	peso
Vacíos	6,4	"	"	8,1	"	"	"
Betún	17,8	"	"	8,8	"	"	"
Filler	7,3	"	"	83,1	"	"	"
Arena	68,5	"	"				

La mezcla dosificada con este criterio es prácticamente análoga a la obtenida empleando el método Marshall utilizando 10 % en peso de filler en el agregado total. Ya hemos indicado que ésta proporción de filler es la óptima para conservar la estructura granular de la arena y por su valor C_v también lo es para conservar la capacidad de deformación viscosa del sistema ligante filler-betún. Surge claramente que el criterio de concentración crítica de filler asegura "a priori" estas dos características al fijar un máximo de filler lo que no sucede con el método Marshall. Por esta razón ya hemos indicado en una publicación anterior (1) que cuando se desea dosificar con el método Marshall es necesario agregar otra exigencia, no pasar la concentración crítica en la relación filler-betún. Creemos oportuno indicar que el método Marshall acusa sólo groseramente las mezclas super-fillerizadas o críticas por su elevada fluencia Marshall (12), en cambio el criterio de concentración crítica descarta toda posibilidad de exceso de filler.

El gráfico N° 3 muestra claramente que al aumentar el contenido de filler en el agregado total por arriba del que corresponde a la concentración crítica C_s , el área superficial del agregado total crece y el contenido óptimo de betún según Marshall tiende a un valor constante. Esta aparente contradicción se explica teniendo presente el gráfico N° 7; para C_v superiores a C_s el sistema filler-betún tiende a abrir la estructura granular de la arena conservando los V.M.A. del agregado total y en consecuencia el porcentaje de betún, lo que se aprecia claramente también en los gráficos N° 3 y 4.

El gráfico N° 7 indica en esencia dos tipos de estructura para las mezclas asfálticas. Para concentraciones C_v inferiores a la concentración crítica el sistema filler-betún ocupa los espacios libres de la estructura granular de los agregados mayores la que actúa como esqueleto de la mezcla. Tal es el caso del sheet-asphalt, concreto asfáltico y arena-asfalto, es decir, mezclas de tipo denso preparadas y colocadas en caliente.

Al crecer la concentración en volumen C_v del filler en el sistema filler-betún superando el valor C_s se abre la estructura granular de los agregados mayores que tienden a quedar dispersos en el sistema filler-betún y este impone sus características a las mezclas. El caso límite es la ausencia de agregados mayores, es decir, algunos mastic filler-asfalto, las rocas asfálticas naturales (Ragusa, San Valentino, etc.) o las mezclas usadas en Europa con la denominación "gussasphalt". Estos productos tienen una estructura del tipo columna I del cuadro N° 1 y pueden ser descritas como de sistemas de partículas finas recubiertas individualmente por delgadas películas bituminosas; en el estado compactado el volumen de betún ocupa sólo una parte de los espacios libres entre partículas del filler.

Muchas mezclas finas mencionadas en la literatura, por ejemplo (10) corresponden al caso intermedio, contienen arena natural o de trituración pero están altamente fillerizadas, por lo cual aquélla no alcanza a formar estructura propia y sus propiedades son distintas de las clásicas mezclas de sheet-asphalt y arena-asfalto. A este tipo pertenecen también las mezclas utilizadas por la Dirección Nacional de Vialidad con la denomina-

ción de "tosca-asfalto" y "tosca-arena-asfalto". Con estos tipos de mezclas no tiene sentido aplicar el criterio de dosificación basado en la "concentración crítica" del filler propuesto originalmente para las mezclas densas preparadas y colocadas en caliente del tipo clásico. Lo mismo sucede con el criterio de calidad aplicando el método Marshall propuesto por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Norteamericano.

Con las mezclas que poseen estructura granular, la "fluencia Marshall" indica la deformación necesaria para soltar la estructura granular comenzando el período fluencia plástica. Con las mezclas sin estructura granular la "fluencia Marshall" indica la deformación en el momento de máxima resistencia al fluir plástico del sistema cohesivo filler-betún, que está mucho más cerca de la rotura. Por esta razón las mezclas altamente fillerizadas acusan "fluencia Marshall" más elevadas y la determinación del óptimo de betún asfáltico por el método Marshall es aleatoria.

Por otra parte esto explica la relación inversa existente entre la "fluencia Marshall" y el ángulo de fricción interna establecida por Goetz (10); al abrirse la estructura granular disminuye el ángulo de fricción interna de la mezcla y crece la "fluencia Marshall".

De todo lo expresado surge con evidencia que el rol del filler en ambos tipos de mezclas es distinto, lo que explica algunas afirmaciones contradictorias de la literatura al extrapolar resultados obtenidos en mezclas de bajo o alto grado de fillerización al tipo opuesto.

6) PROPIEDADES DE LOS BETUNES ASFALTICOS EN LAS PELICULAS FINAS

En lo expuesto nos hemos guiado fundamentalmente por consideraciones geométricas aceptando tácitamente una simplificación: no tomar en cuenta la influencia de las fuerzas superficiales de origen molecular sobre el betún de recubrimiento. Es conocido que las propiedades de un líquido en masa son distintas que cuando el mismo está en forma de películas finas recubriendo o entre superficies sólidas. Por influencia del campo de fuerzas superficiales del sólido las moléculas del líquido pierden parcialmente su movilidad y tienden a un cierto grado de orientación y rigidez, comparable al existente cuando el líquido pasa a sólido por una caída de la temperatura. La magnitud de esta acción es función de la estructura molecular de la superficie sólida y de la naturaleza del líquido y ella disminuye con la distancia desde la superficie sólida, es decir con el espesor de las películas líquidas.

Muchos autores han mostrado que los fillers pueden en mayor o menor grado adsorber o inmovilizar los asfaltenos lo que es función de la naturaleza del filler y del betún asfáltico. Herrmann, Geissler y Ewers, Gonell, etc. aceptan la existencia de finas películas adsorbidas de betunes asfálticos, más tarde Nijboer (14) ha llamado "betún ligado" al retenido por la superficie en forma tal que pierde a temperatura ambiente o superior su carácter viscoso y es capaz de ejercer una acción cohesiva de naturaleza no viscosa, la llamada "resistencia inicial bituminosa" independiente del esfuerzo normal y de la velocidad de deformación. Recientemente Mack (15) ha estudiado el comportamiento de películas asfálticas llegando a la conclusión de que la capacidad del fluir viscoso tiende a disminuir cuando el espesor es inferior a 2×10^{-3} cm (20 micrones) en sus condiciones experimentales.

No es nuestro propósito hacer un estudio exhaustivo de este interesante e importante problema, sólo lo relacionaremos con nuestro tema. Tal como está indicado en el cuadro N° 1, a distinta concentración en volumen del filler en el sistema filler-betún, corresponden variables espesores de película bituminosa para las partículas aisladas o los radios medios de los espacios ocupados por el betún en el estado compactado, que van desde menos de 1 micrón hasta varios micrones. Relacionando esta exigencia geométrica con lo expresado anteriormente cabe suponer que por lo menos a bajas temperaturas y altas concentraciones de filler el betún asfáltico se aparte en mayor o menor grado del fluir viscoso como consecuencia de la orientación de sus componentes activos por influencia del campo de fuerzas superficiales de las partículas sólidas y que este fenómeno tienda a disminuir al elevarse la temperatura (agitación térmica).

Según Nijboer (14) la "resistencia bituminosa inicial" se hace apreciable cuando su "factor filler-betún"

$$\left(\frac{\text{Vol. de filler} + \text{vol. de betún}}{\text{Vol. de filler}} \right)^{2/3}$$

es del orden de 0,50 o sea que la $C_v = 0,35$, valor prácticamente análogo a la concentración crítica de los fillers calcáreos y dicha resistencia crece con el aumento de la concentración de filler. Con esta concentración el espesor de película, considerando las partículas aisladas, es del orden de 4 micrones, por lo cual cabe esperar que sólo en las concentraciones superiores de filler exista betún adsorbido con acción cohesiva de carácter no viscoso.

Lo expresado demuestra que el cambio de magnitud y naturaleza de las deformaciones del sistema filler-betún en función del incremento de la concentración en volumen del filler que el criterio de "concentración crítica" atribuye a interferencia de las partículas por simples razones geométricas, puede ser debido también a influencias fisico-químicas (adsorción) particularmente con altas concentraciones de filler cuando el sistema tiende a acercarse a las propiedades de un sólido perdiendo capacidad para deformarse sin rotura, que es lo que realmente interesa desde el punto de vista de la flexibilidad de las capas asfálticas.

La limitación del contenido de filler que implica el criterio de "concentración crítica" en las mezclas densas preparadas y colocadas en caliente asegura que el sistema cohesivo conserva el carácter viscoso del betún, que es capaz de fluir y recubrir en caliente la superficie de los agregados mayores, permitir su densificación por reducción del espacio libre entre las partículas mayores, fluyendo hacia ellos el medio cohesivo sin densificarse y una vez frío desarrollar acción cohesiva de carácter fundamentalmente viscoso. Lógicamente sacrifica la estabilidad que puede lograrse con mayores concentraciones de filler en beneficio de la flexibilidad. Tal vez pueda ser calificado de conservativo en este sentido, como opina Nijboer (20), considerando que se sacrifica "resistencia inicial bituminosa" de carácter no viscoso.

7) CONCLUSIONES

Las consideraciones y resultados obtenidos conducen a nuestro juicio a las siguientes conclusiones:

- 1) Resumir el origen y fundamento del criterio de "concentración crítica" del filler en el sistema cohesivo filler-betún de las mezclas densas preparadas y colocadas en caliente (concreto, sheet-asphalt y arena-asfalto) propuesto en 1943 por el autor para evitar el uso excesivo de filler en beneficio de la flexibilidad.
- 2) Mostrar que dicho criterio surge también independientemente del papel de relleno del filler cuando se desea conservar la estructura granular de los agregados mayores.
- 3) Que incorporando el criterio de "concentración crítica" a los límites de calidad indicados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos en base al método Marshall se excluyen las denominadas mezclas críticas por exceso de filler.
- 4) Que el contenido de filler permite diferenciar dos tipos de mezclas asfálticas según exista o no estructura granular de los agregados mayores y que solamente en el primer tipo corresponde aplicar el criterio de "concentración crítica".
- 5) Que el sistema filler-betún en la proporción que corresponde a la "concentración crítica" o menor sólo puede ser descripto por razones geométricas como una dispersión de filler en el medio continuo betún asfáltico, constituyendo el medio cohesivo del conjunto.

BIBLIOGRAFIA MENCIONADA

- 1) C. L. Ruiz. Criterio para juzgar la calidad de un pavimento asfáltico urbano. Ier. Simposio sobre Pav. Urbanos, 1957. Argentina.
- 2) E. Humet. IXª Reunión del Asfalto, Argentina, 1956, pág. 146. Discusión.
- 3) C. L. Ruiz. Estudio experimental sobre el mejoramiento de la estabilidad de carpetas asfálticas. Caminos, N° 37, 1940.
- 4) LEMIT, pub. técnica N° 8, 1943, Bolet. Inf. Petroleras de Y.P.F. 1943, IIª Reunión del Asfalto 1947, Argentina.
- 5) C. Van del Poel. - J. Appl. Chem., 4, 221, 1954. Building materials their Elasticity and Inelasticity. Amsterdam, 1954.
- 6) E. C. Bingham. Fluidity and Plasticity. Mc Graw Hill, 1922.
- 7) H. Añón Suárez y L. A. Mazza. Criterio de selección de fillers para mezclas Asfálticas, VIIIª Reunión del Asfalto, 1955. Argentina.
- 8) A. Pinilla. Comportamiento reológico de mezclas de polvos minerales y betunes asfálticos. Xª Reunión del Asfalto, 1958, Argentina.
- 9) H. Nevitt. El contenido de filler y su significado. Xª Reunión del Asfalto, 1958. Argentina.
- 10) L. F. Rader. Bituminous Paving Mixtures. Fundamentals for Design. Bull. 105. High. Research Board, 1955.
- 11) E. Manegold, R. Hofman, K. Solf. - Kell. Zeit. 56, 142, 1931.
- 12) Marshall Consulting and Testing Laboratory. The Marshall Method for the design and Control of Bituminous Paving Mixtures. 3rd rev. Nov. 1952.
- 13) P. J. Rigden. Road Res. Tech. Paper N° 28, 1954.
- 14) L. W. Nijboer. Plasticity as a Factor in the Design of Dense Bituminous Road Carpets. Elsevier Pub, 1948.
- 15) Ch. Mack. Physical Properties of Asphalts in Thin Films. Ind. Eng. Chem., 49, 422, 1957.
- 16) L. H. Csanyi y Hon-Pong Fung. Bull 109, High. Res. Board, 1955.
- 17) A. R. Lee y A. H. D. Marwick. J. Soc. Chem. Ind. 56, 146, 1937.
- 18) L. W. Nijboer y C. van der Poel. A. Study of Vibration Phenomena in Asphaltic Road Constructions. Procc. Asp. Pav. Techn. 22, 197, 1953.
- 19) W. H. Goetz y J. M. Mc Laughlin. Resing Studies of Indiana Bituminous Concrete Surface Mixtures. Purdue University Bull. N° 96, 1953.
- 20) Comunicación privada. 1945.
- 21) E. Gonella, J. Font y E. Petroni. Estudio del comportamiento de pavimentos flexibles. Direc. Nac. de Vialidad. Pub. Tec. serie II N° 3. Xª Reunión del Asfalto, 1958, Argentina.

PUBLICACIONES DE LA DIRECCION DE VIALIDAD

- Publicación Nº 1. **Pavimentación de las rutas nacionales Nros. 33 y 226.** Convenio entre la Dirección Nacional de Vialidad y la Dirección de Vialidad de la provincia de Buenos Aires. Setiembre de 1957.
- Publicación Nº 2. **Régimen de Coparticipación Vial para las Municipalidades.** Anteproyecto, reuniones preliminares. Decreto Ley Nº 17861 y Decreto Reglamentario Nº 21280. Noviembre de 1957.
- Publicación Nº 3. **Régimen de Coparticipación Vial para las Municipalidades.** Decreto Ley Nº 17861 y Decreto Reglamentario Nº 21280. Noviembre de 1957.
- Publicación Nº 4. **Clasificación de Materiales para subrasantes del Higway Research Board (H.R.B.), su correlación con el valor soporte de California e interpretación.** Doctor Celestino L. Ruiz. Enero de 1958.
- Publicación Nº 5. **Estudio de la red primaria, secundaria y total de caminos de la provincia de Buenos Aires.** Ingeniero Enrique Humet. Noviembre de 1958.
- Publicación Nº 6. **Vigas continuas cen momento de inercia variable.** Ingeniero Ladislao J. Rozycki. Abril de 1959.
- Publicación Nº 7. **Mesa redonda sobre el plan vial de la provincia de Buenos Aires, 1959-1963.** Noviembre de 1959.
- Publicación Nº 11. **"Concentración crítica" de filler, su origen y significado en la dosificación de mezclas asfálticas.** Doctor Celestino L. Ruiz.
- Plan Vial de la provincia de Buenos Aires, años 1959-1963. Tomos I y II. Síntesis, memoria, descripción, factores considerados, longitudes, red primaria y secundaria, comparaciones, estudio económico, tránsito, índices económicos, obras.

EN PRENSA

- Publicación Nº 8. **Autarquía de la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires.** Decreto-ley Nº 7823; Decreto Reglamentario Nº 17486. Nueva Edición.
- Publicación Nº 9. **Dimensionado de pavimentos flexibles en Texas y California y su comparación con el procedimiento del C.B.R. utilizado en la provincia de Buenos Aires.** Ingeniero Jorge M. Lockhart.
- Método para determinar la homogeneidad de la mezcla en la construcción de bases y subbases de suelo-Cemento. Maestro Mayor de Obras Rodolfo A. Duarte.
- El estudio de los suelos para subrasantes. Criterio adoptado por el laboratorio de la D.V.B.A. Agrimensor Carlos F. Marchetti.
- Publicación Nº 10. **Ley de Caminos, cercas y tranqueras.** Nueva edición.