INVESTIGACIONES SOBRE LA COHESIVIDAD Y LA ADHESIVIDAD DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS(*)

Por LEONARDO VILLENA, Doctor en Ciencias Físicas.

Se plantea en el presente trabajo el problema de ensayar estas propiedades, describiendo y analizando los distintos procedimientos propuestos, y se razona la elección de cada una de las condiciones prescritas en el método adoptado, de acuerdo con la realidad del problema. Asimismo se analizan los resultados obtenidos a distintas edades con betunes asfálticos, alquitranes y alquitranes "fillerizados", presentando los resultados obtenidos con 50 alquitranes "fillerizados", ordenados según su viscosidad y según su carga mineral.

1. Antecedentes.

El Laboratorio Central no tenía procedimiento de ensayo para determinar la cohesividad de los materiales bituminosos, la adhesividad de los mismos a los sólidos, ni, en fin, el conjunto asociado de ambas propiedades. Ningún otro centro había obtenido tampoco un método sencillo y eficaz. No existían normas sobre este ensayo, a pesar de que en las reuniones internacionales se reconoció la importancia de esta determinación (1). Todo ello aconsejó estudiar el problema e intentar resolverlo de una manera cómoda y práctica, a la vez que segura y de suficiente exactitud.

El conocimiento de las fuerzas de cohesión de un aglomerante bituminoso y de las de adhesión a un determinado material pétreo en particular, o a un sólido tipo en general, son datos de interés fundamental, puesto que reflejan un fenómeno real que diariamente se verifica en el pavimento. Pero las condiciones en que haya de verificarse este ensayo pueden ser variadísimas. Los resultados obtenidos dependen de la temperatura, la presión, la humedad y la velocidad con que se ejerce la fuerza que produce la separación o rotura del aglomerante bituminoso. Además, la adhesividad variará con el sólido elegido (metal o distintos tipos de piedra) y con el grado de pulimento dado a su superficie. También influirá grandemente, y sobre todo tratándose de materiales pétreos, su estado previo de humedad y las condiciones en que ha sido conservada la probeta (en aire, agua o diversas soluciones alcalinas). Un ensayo en que se tuvieran en cuenta todas estas variables, daría una idea exacta, con un valor comparativo seguro, de las propiedades y ventajas de los distintos materiales bituminosos, tanto para pavimentación como para la preparación de impermeabilizantes, cementos asfálticos, pegamentos, etc.

El problema, en realidad, es muy complicado. Cuando el material bituminoso se pone en contacto con un sólido, se adhiere a él tanto mejor cuanto mejor le bañe y cuanto más estrechamente estén ligadas las superficies límites de ambos medios. Intervendrán, pues, en el fenómeno, como ya hemos anticipado anteriormente, muchas variables, pudiéndose determinar los efectos de algunas. Pero la síntesis de todas ellas no es obvia, y, aunque lo fuese, no podrá ser traducida a la práctica corriente. Para dar una idea más concreta de la complejidad del fenómeno, medítese sobre la influencia que en él ejercerán los siguientes extremos: las tensiones superficiales de los dos cuerpos puestos en contacto, variables con la temperatura y la presión; la naturaleza química de cada uno de ellos, de la que dependen las posibles reacciones químicas y los fenómenos de orientación molecular en la superficie de contacto; sus estados físico y físicoquímico, y en particular la rugosidad, la porosidad y la facultad de absorción; el comportamiento de ambos elementos o de su superficie de unión frente a otros líquidos o vapores, en especial el agua y las soluciones acuosas, etc.

Habrá casos en que mediremos la cohesión (que se opone a la disgregación del aglomerante); esto es, determinaremos las fuerzas atractivas que existen en sus constituyentes, átomos y moléculas. En otros casos mediremos, en cambio, la adhesión (que se opone a la separación del aglomerante y el sólido); esto es, determinaremos la fuerza que se ejerce entre las moléculas de las dos substancias puestas en contacto íntimo. En cada ensayo se determinará sólo una de estas magnitudes, la de menor valor.

Desde el punto de vista de la física teórica, estos problemas están tratados con toda la elegancia y complejidad que lleva consigo la Mecánica Cuántica. Podría pensarse en la posibilidad de obtener, por este camino, una medida absoluta de la adhesividad entre dos cuerpos, atendiendo a los fenómenos energéticos involucrados por su contacto mutuo. Sin embargo, prescindiendo de las enormes dificultades que presentaría este cálculo, por tratarse de productos tan complejos, el resultado obtenido no tendría una equiva-

(*) Resumen de la publicación núm. 33 del Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción.

lencia inmediata en la realidad constructiva, que, necesariamente, habría de separarse mucho del caso teórico considerado.

Siguiendo un camino teórico-experimental han dado Loman y Zwikker (2) un método para calcular la adhesividad. Se basan en la teoría de Nellensteyn y Roodenburg, según la cual:

$$\alpha \cos \varphi = \beta - \gamma;$$

en que α es la tensión superficial del líquido; β, la del sólido; φ, el ángulo de contacto, y γ, la tensión interfacial. Las investigaciones llevadas a cabo por Loman y Zwikker han mostrado que esta relación teórica es válida en la práctica. Han hecho medidas de los ángulos de contacto de agua y mercurio con distintas rocas y minerales y con betún asfáltico, deduciendo así las tensiones superficiales de estos materiales. Sin embargo, no han dado resultados concretos de adhesión.

Se hizo, pues, preciso abordar el problema desde el punto de vista de la física experimental, considerando exclusivamente los fenómenos macroscópicos, únicos que en la Técnica de la construcción interesan. En ello va incluída ya la posibilidad de reproducir en los ensayos todas las condiciones reales que concurren y determinan el fenómeno.

2. Ensayos diversos.

Damos a continuación un breve resumen de los distintos ensayos efectuados para el establecimiento de una prueba de adheso-cohesividad, clasificándolos en tres grandes grupos:

1.º *Métodos para determinar la adhesión entre el aglomerante y el árido finamente dividido.*

Riedel y Weber (3) idearon un método que fué adoptado por los alemanes en la norma DIN 1995 (4). El ensayo consiste en mezclar el material bituminoso y el árido triturado. Se toman unos 0,5 gr. del aglomerado y se hierven en agua durante un minuto. Si el aglomerante se separa del árido, la adhesión entre estos dos es pobre. Si no ocurre esto, se repite el ensayo sustituyendo el agua por 6 c. c. de solución de carbonato de sodio, en concentraciones crecientes, utilizando cada vez una nueva porción del aglomerado. La adhesión se mide entonces por la concentración necesaria para producir la separación. Posteriormente, el propio Riedel (5) se volvió a ocupar de estas pruebas, y Geissler (6) realizó una serie de ensayos, destinados a comprobar la validez del método. Vetlesen (7) ha dado más tarde una vista de conjunto muy interesante sobre todos estos ensayos. De ellos se ha ocupado también Valton (8).

Moll (9), Herrmann (10), Lee (11), Oberbach (12), Dow (13) y Mallison-Schmidt (14), estudiaron la resistencia de aglomerados, formados por material bituminoso y árido triturado, frente a baños acuosos a temperaturas crecientes, sin agitar o agitando distintos períodos de tiempo. Esta misma prueba se ha venido efectuando en el Asphalt Institute.

Tyler (15) hace el agregado y deja evaporar libremente al aire las partes volátiles y, en una máquina *ad hoc* (fig. 1.ª), bate violentamente el resto con agua durante media hora. Seguidamente las muestras se secan y se hace un control visual por tres observadores distintos, partícula por partícula, para poder asignar un valor de adhesión (de 0 a 10), según el número de partículas que hubiera perdido la película bituminosa.

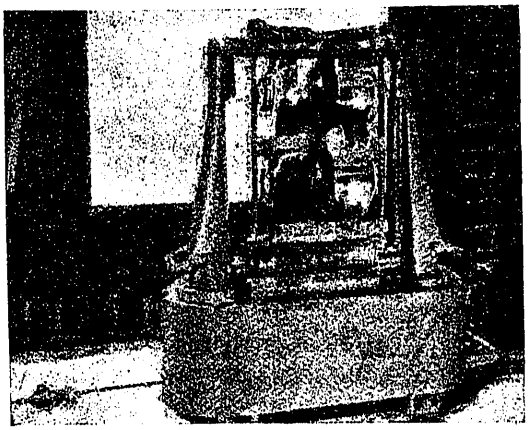


Figura 1.ª

Knight (16) ha empleado soluciones alcalinas para determinar la adhesividad entre el árido y el material bituminoso, de manera semejante a los ensayos de Riedel y Weber.

Vandone (17) y Cardia (18), ensayando mezclas de alquitrán y polvo asfáltico, utilizaron baños de agua a distintas temperaturas, separando el aglomerado con una lámina metálica para observar su adherencia.

Holmes (19) bate el árido triturado acompañado de agua y del material bituminoso (que debe ser muy flúido), observando después el número de partículas que no han sido cubiertas de betún.

2.º *Método para determinar la resistencia mecánica del aglomerado bituminoso.*

El mismo Holmes, y para verificar estos resultados, ha ideado una prueba en que el aglomerado se somete a esfuerzos mecánicos que hacen intervenir tanto la adhesión como la cohesión. Holmes hace gi-

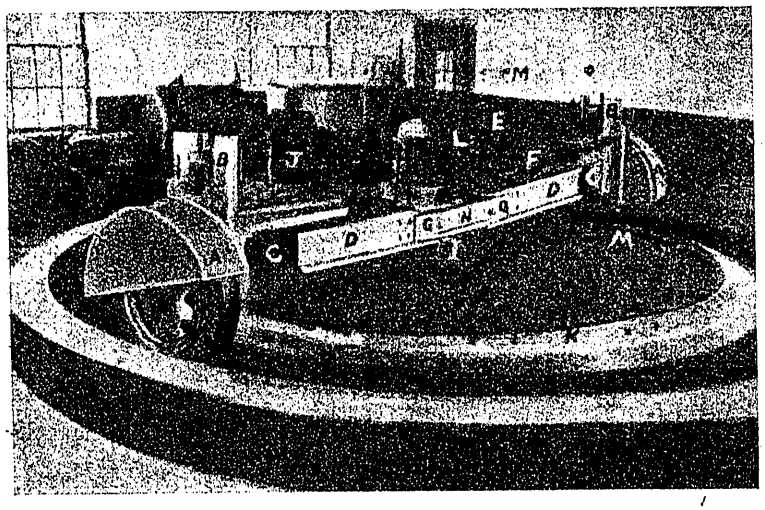


Figura 2.ª

rar dos neumáticos (fig. 2.ª) sobre una pista circular y cuenta el número de vueltas necesarias para desprender de la pista una cierta cantidad de material.

Una prueba parecida a ésta ha sido desarrollada en el I. S. S. de Milán por Arriano (20) (fig. 3.ª), que utiliza una rueda de moto que puede moverse verticalmente, pero que está impedida de girar. Bajo ella pasa una probeta rectangular del pavimento ensayado, que se mueve hacia uno y otro lado, hasta que se produce una huella de un centímetro. El número de pasadas que para ello se precisan se toma como índice de adhesión entre aglomerante y árido.

Hartler y Schultz (21), en la T. H. de Breslau, han intentado la preparación de probetas de aglomerado bituminoso en forma de ocho, análogas a las utilizadas en los cementos. El índice de adhesión se obtiene tomando la diferencia entre la resistencia de probetas conservadas en seco y la de otras que han sido introducidas durante un cierto tiempo en agua, diferencia que se expresa en tantos por cientos de la resistencia correspondiente a las probetas secas.

Una idea semejante ha servido de base a los ensayos realizados por Klinkmann (22), que utilizó probetas cúbicas de aglomerado bituminoso, sometiéndolas a esfuerzos de compresión.

3.º *Método para determinar la resistencia de una película bituminosa sostenida entre dos soportes sólidos.*

Los propios Hartler y Schultz (21) han realizado una tentativa de maquinizar y despersonalizar la prueba de adhesividad, utilizando un método más racional de ensayo. Partiendo de la hipótesis de que la cohesión de los materiales bituminosos a bajas temperaturas es siempre mayor que su adhesión a las piedras (hecho que no se puede afirmar de una manera general), los autores en cuestión han pensado en "helar" una película de material bituminoso unida a dos soportes sólidos y someter después el conjunto a un esfuerzo perpendicular a la película, utilizando la balanza de Michaelis (fig. 4.ª). Sin embargo, estas pruebas no han llegado a feliz término porque los resultados obtenidos no eran reproducibles.

Duriez (23) ha desarrollado posteriormente la misma idea, con el objeto de medir la cohesión del material. Este autor unía dos piezas metálicas mediante un determinado espesor de material bituminoso, fijaba el todo a un péndulo que hacía caer desde una altura determinada, calculando la energía absorbida en la separación. El método tiene la ventaja de eliminar las deformaciones plásticas, obteniéndose

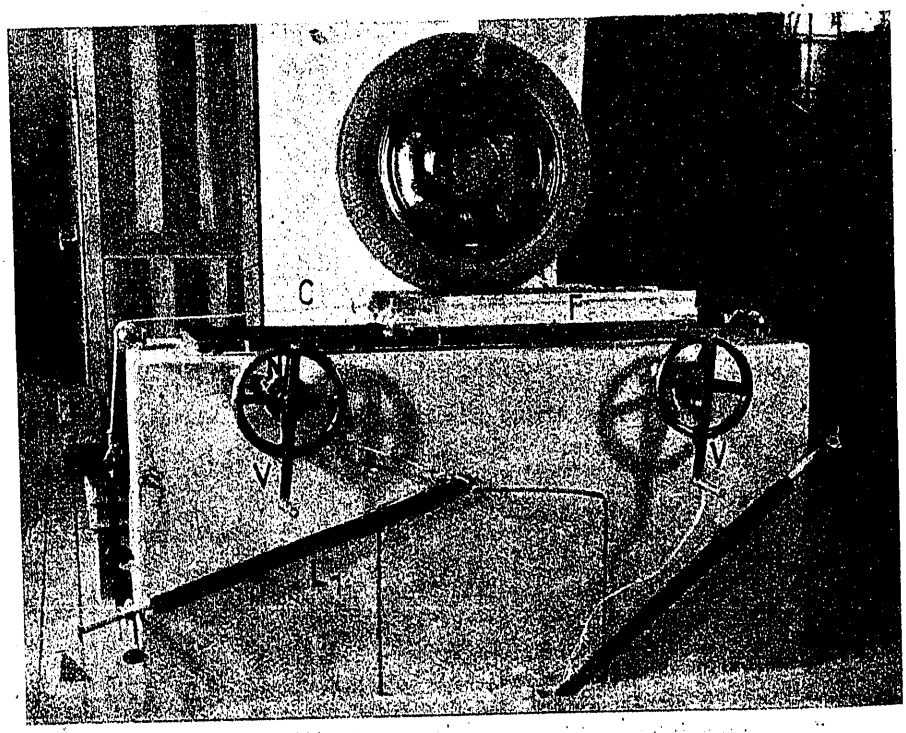


Figura 3.ª

una medida directa de la cohesión, siempre que ésta sea menor que la adhesión al metal.

También de este tipo, pero empleando esfuerzo cortante, se viene utilizando el aparato Osborne (24) que consiste en dos cilindros concéntricos, fijo el interior y giratorio el exterior, entre los cuales se deposita una capa de material a ensayar, midiéndose el tiempo que tarde en dar tres vueltas consecutivas.

Arriano (25), utilizando la misma clase de esfuerzos, ha propuesto un método que permite medir la cohesión del aglomerante y la adhesión de éste a un determinado material pétreo. Consiste el método en unir dos pequeños bloques de piedra de superficies rigurosamente planas, por intermedio de una película extremadamente sutil de aglomerante (que va desde 17 a 80 micras). La prueba se efectúa en un aparato especial (fig. 5.ª), que ejerce sobre uno de los soportes una rápida tracción contenida en un plano paralelo a las caras de ambos prismas. Una vez terminada la operación, se observa si se ha producido la separación de la película o si ha habido rotura de la misma. En este caso se obtiene la medida de cohesión, mientras que en el primero se mide la adhesión.

Resumiendo, puede decirse que se ha intentado determinar las propiedades adhesivas de los materiales bituminosos por tres métodos generales:

1.º Estudiando el comportamiento de un aglomerante formado por gravilla y material bituminoso, cuando se le somete a la acción de diversos líquidos.

2.º Observando la rotura mecánica de dicho aglomerado frente a esfuerzos de tracción y compresión o a los efectos de la rodadura y las aceleraciones.

3.º Determinando la resistencia mecánica de una película de material bituminoso contenida entre dos sólidos, con o sin la presencia de otros líquidos.

Los métodos del primer grupo se refieren sólo a la adhesividad y se basan en que un flúido que moja a un sólido puede ser desalojado por otro líquido que tenga una mayor tensión superficial de contacto, en condiciones de temperatura, presión, etc., dadas. Por desalojamiento es proporcional a la concentración, el valor mínimo que dicha concentración ha de alcanzar para desalojar el material bituminoso da una medida del poder adhesivo de éste. Si en lugar de una

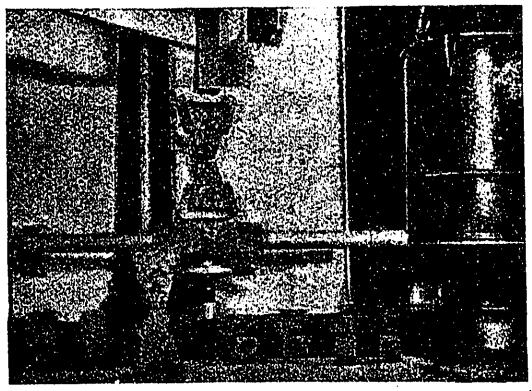


Figura 4.ª

tanto, si se emplea una disolución, cuya fuerza de solución se emplea agua pura, a distintas temperaturas, se observan diferencias en el comportamiento de los aglomerantes bituminosos, según que el árido sea hidrófilo o hidrófobo y según la adherencia que, frente a él, presente el material bituminoso. Estos métodos sólo indican de una manera puramente cualitativa la mejor o peor calidad de dos productos y aprecian sólo grandes diferencias. En general se realizan en tales condiciones que no existe paralelismo alguno entre los fenómenos reales y las experiencias, ya que ni la intervención de las soluciones mencionadas ni las elevadas temperaturas y duraciones corresponden a la realidad. Además, junto a este empirismo existe, a veces, una gran complicación experimental.

Los métodos del segundo grupo dan una idea más exacta de la realidad, y en ellos entran en juego simultáneamente la adhesividad y la cohesividad. Aun siendo empíricas, las medidas comparativas que se obtienen bajo el efecto de la rodadura o de las aceleraciones, tienen indudable interés, aunque, claro está, las condiciones reales no son alcanzadas por mantener, en unos casos, la probeta continuamente bañada en agua, o porque, en otros casos, los neumáticos se calienten al rozar siempre en un mismo sitio, ya que no pueden rodar. Respecto a las medidas de resistencia a tracción o compresión no son intuitivas ni reflejan la verdadera forma de trabajo del aglomerado.

Adviértase, además, que en casi todos los métodos de los dos primeros grupos se exige al árido estar muy triturado, presentándose la duda de si por esta causa los

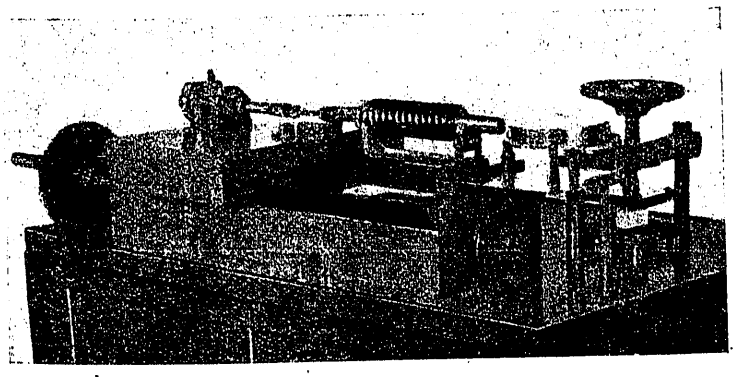


Figura 5.ª

resultados serán o no transferibles a la realidad, en la que el árido tiene tamaños muy distintos.

Los métodos del tercer grupo permiten, por el contrario, una medida más o menos precisa de los esfuerzos necesarios para romper la película bituminosa o para separarla de los sólidos que la sustentan. Dan, pues, resultados de adhesividad o de cohesividad. Sólo nos ocuparemos de los ensayos de Duriez y Arriano, ya que los otros carecen de interés. Ambos métodos son algo complicados, y difícilmente pueden realizarse en un laboratorio modesto, al menos en idénticas condiciones que los ensayos originales.

No se puede formar un juicio exacto sobre los ensayos de Duriez por carecer de los resultados experimentales hallados por éste. En cuanto a la teoría de su método parece ser, como se verá más adelante, la que mejor se adapta a una prueba sencilla y reproducible que dé indistintamente resultados de adhesividad o de cohesividad. Únicamente es discutible el empleo del péndulo para producir la rotura, ya que será difícil conseguir que las probetas metálicas utilizadas no se dañen a costa de repetidos ensayos (cambiando las condiciones en que se efectúa el ensayo) y los resultados expresados en energía de separación son menos claros que los que se obtienen en kilogramo por centímetro cuadrado.

En cuanto a los ensayos de Arriano, si hemos de tomar en cuenta sus comunicaciones, parecen haber dado un resultado espléndido. Sin embargo, dudamos que puedan conseguirse numerosos pares de probetas pétreas en condiciones de pulimento exactamente iguales. También nos parece difícil obtener películas limpias de rebabas de 17 μ, y mucho menos el poderlas medir con la exactitud que se desprende de la lectura de sus trabajos. Al utilizar esfuerzos tangenciales no instantáneos (Arriano utiliza velocidad de 2 Kg./cm.^{2} por segundo), la viscosidad viene a perturbar y enmascarar los resultados de los ensayos, puesto que las fuerzas de rozamiento se oponen al movimiento de los bloques. Finalmente, creemos difícil que tratándose de películas tan finas y habiendo de utilizar superficies necesariamente rugosas (comparativamente con el espesor de la película), puede ser observada la separación de la película en algunos puntos, ya que presumimos que estos puntos serán tapados de nuevo en el deslizamiento de los bloques soportes.

3. Consideraciones sobre el método elegido.

En el pavimento se presentan, en realidad, los fenómenos de adhesión y de cohesión, simultáneamente. En efecto: el material bituminoso se aglomera con el árido pétreo para formar el pavimento; y cuando dicho aglomerado se somete a esfuerzos puede fallar por una de estas dos razones: 1.ª, porque la película bituminosa que recubre al árido se separe de él, fallando, por lo tanto, las fuerzas de adhesión; y 2.ª, porque el material bituminoso se desgarre, rompiéndose o dividiéndose la película que recubre el árido, fallando, entonces, las fuerzas de cohesión. Por tanto, para cada par formado por un material bituminoso y un árido pétreo dados, existe una tensión mínima a la que sobreviene la rotura del agregado por fallar la adhesión o la cohesión.

Aparte de este dato, interesante cuando se conozcan los componentes que han de entrar a formar parte de un pavimento, existe otro, tan importante como éste, y que exige nuevas consideraciones. Consiste en una prueba a que hayan de ser sometidos los materiales bituminosos en general, al objeto de determinar su calidad, con la independencia del árido pétreo al que deban ser agregados. Existen muchas razones que impulsan, entonces, a prescindir del material pétreo como soporte de la película bituminosa que debe ser ensayada, sustituyéndole por un metal cualquiera. La razón más importante es la uniformidad que los metales presentan en cuanto a su estructura y en cuanto al grado de pulimento que se puede obtener. La segunda, es la posibilidad de repetir los ensayos con un mismo soporte, lo que garantiza la constancia de las condiciones de la prueba.

Pero aun hay más razones. Siendo porosos los materiales pétreos, la unión entre las moléculas de los materiales bituminosos y pétreos irá aumentando con el tiempo y dependerá notablemente de la temperatura a que se hace el colado y a que se conserva la probeta. También dependerán los resultados del estado de humedad atmosférica, tanto más cuanto más hidrófilo sea el material pétreo. Por el contrario, en el metal, y salvo algunos fenómenos de orientación molecular en la superficie límite, que tienen muy poca importancia, los resultados obtenidos apenas varían con el tiempo transcurrido desde la preparación de la probeta ni con las temperaturas de colado y de conservación, y sólo vienen influídos por la temperatura estable a que se somete la probeta antes de efectuar el ensayo.

En todo lo anterior prescindimos del efecto de envejecimiento que aparece a causa de las evaporaciones sufridas en los bordes de la película y que depende de la temperatura de conservación y de la edad de la probeta, si bien sus efectos son despreciables, dada la mínima superficie de evaporación, siempre que se trabaje a temperaturas inferiores a 50° y con duraciones menores de veinticuatro horas.

Entre los distintos metales que la industria pone a nuestra disposición, con caracteres de pureza y homogeneidad, optamos por el bronce o el latón, por ser más estables frente a la acción combinada del agua y

la atmósfera. Sin embargo, hemos realizado una serie de ensayos con soportes hechos de acero inoxidable, para comprobar si existía variación en los resultados, encontrando una absoluta concordancia cuando la rotura tiene lugar por falla de la cohesividad, y resultados ligeramente inferiores en el caso del acero, cuando la película bituminosa se desprende del soporte por falla de la adhesividad.

Respecto a la temperatura a que se ha de hacer la colada y se ha de mantener la probeta hasta el momento del ensayo, ya hemos indicado que son prácticamente indiferentes, con tal de que la probeta esté a la temperatura a que se vaya a realizar el ensayo el tiempo suficiente para garantizar la uniformidad de ésta. Pero también se ha indicado la conveniencia de operar por debajo de los 50° C. para reducir al mínimo los efectos de envejecimiento. Por ello se escogió como temperatura de colada la de 50° C., marcada en las Normas de Ensayo del Laboratorio Central (26), para la homogeneización de toda clase de productos bituminosos. La temperatura a que debe realizarse el ensayo se fijó en 25° C., con variaciones menores que 0,1° C., teniendo en cuenta que la mayor parte de los ensayos de materiales bituminosos se realizan en estas condiciones, por otra parte, fáciles de mantener en nuestras latitudes. Pero además influyó en la elección el hecho de que a temperaturas próximas a la ambiente la cohesión toma valores notables que disminuyen rápidamente al crecer la temperatura, por lo que no conviene alejarse de las condiciones reales, y que la variación de resultados es pequeña, entre 20° y 30°. Para comprobar si el margen de tolerancia en la temperatura no era excesivo, se hicieron una serie de ensayos a distintas temperaturas por encima y por bajo de 25° C., deduciéndose que era suficiente fijar esta magnitud con variaciones de ± 0,1° centígrado, como ordinariamente se admiten en otras pruebas de materiales bituminosos.

Ya se ha dicho antes que la edad de la probeta, siempre que no sea excesiva, apenas influye en los resultados. Para comprobar este hecho se hicieron una serie de ensayos que satisficieron suficientemente esta aserción, siempre que no se llegara a varios días. Por ello se adoptó la edad de dos horas, tiempo suficiente para garantizar una perfecta estabilización de la temperatura y que permite la realización cómoda y rápida de los ensayos, aparte de disminuir los posibles efectos de envejecimiento en el borde de la película.

En cuanto a la clase de esfuerzo que haya de ser aplicado a los soportes, hubo que elegir entre aplicar fuerzas normales o tangentes a la superficie de unión. Estos últimos parecen acercarse más a la realidad, puesto que en el pavimento se han de producir esfuerzos cortantes en las aceleraciones y frenados de los vehículos. Pero debe considerarse que en el seno de aquél, cuya superficie no es totalmente lisa y cuya masa se deforma, dichos esfuerzos vienen acompañados por otros de tracción y compresión.

Ya se indicaron anteriormente los efectos enmascaradores que la viscosidad ejerce sobre los ensayos de cohesión, cuando se trata de esfuerzos tangenciales no instantáneos, mientras que estos efectos son muy pequeños si los esfuerzos son de tracción, aun cuando no sean tan súbitos. Efectuados ensayos a distintas velocidades, se encontraron variaciones pequeñas, siempre que la velocidad fuera superior a

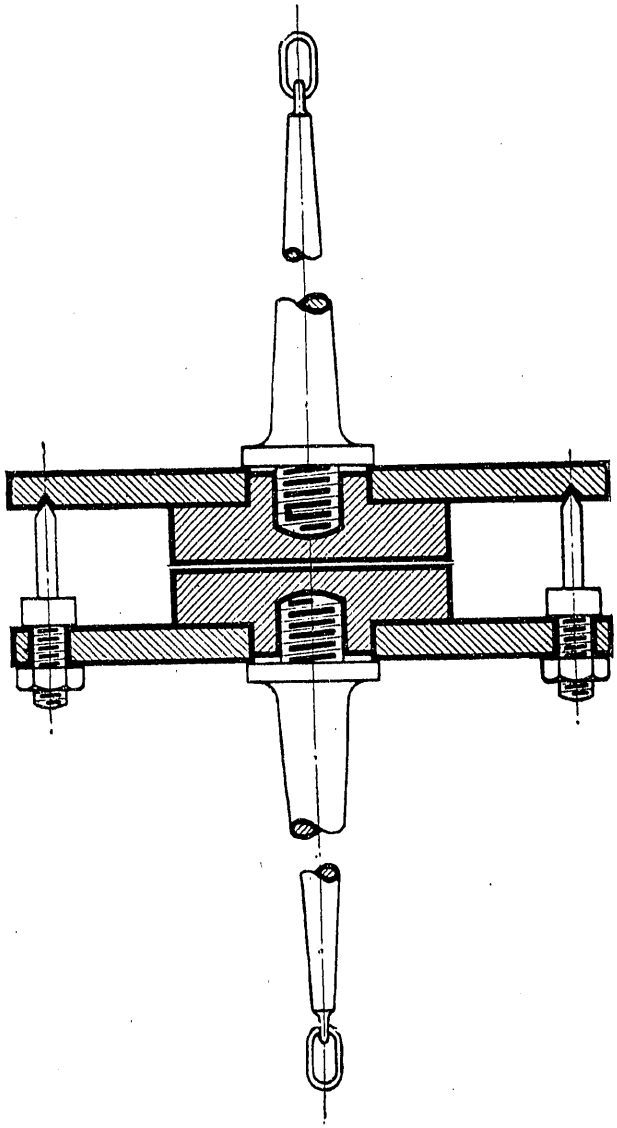


Figura 6.ª

0,1 Kg./cm.^{2} cada segundo. Por ello se adoptaron esfuerzos normales de tracción con un incremento de cargas de 0,3 Kg./cm.^{2} por segundo, fácil de conseguir y mantener uniformemente a mano con máquinas pendulares. Así se reduce la influencia de la viscosidad, y no se precisa de dispositivos especiales para la producción de esfuerzos rapidísimos (nunca pueden ser instantáneos), que habrían resultado caros y complicados. Aunque los esfuerzos que así actúan sobre los dos soportes metálicos sean de tracción, en la película bituminosa contenida entre éstos existirían, juntamente con aquéllos, esfuerzos cortantes, y la rotura se puede producir siguiendo planos de deslizamiento.

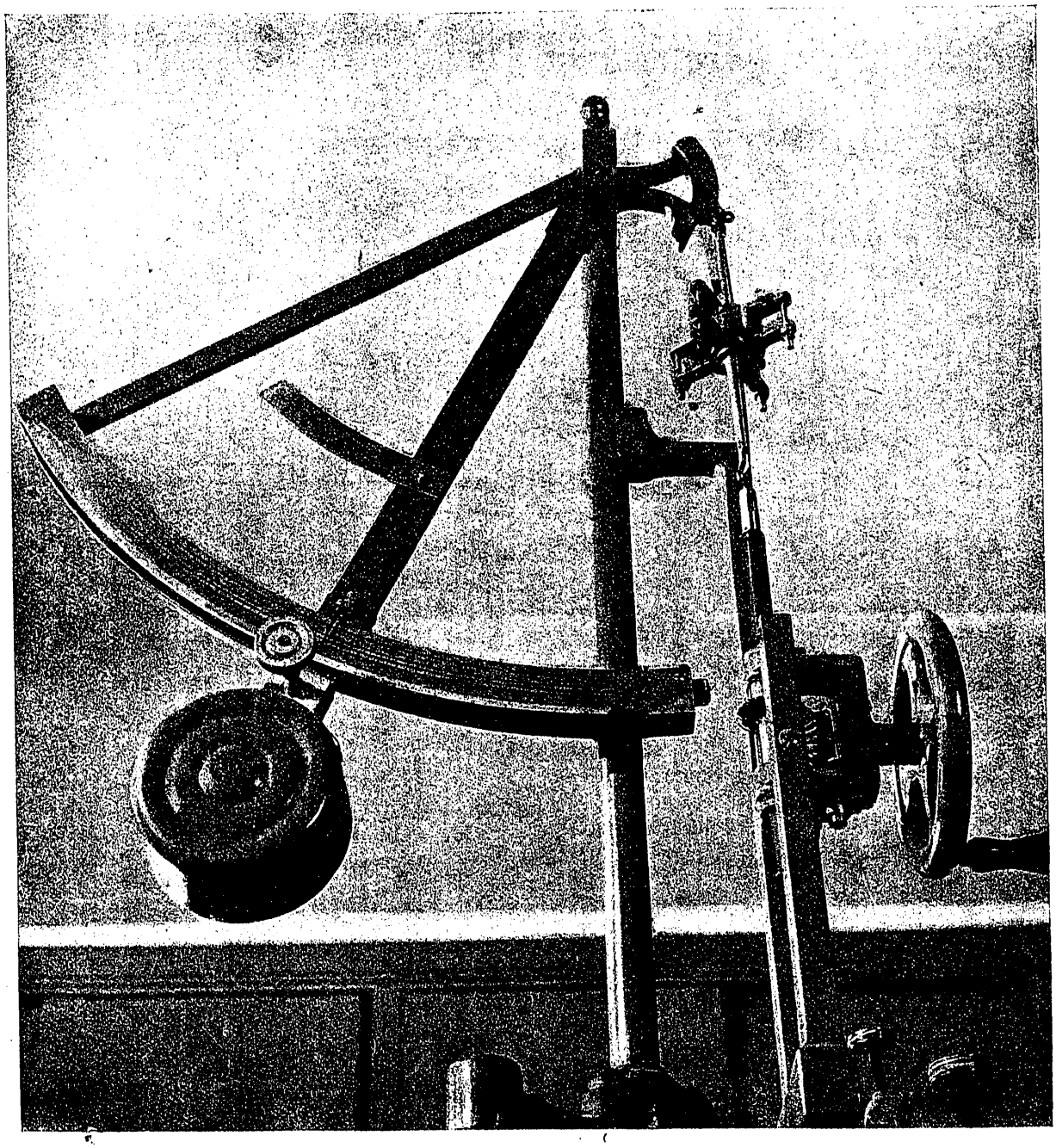


Figura 7.ª

Quedaba sólo por marcar el espesor de la película. Efectuados una serie de ensayos con distintos espesores, se comprobó una mayor reproducibilidad para el de cuatro décimas de milímetro. La posibilidad de encontrar en los alquitranes "fillerizados" granos de carga mineral, aconseja no bajar de tal espesor. Por otra parte se admite que la película que en el pavimento recubre el árido es precisamente de este espesor. Por todos estos motivos queda elegido el espesor de 0,4 mm.

4. Descripción del aparato y del procedimiento experimental utilizado.

Partiendo de todas las consideraciones que se acaban de exponer en el apartado anterior, se construyó un prototipo del aparato empleado. Después de varios meses de experimentación se modificaron algunos detalles de poca importancia y se construyó una serie de ocho aparatos, con los que se viene trabajando desde entonces. Como resultado de toda esta serie de ensayos se redactó la norma NELC 6.12, que regula el ensayo de cohesividad y adhesividad en materiales bituminosos.

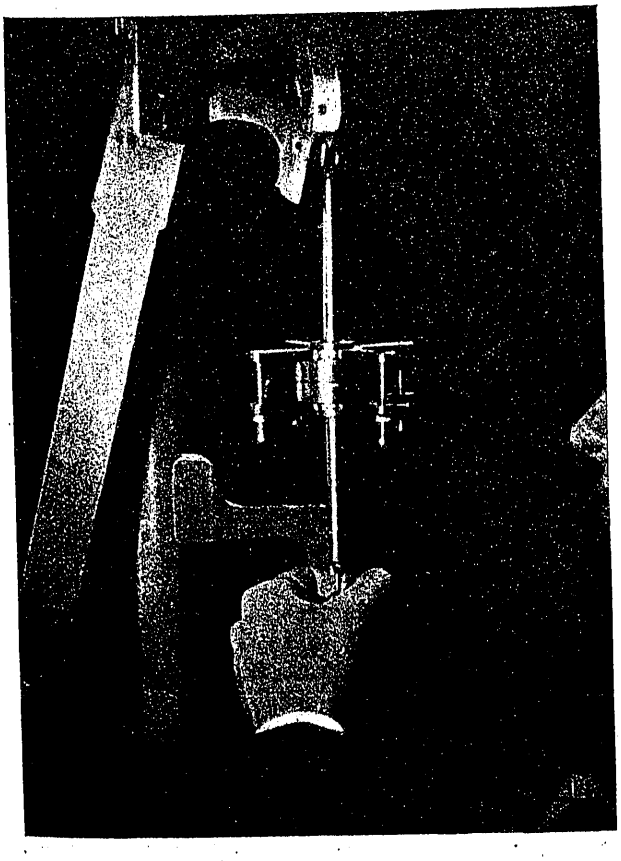


Figura 8.ª

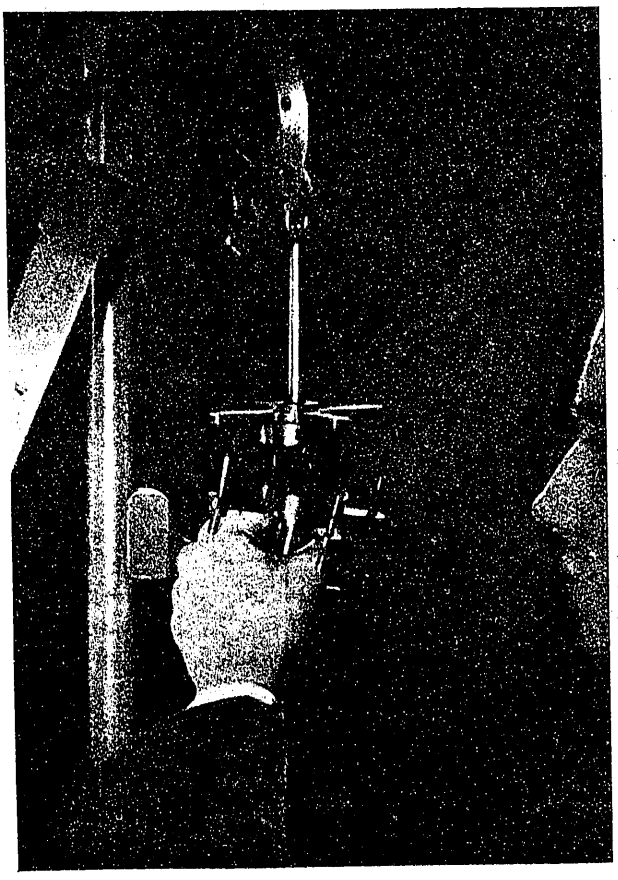


Figura 9.ª

El aparato para el ensayo de adhesividad consiste, esencialmente, en dos soportes metálicos, entre los que se deposita la película bituminosa y a los que se aplican las cargas que han de producir su rotura o su separación.

Los soportes utilizados son dos placas circulares de latón. Su espesor es 10 mm., suficiente para impedir que se produzcan deformaciones por los esfuerzos que han de serle aplicados, sin que se eleve demasiado el peso del soporte. Su diámetro es 50,38 milímetros, que corresponde a una superficie de 20 centímetros cuadrados. Ambas placas están sujetas a una cruz de acero (fig. 6.ª), destinada a regular la separación entre sus caras internas. Para ello, en una de estas cruces están montados cuatro pequeños vástagos, que terminan en punta fina, y en la otra existen otros tantos alojamientos destinados a contener aquéllas. Al encajar los vástagos en los alojamientos, la separación que queda entre las superficies interiores de las placas es justamente 0,4 mm. Las cruces están montadas de tal manera que no impidan el paso de una espátula alrededor de las placas, para limpiar el exceso de producto.

La superficie interna de cada soporte está pulida con rojo inglés. En la parte exterior, y en el centro de cada una, va atornillado un robusto vástago de acero, terminado en una anilla, en la que se aplican las fuerzas. Entre la película de material bituminoso y el extremo de la anilla quedan 13 cm., distancia suficiente para evitar descentramientos de las fuerzas aplicadas e impedir que la rotura tenga lugar porque una de las placas gire respecto de la otra, abriéndose como un libro. Queda, pues, garantizada la aplicación a la película bituminosa de un esfuerzo de tracción centrado y uniformemente repartido.

Para sostener las probetas desde su preparación hasta su rotura, se dispone de una plataforma de chapa de acero con agujeros en los que las probetas descansan verticalmente en el interior de la estufa, de tal manera que su peso no perturbe la conservación de la película bituminosa. Sirve, además, de conductor térmico para igualar rápidamente la temperatura de todas las probetas, por lo que basta con tomar la de una sola. La estufa empleada es de gran capacidad, totalmente cerrada, perfectamente aislada y de regulación automática. Un termómetro, en el que se lee la media décima, está en contacto con el conjunto metálico formado por los soportes y la plataforma agujereada, ya que la temperatura del aire contenido en la estufa puede ser algo diferente de la que exista en la película bituminosa, que es la que realmente nos interesa. Dada la gran capacidad de la estufa y su perfecto aislamiento, una vez que el termostato le ha llevado a la temperatura elegida, ésta permanece estable durante mucho tiempo.

Para la aplicación de los esfuerzos mecánicos se utiliza una máquina pendular movida a mano. En la figura 7.ª se pueden ver los detalles de ésta, así como la manera de sujetar la probeta en la máquina. Obsérvese que las anillas de los soportes están sujetas a la palanca del péndulo por arriba, y al vástago de tracción, por abajo, de tal manera que en los puntos de sujeción exista total libertad de movimiento, por lo que las anillas actúan de rótulas. Es necesario cuidar que las chavetas de sujeción estén perpendiculares al plano de las anillas, pues, si no, podrían hacer girar en su plano alguno de los soportes, con lo que se dañaría la película.

Actuando sobre el tornillo de nivelación de la máquina se ajusta la posición del cero, de tal manera que quede equilibrado el peso del soporte superior y el índice indique directamente la carga que está soportando la película (peso del soporte inferior, más fuerza aplicada). El incremento de carga se realiza mediante la manivela de la derecha, y, si se tiene un poco de práctica, puede regularse y mantenerse a 5 ó 6 kilogramos por segundo; esto es, a 0,3 Kg./cm.^{2} por segundo.

Colocada la probeta en la máquina, tal como se ve en la figura 8.ª, se empieza inmediatamente a dar vueltas a la manivela, puesto que un largo rato de espera podría debilitar a la película como consecuencia del peso del soporte inferior que está soportando continuamente. Durante el ensayo se coloca la mano izquierda alrededor del vástago inferior para evitar que, en el momento de la rotura, caiga éste, golpee contra alguna parte metálica y se estropee el pulimento o se deforme la cruz, descorrigiéndose la separación entre las placas. De esta manera, cuando se produce la rotura, el soporte inferior queda sobre la mano (fig. 9.ª). Así se puede observar inmediatamente la forma en que la rotura se ha producido, la presencia de filamentos o la posible separación en algunos puntos de la película y los soportes metálicos, detalles que, si el producto es poco viscoso, pueden desaparecer rápidamente.

Conviene ensayar varias probetas de un mismo producto. Nosotros utilizamos ocho, con lo cual, y aun teniendo que despreciar algún resultado, por considerarlo anormal, se obtiene un número suficiente de valores para poder dar una media segura y tener una idea de la reproducibilidad del ensayo. Esta circunstancia, es decir, la máxima discrepancia que se observa entre los resultados obtenidos por un mismo producto, varía mucho de unos a otros materiales, según su característica. En ella influyen la viscosidad, la carga mineral, etc., y, sobre todo, la homogeneidad del material. Por tanto, el máximo error de cada serie puede dar una idea de la heterogeneidad del producto.

5. Resultados obtenidos.

Tras de los distintos ensayos realizados en este Laboratorio, que se efectuaron con betunes asfálticos, alquitranes y, sobre todo, con alquitranes "fillerizados", podemos emitir las siguientes apreciaciones:

Betunes asfálticos. — La cohesividad suele ser menor que la adhesividad, pero también se presentan casos en que sucede lo contrario. Los resultados presentan una gran reproducibilidad.

La variación de los resultados con la temperatura, entre 20° y 30° es pequeña, sobre todo si el producto tiene un punto de reblandecimiento de 43° a 50° (como marca el Pliego de Recepción de esta clase de materiales).

La variación con la edad apenas es observable.

No se puede establecer una relación directa entre los resultados de este ensayo y la ductibilidad. Por

el contrario, se observa una marcada dependencia entre cohesividad y penetración, variando sus valores de manera inversa.

Alquitranes. — La cohesividad es siempre menor que la adhesividad. Los resultados son poco reproducibles, máxime en alquitranes de poca consistencia.

La variación de los resultados con la temperatura es poco importante, acaso por venir enmascarada por la poca reproducibilidad.

La variación con la edad empieza a notarse a las quince o veinte horas, según la volatilidad del producto (véase el cuadro I).

CUADRO I. — *Ensayos de cohesividad, a distintas edades, con un alquitrán de 107" de viscosidad B. R. T. A.*

Edad en horas	Cohesividad en Kg./cm.²
1	0,56
2	0,56
5	0,57
10	0,56
15	0,57
20	0,57
24	0,58
48	0,60
72	0,58
144	0,61

No se puede establecer una relación directa entre los resultados de este ensayo y los de viscosidad o consistencia, aunque se ha constatado una dependencia muy acusada.

CUADRO II. — *Cohesividad, a distintas edades, de un alquitrán "fillerizado" con 23,4 % de residuo insoluble y 110" de viscosidad B. R. T. A.*

Edad en horas	Cohesividad en Kg./cm.²
1	0,66
2	0,67
3	0,66
4	0,67
5	0,67
10	0,68
15	0,67
20	0,69
24	0,70
48	0,71
72	0,72

CUADRO III. — *Cohesividad, a distintas edades, de un alquitrán "fillerizado" con 20,2 % de residuo insoluble y 645" de viscosidad B. R. T. A.*

Edad en horas	Cohesividad en Kg./cm.²
1	0,76
2	0,75
3	0,75
4	0,75
5	0,76
10	0,77
15	0,76
20	0,77
24	0,78
48	0,81
72	0,81

CUADRO IV. — *Dependencia entre la viscosidad y la cohesividad en alquitranes "fillerizados".*

Viscosidad B. R. T. A.	Cohesividad Kg./cm.²	Viscosidad B. R. T. A.	Cohesividad Kg./cm.²
> 3.000	> 2,5	124	0,28
> 3.000	1,80	112	0,42
> 3.000	1,10	106	0,45
2.330	0,98	99	0,30
2.180	0,72	92	0,44
2.120	0,87	87	0,39
1.020	0,81	81	0,40
873	0,90	78	0,35
645	0,81	78	0,33
566	0,71	77	0,33
448	0,62	69	0,42
389	0,70	68	0,34
370	0,70	62	0,34
369	0,63	62	0,31
337	0,60	56	0,30
318	0,62	49	0,27
300	0,57	32	0,29
204	0,55	30	0,31
204	0,60	23	0,25
201	0,57	18	0,14
184	0,64	10	0,08
180	0,47	10	0,12
154	0,50	9	0,10

Alquitranes "fillerizados". — Casi sin excepción la cohesividad es menor que la adhesividad, pero se han presentado algunos productos de gran viscosidad y mucho "filler" (que no cumplían las condiciones que estos productos deben satisfacer), y en que la adhesividad a metal fué menor que la cohesividad.

La variación con la temperatura es, en algunos

casos, bastante acusada, aunque en general no es peligrosa en las proximidades de 25° C.

La variación con la edad es de poca importancia, notándose para algunos productos pasadas veinticuatro horas, como puede verse en los cuadros II y III, correspondiente a un producto viscoso y otro flúido.

La complejidad de estos productos hace muy difícil buscar una relación entre los resultados de este ensayo y otra de sus características, más conocida y estudiada.

La dependencia existente entre la viscosidad y la cohesividad se aprecia claramente en el cuadro IV. Esta dependencia es originada, en parte, por el hecho de que la película ensayada se retrae durante el breve momento del ensayo, disminuyendo la superficie resistente, por lo que, al dividir por la superficie total de la probeta, se obtiene un valor inferior al real. La disminución de superficie tiene lugar, no solamente en los bordes, sino también en las cavidades gaseosas que se forman en el interior de la película en el momento de la rotura, que aumentan más rápidamente cuanto menor es la viscosidad. Esta disminución de superficie se presenta también en la naturaleza, sobre el pavimento, por lo que los resultados obtenidos tienen un significado real. De todas maneras, la variación que este hecho introduce en los resultados no explica la marcada dependencia existente entre cohesividad y viscosidad, habiendo de admitirse, como era lógico esperar, una dependencia real entre estas dos propiedades.

La dependencia existente entre la cohesividad y el resto de las propiedades de los alquitranes "fillerizados" no es clara. En el cuadro V se reproducen cincuenta alquitranes "fillerizados" colocados por orden creciente de residuo insoluble y caracterizados, además, por su sedimentación, su peso específico y su viscosidad. Parece observarse que la cohesividad aumenta, dentro de ciertos límites, con el residuo insoluble y con la finura del "filler". Ello podría ser explicado por el hecho de que los filamentos tubulares que se formen, en el momento de la rotura, rodeando a las cavidades gaseosas producidas en el seno de la película por la baja presión que acompaña a la tracción, fueran más finos y estuvieran más uniformemente repartidos. Repetimos, sin embargo, que se trata únicamente de apreciaciones subjetivas cuya veracidad habría de ser comprobada por una serie de minuciosos ensayos.

CUADRO V. — *Cohesividad de distintos alquitranes "fillerizados", indicando la máxima discrepancia a la media de cada producto.*

Residuo insoluble	Coeficiente de sedimentación	Peso específico	Viscosidad B R. T. A.	Cohesividad media en Kg./cm.²	Máxima discrepancia a la media
5,4	< 0,1	1,139	18	0,06	0,01
7,3	0,3	1,140	20	0,08	0,01
10,2	1,1	1,180	62	0,22	0,02
11,8	0,7	1,203	140	0,32	0,03
12,1	—	1,214	106	0,45	0,02
13,7	2,1	1,218	10	0,08	0,02
14,6	—	1,200	116	0,32	0,02
14,7	2,3	1,237	124	0,28	0,02
15,5	—	1,224	318	0,62	0,03
16,1	1,0	1,196	2.120	0,87	0,07
16,6	1,3	1,198	2.060	1,03	0,07
16,8	1,4	1,191	> 3.000	1,22	0,06
18,6	0,9	1,219	30	0,31	0,03
18,6	0,5	1,235	201	0,57	0,07
18,9	2,5	1,217	18	0,14	0,03
19,8	2,1	1,225	180	0,47	0,07
20,2	1,2	1,273	645	0,81	0,07
20,8	—	1,269	184	0,64	0,04
20,8	—	1,231	48	0,26	0,02
21,3	1,8	1,239	2.180	0,73	0,07
21,6	—	1,275	> 3.000	1,10	0,07
22,5	1,8	1,247	389	0,70	0,05
26,6	1,4	1,295	81	0,40	0,05
27,0	2,1	1,191	10	0,12	0,03
27,4	< 0,1	1,284	> 3.000	> 2,5	—
27,6	1,7	1,229	32	0,20	0,03
27,8	0,2	1,288	78	0,33	0,08
28,3	1,0	1,330	69	0,42	0,05
28,3	0,6	1,325	300	0,57	0,04
28,7	0,2	1,320	566	0,71	0,05
29,1	1,2	1,288	112	0,42	0,05
29,3	1,0	1,323	448	0,62	0,07
29,4	—	1,292	> 3.000	1,80	0,01
29,6	1,1	1,320	9	0,10	0,02
29,8	0,1	1,305	154	0,50	0,08
29,9	—	1,333	369	0,63	0,01
30,2	1,6	1,337	92	0,44	0,02
30,4	1,5	1,246	23	0,25	0,05
30,9	1,2	1,347	77	0,33	0,03
31,3	1,2	1,327	68	0,37	0,06
31,6	1,0	1,362	99	0,30	0,03
32,6	0,7	1,365	2.330	0,98	0,15
33,6	1,1	1,368	62	0,34	0,06
33,9	1,1	1,272	56	0,30	0,08
34,5	0,8	1,290	78	0,35	0,07
36,2	0,5	1,374	49	0,27	0,04
36,5	1,3	1,239	38	0,44	0,05
37,4	0,8	1,314	70	0,38	0,04
40,2	1,2	1,362	83	0,45	0,05
41,4	0,7	1,416	62	0,31	0,06

BIBLIOGRAFIA

1. AGUILAR, M.: *Rev. O. P.*, **75** (1922), págs. 265-267, 286-288, 307-310 y 330-332.

2. LOMAN, R. y N. P. ZWIKKER: *Physica*, **12** (1934), página 1.181.

3. RIEDEL, W. y H. WEBER: *Asph. and Teer*, **33** (1933), página 667; **38** (1938), pág. 693; **39** (1939), página 714.

4. NORM. DIN 1995: "Vorschriften für die Probenahme und Beschaffenheit sowie die Unterschuchung von bitominösen Strassenbaubindemitteln".

5. RIEDEL, W.: *Asph. und Teer*, **34** (1934), págs. 209, 924, 961 y 979; **36** (1936), págs. 119 y 191.

6. GEISSLER, W.: *Bitumen*, **4** (1934), pág. 191.

7. VETLESEN, E. VAN: *Meddeker fra Veidirektoren*. Oslo.

8. VALTON, P. A.: *Highways and Bridges*, **3** (1937), página 5.

9. MOLL, K.: *Teer und Bitum*, **32** (1934), págs. 231 y 325.

10. HERRMANN, P.: *Asph. und Teer*, **35** (1935), página 905.

11. LEE, A. R.: *J. Soc. chem. Ind.*, **55** (1936), núm. 6, páginas 23 T-29 T.

12. OBERBACH, J.: *Teer und Bitum*, **34** (1936), pág. 271.

13. DOW: *Am. Asph. Par. Conf.*, 1927.

14. MALLISON, H. y H. SCHMIDT: *Bull. Ass. Int. Perm. Congr. Route*, marzo-abril 1939. *Asph. und Teer*, **39** (1939), págs. 51-54.

15. TYLER, O. R.: *Bull. Res. Eng. Exp. Station Lafayette Indiana*, núm. 62, sept. 1938.

16. KNIGHT, B. H.: *Road Aggregates. Their Uses and Testing*, London, Edward Arnold & Co. (1935), págs. 77-83. *Highways and Bridges*, enero 1939.

17. VANDONE, I.: *Le Strade*, **16** (1934), núm. 5. *Le Strade*, **18** (1936), núm. 11.

18. CARDIA, F.: *Le Strade*, **18** (1936), núm. 6, pág. 341. *Rich. e Studi*, I (1937), pág. 27.

19. HOLMES, A.: *Proc. ASTM*, **39** (1939), págs. 1.140-1.149.

20. ARRIANO, R.: *Le Strade*, **21** (1939), págs. 409-425. *Rich. e Studi*, III (1939), págs. 105-123. *Le Strade*, **23** (1941), págs. 313-323.

21. HARTLEB, W. y SCHULTZ, K. W.: *Forsch. Arb. Strassenbau*, **3** (1938).

22. KLINKMANN, C. H.: *Asph. und Teer*, **41** (1941), número 23.

23. DURIEZ: *An. P. et Ch.* Oct. 1937.

24. BROOME, D. C.: *The Testing of Bituminous Mixtures*, London, Edward Arnold & Co. (1935), páginas 175-176.

25. ARRIANO, R.: *Le Strade*, **21** (1939). *Rich. e Studi*, II (1938), págs. 23-26. *Le Strade*, **22** (1940), páginas 3-20. *Rich. e Studi*, III (1939) págs. 23-26.

26. Véanse las NLC 6.01, 6.02, 6.05, 6.06 y 6.14, sobre ensayos de materiales bituminosos. *Publicaciones del Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción*, núms. 4, 5, 9, 11 y 24 (1945).