



**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN EN LA
INCORPORACIÓN DE PROMOTORES DE
ADHERENCIA EN CEMENTOS ASFÁLTICOS**

H.Gerardo Botasso¹, Oscar R. Rebollo², Cecilia J. Soengas²,
Marcela Balige³, Alejandro Bisio³, Alejandro Berardo³

Copyright 2011, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabajo Técnico, elaborado para ser presentado en el XVI CILA – *Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto* a realizarse entre el 20 y el 25 de noviembre de 2011 en Rio de Janeiro, fue seleccionado por el Comité Técnico del evento para dicho fin, de concordancia con las informaciones contenidas en el resumen sometido por el/los autor(es). Tal cual presentado, su contenido no fue revisado por el IBP. Por ende, los organizadores no traducirán ni corregirán los textos recibidos. La versión original del material presentado no refleja necesariamente las opiniones del *Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis*, sus Asociados y Representantes. El/los autores de este Trabajo Técnico tienen pleno conocimiento de esto y aprueban su publicación en los Anales del

XVI CILA – Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto.

Resumen

En las mezclas asfálticas se busca que la unión entre agregado y asfalto resulte efectiva y resistente bajo condiciones desfavorables de humedad, tendiendo a que la energía de adhesión de la interfase asfalto-agregado en presencia de agua sea la mayor posible. Este es un fenómeno de características netamente superficiales dependiente del comportamiento molecular del sistema ternario asfalto-agregado-agua. Para optimizar la interacción asfalto-árido se han empleado aditivos mejoradores de adherencia en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente. Su uso ha ido creciendo en los últimos años, tanto en las mezclas que emplean ligantes convencionales como en las que utilizan asfaltos modificados. Se requiere de un estudio de los métodos de evaluación que en la actualidad se emplean para definir la dosis óptima de los aditivos mejoradores de adherencia, fundamentalmente porque existe un gran número de ensayos y métodos sin un consenso acerca de cual emplear. De allí la necesidad de establecer una metodología única que ponga en evidencia el fenómeno y posea un tratamiento normalizado que se pueda llevar adelante en la mayoría de los laboratorios. Es importante también definir y establecer los aspectos relacionados con la manipulación e incorporación de estos aditivos en planta, de manera de asegurar una correcta incorporación y almacenamiento del asfalto aditivado que permita mantener las propiedades durante esta etapa. El presente artículo tiene como fin proporcionar un conjunto de recomendaciones que alcancen los diferentes conceptos y variables mencionadas anteriormente.

Abstract

In the hot mix asphalt is intended that the bond between aggregate and asphalt is effective and resistant under adverse conditions of moisture, tending to the adhesion energy of asphalt-aggregate interface in the presence of water is maximized. This is a purely superficial phenomenon dependent of molecular behavior of the ternary system water-aggregate-asphalt. To optimize the asphalt-aggregate interactions have been used adhesion improving additives for the production of hot mix asphalt. Its use has been growing in recent years, both in mixtures using conventional binders such as in those using modified asphalts. It requires a study of assessment methods currently used to define the optimal dose of the adhesion improving additives, mainly because the large number of tests and methods without a consensus about which to use. Hence the need to establish a unique methodology that highlights the phenomenon and has a standardized treatment that can be carried out in most laboratories. It is also important to define and establish the aspects of handling and incorporation of these additives in plant, so as to ensure proper incorporation and storage asphalt additive that maintains the properties during this stage. This article aims to provide a set of recommendations to reach the different concepts and variables mentioned above.

1.Introducción

Uno de los objetivos principales del presente trabajo es recolectar y transmitir toda la experiencia recogida en estudios previos llevados adelante por las instituciones a las cuales pertenecen los autores en el marco de convenios de

¹ Mg Ingeniero – Director – LEMaC Centro de Investigaciones Viales – UTN – FRLP

² Ingeniero Civil – LEMaC -Centro de Investigaciones Viales – UTN – FRLP

³ Ingeniero Civil – YPF S.A.

transferencia técnica, de manera de contar con una publicación que posea un alcance de todos los temas vinculados al empleo de los mejoradores de adherencia; desde el análisis teórico del fenómeno propiamente dicho, pasando por los diferentes tipos de mejoradores de adherencia, las técnicas de evaluación y cuantificación hasta arribar por último a las recomendaciones para la manipulación de estos agentes en la obra.

En principio es conveniente comentar que el efecto de la humedad en las mezclas asfálticas es un tema de interés fundamentalmente porque gran parte de los deterioros observados en las capas de rodamiento y en capas de base son debidos al efecto que la presencia de agua causa en las mismas. Desprendimientos, peladuras, fisuras, baches e hinchamientos son algunas de las manifestaciones de los defectos más comunes originados por este fenómeno.

Principalmente, la presencia de agua pone de manifiesto los problemas que se suscitan en la adhesión entre los agregados, el asfalto y la interacción entre ellos. Este problema se estudia desde hace muchos años, pudiéndose citar que en el año 1934, Kindscher describe la importancia y necesidad de investigar sobre lo que ocurre cuando entra en contacto el asfalto y el agregado, recomendando fijar la atención de estos fenómenos físicos-químicos que indudablemente inciden sobre la calidad y fundamentalmente en la durabilidad de los concretos asfálticos.

Años más tarde Langmuir, Hardy y otros, demostraron que si en la superficie de contacto entre el árido y un hidrocarburo, se logra formar una finísima película de ácido graso, alcoholes, etc., ocurrirá un fenómeno de disminución de la energía interfásica como consecuencia de la orientación molecular en la superficie de separación del sistema, lo cual derivará en una mejora en la adherencia asfalto-árido en presencia de agua.

Estos compuestos, denominados en el ámbito generalmente como “mejoradores de adherencia” presentan simultáneamente dos grupos en sus moléculas, a saber: un grupo hidrocarbonado de ninguna o escasa polaridad de compatibilidad con el asfalto y un segundo grupo funcional de elevada polaridad afín al árido, logrando de esta manera establecer una ligadura o puente entre estos componentes.

La eficacia de estos compuestos esta holgadamente demostrada por los comportamientos observados a lo largo de los últimos años en los concretos asfálticos que emplearon este tipo de aditivos, sin embargo queda pendiente el tratamiento de algunos aspectos también vinculados con el logro de una aplicación exitosa de estos aditivos.

Estos aspectos están constituidos fundamentalmente por los relacionados con la fijación de la dosis necesaria a emplear y por el tratamiento que al aditivo se le debe dar en la planta de elaboración de mezclas asfálticas, tanto en la etapa de dosificación como en la de almacenamiento del ligante asfáltico ya aditivado.

La metodología a utilizar para la determinación del tipo de aditivo adecuado y de la dosis óptima presenta una importancia superlativa dado que dotaciones menores de aditivos no lograrán poner de manifiesto las propiedades que éstos le otorgan a los concretos asfálticos, mientras que dotaciones superiores a las necesarias, al margen del factor económico, lejos de beneficiar al sistema pueden perjudicar el comportamiento del mismo ya que pueden incidir negativamente en el comportamiento del ligante asfáltico sobre todo en su respuesta frente a deformaciones permanentes.

Superada la etapa de elección del aditivo adecuado y de la dosis necesaria, el tratamiento en planta no es menos importante. En esta etapa se debe garantizar una metodología precisa de dosificación en primera instancia, un sistema que garantice la homogeneidad de la mezcla entre el aditivo y el ligante en segundo lugar y por último un cuidado del cemento asfáltico ya aditivado, básicamente en la temperatura de almacenaje, que permita asegurar la continuidad del efecto del aditivo con el tiempo.

Otro aspecto necesario a desarrollar y que efectivamente será tratado en el trabajo es la determinación de un plan de inspección de la calidad del aditivo que se recibe para su posterior uso; de modo de asegurar que el aditivo que se emplee en la elaboración de la mezcla asfáltica reúna las características que el mismo debe de presentar.

Para abordar la situación y los temas introducidos anteriormente, se comenzará por plantear el fenómeno de interacción entre asfalto y árido desde un enfoque conceptual. Posteriormente se evaluará por plantear el fenómeno de interacción entre asfalto y árido desde un enfoque conceptual. Posteriormente se evaluará la composición de los principales compuestos empleados actualmente como mejoradores de adherencia y la forma en la cual éstos actúan con las principales tipologías de áridos, para luego pasar a analizar las metodologías de ensayo más adecuadas para la elección del tipo y dosis de aditivo y una propuesta preliminar acerca de qué ensayo emplear en la recepción de estos materiales a fin de garantizar la calidad de los mismos. Por último se enunciarán algunas recomendaciones asociadas al manipuleo de estos compuestos en los obradores.

2. El sistema asfalto – árido y su interacción

Antes de continuar con el trabajo es conveniente efectuar una introducción teórica al problema de modo de contar con un marco conceptual a partir del cual desarrollar el contenido.

En líneas generales se puede decir que se trata de un sistema complejo debido a la cantidad de variables que interactúan simultáneamente, las cuales dependen de cada uno de los componentes intervinientes: asfalto y agua. Seguidamente se describirá rápidamente y a modo introductorio a los dos principales componentes de este sistema y las propiedades de ellos asociadas directamente al fenómeno de adherencia árido-ligante.

Los cementos asfálticos provienen del petróleo y están formados por compuestos de alto peso molecular y estructura muy compleja, siendo principalmente hidrocarburos acompañados de pequeñas fracciones de nitrógeno, azufre y

oxígeno. Una de las formas más empleadas para modelizar la estructura de los mismos es a partir de una mezcla heterogénea de los compuestos químicos bajo un sistema coloidal de dos fases: asfaltenos y maltenos.

Los primeros ejercen una influencia muy fuerte sobre las características adhesivas y aglomerantes del ligante variando su contenido entre el 5 % y el 25 %; los segundos son compuestos solubles en heptano y poseen un aspecto resinoso.

Es importante efectuar una caracterización integral del asfalto de manera de contar con herramientas que permitan correlacionar el comportamiento frente a la adherencia con las propiedades del ligante. La caracterización integral de un asfalto involucra ensayos tales como cromatografía (a fin de valorar su composición química), viscosímetros y reómetros (a fin de evaluar sus propiedades reológicas). Para determinar sus propiedades físico-mecánicas se considerarán ensayos más rutinarios, como los son los ensayos de penetración, punto de ablandamiento, peso específico, entre otros.

Pasando al segundo componente del sistema, el árido, una definición muy empleada es la que especifica que los mismos son aquellos fragmentos de rocas que proceden de canteras y/o yacimientos en explotación comercial.

Desde el punto de vista geológico un árido se puede caracterizar y clasificar realizando un examen petrológico de las rocas y minerales que lo componen; estudiar y clasificar específicamente los tipos litológicos que componen un árido es relevante, ya que permite predecir su comportamiento en función de la aplicación en la que se utilice el mismo.

Para poder realizar una clasificación desde el punto de vista geológico del material, es necesario ejecutar observaciones tanto a macroescala como a escala microscópica. El uso del microscopio óptico permite conocer la composición mineralógica, textura (relación entre tamaños y formas de los cristales), grado y tipos de alteración presente entre otras características.

Una de las clasificaciones de agregados más útiles para estudiar el fenómeno que nos convoca, lo constituye la que agrupa a este tipo de materiales dentro de dos grandes tipos:

- .- Ácidos: cuya superficie tiende a cargarse negativamente (-).
- .- Básicos: cuya superficie tiende a cargarse positivamente (+).

La clasificación anterior se basa en el contenido de óxido de silicio de los agregados; dado que los áridos ácidos contienen principalmente sílice, mientras que los áridos básicos contienen mayormente carbonatos.

De esta manera si el material contiene $\text{SiO}_2 > 66\%$ se está en presencia de un agregado ácido (-); si el contenido de SiO_2 se encuentra entre 55 % y 66 % el agregado se denomina intermedio, por último si el agregado contiene $\text{SiO}_2 < 55\%$ será considerado como básico (+).

Más allá de estas apreciaciones de origen, son también de importancia las propiedades físico-mecánicas tales como limpieza, textura, absorción y peso específico.

En general en las mezclas asfálticas se diferencian tres fracciones: gruesa, intermedia y fina. A esta última se le sumará además la valoración de las propiedades de los finos mediante el ensayo de equivalente arena y contenido de materia orgánica, datos éstos de utilidad en el estudio del fenómeno abordado.

Presentados resumidamente los componentes del sistema, queda por tratar la manera en la cual ambos interactúan. Los áridos naturalmente se dejan mojar por el agua, más que por los ligantes asfálticos; al margen de esto no sólo es importante considerar la adecuada envuelta en el proceso de mezclado (denominada adherencia activa) sino también a posteriori cuando la mezcla entre en servicio y se vea sometida a la acción del tránsito, el clima y el agua propiamente dicha, provocando esfuerzos que tiendan a “despegar” el ligante del árido; esto último se lo suele denominar adherencia pasiva.

Si se trata de un agregado básico o calizo (+), se está en presencia de una agrupación de moléculas de carbonato de calcio que siempre tendrán superficies minerales que, en presencia de agua, se ionizan provocando el origen de cargas positivas (+) en la superficie de los mismos.

Si en cambio se está frente a agregados ácidos (-), simplifícadamente éstos están formados por átomos de silicio rodeado de grupos de oxígeno y cationes metálicos, por lo que en presencia de humedad estos agregados también se ionizan cargándose negativamente (-).

Si consideramos que los asfaltos, originados principalmente por la presencia de grupos ácidos, presentan una tendencia a cargarse negativamente en presencia de agua. De allí que es natural inferir que los áridos calizos o básicos (+) presentan naturalmente mejor adherencia con los asfaltos que los agregados ácidos (-), aspecto éste vinculado a las fuerzas intermoleculares de carácter electrostático. Estas cargas eléctricas de las superficies tendrán una fuerte incidencia en la capacidad de mojado de cualquier sustancia que lo intente hacer, sea agua, asfalto o algún aditivo.

3. Mecanismos de desprendimiento

Antes de continuar con los temas comprometidos en la introducción, se considera conveniente destacar cuáles son los principales mecanismos de desprendimiento (adherencia pasiva).

En este orden es importante destacar que la película de asfalto que rodea al agregado no es impermeable, por lo tanto es posible que el agua ingrese a la interface árido-asfalto pudiendo comenzar la acción de desplazamiento.

Tomaremos como referencia para los potenciales mecanismos de desprendimiento los citados por Goodrich, dentro de los cuales se encuentran:

.- Emulsificación espontánea:

Con la presencia del tránsito la adhesividad del asfalto en la superficie del árido se ve modificada, formándose una emulsión inversa entre asfalto y agua que deriva en un descubrimiento de la superficie del agregado.

.- Rotura de película:

La rotura de la película se puede dar por fisuras en la superficie de la película de asfalto o en puntos debido a la presencia de polvo adherido al árido. Otros orígenes de estas roturas de película lo constituyen la acción de las cargas durante el proceso de construcción, el tránsito en condiciones de servicio, cambios ambientales de humedecimiento y secado o congelamiento y deshielo.

.- Presión de poros:

Este mecanismo se pone de manifiesto con la combinación de ciclos de congelamiento y deshielo frente a acciones de sollicitaciones del tránsito. Con estos ciclos aumenta la presión de poros en la interfase árido-ligante y comienzan a deteriorarse las fuerzas de adhesión. Este fenómeno fue estudiado y puesto a prueba por Lottman en sus estudios.

.- Decapado hidráulico:

Este mecanismo se verifica cuando el pavimento es solicitado por elevadas cargas verticales de servicio; esto hace que la tracción producida provoque el desprendimiento del asfalto de la superficie de los áridos más expuestos. Este efecto puede verse incrementado con la presencia de polvo adherido al ser amasado por acción del agua y del tránsito.

.- Osmosis:

Este es otro mecanismo documentado en la literatura, ocurre debido a la presencia de sales o soluciones de sales en los poros del agregado y por lo tanto la creación de un gradiente de presión osmótica que succiona el agua a través de la película de asfalto. Es un proceso muy lento que se ve favorecido cuando algunos agregados en su composición poseen iones de sal en la superficie.

.- Mecanismo de retroceso:

Denominado en inglés como de pull-back, se puede observar por ejemplo en mezclas sometidas al test del hervido, en los áridos en donde se ha desprendido el asfalto luego de unas horas, cuando se quita totalmente el agua vuelve a cubrirse en mayor medida la superficie con el asfalto desprendido.

.- Condiciones ambientales:

La acción del agua y la temperatura es significativa y varía su importancia en función del tipo de minerales constitutivos de los áridos.

4. Teoría de desprendimientos

Se analizan resumidamente las teorías de desprendimientos de modo de poder estudiar posteriormente la relación existente entre éstos y los mecanismos de desprendimiento listados anteriormente en el punto 3 (tres) del presente trabajo.

Los estudios de Rice clasifican estas teorías de fenómenos de superficie de acuerdo al listado que a continuación se detalla:

.- Enclavamiento mecánico:

El enclavamiento mecánico supone la ausencia de interacción química entre el asfalto y el agregado, la textura de la superficie del agregado es el factor principal que afecta a la adhesión. La resistencia de la unión se supone que deriva de la cohesión entre la superficie del árido y el asfalto.

.- Reacción química:

La postulación y los componentes básicos de esta teoría se fundamentan en la presencia de ácidos en el sistema asfalto-agregado. Estos componentes reaccionan formando compuestos insolubles en agua.

.- Orientación molecular o energía de la superficie:

Esta teoría representa la estructuración de las moléculas de asfalto en la interfaz asfalto-agregado. Asume que la adhesión entre el asfalto y el agregado se ve afectada por la relación existente entre la energía superficial de ambos, desarrollando un trabajo de mojado.

Continuando con el análisis y tal lo adelantado oportunamente, en la tabla 1 se puede observar la relación existente entre los mecanismos de desprendimiento y las teorías de desprendimientos.

De esta manera, observando dicha tabla, se puede inferir en primer lugar que la separación del asfalto de la superficie de agregado tendrá su fundamentación en la falta de enclavamiento mecánico y en la falta de trabajo de adherencia como acciones de contribución primaria, mientras que existirá una contribución secundaria derivada de la acción química de la energía de superficie por la disminución de la tensión superficial.

Los efectos combinados del tránsito, temperatura y agua propiciarán el desplazamiento de la película de asfalto, siendo una consecuencia primaria de una reacción química y de energía de superficie.

De esta manera podemos avanzar y realizar el análisis de cada uno de los mecanismos enunciados con anterioridad, determinando el grado de aporte al fenómeno de cada una de las teorías.

Tabla 1: Relación entre mecanismos y teorías

Mecanismos de desprendimiento	Modo de funcionamiento	Teorías de desprendimiento								
		Enclavamiento mecánico			Reacción química			Energía de superficie		
		Físico	Químico	Físico Químico	Físico	Químico	Físico Químico	Físico	Químico	Físico Químico
Separación	P							P	S	
Desplazamiento					P			P		
Emulsificación Espontanea				P	S					
Ruptura de Película	P									
Presión de Poros	P									
Decapado Hidráulico	P									

P: contribuidor primario

S: contribuidor secundario

5. Aditivos mejoradores de adherencia

5.1. Definición y clasificación

Introducida la problemática conceptual del fenómeno, se pasa a continuación a tratar específicamente a los aditivos mejoradores de adherencia.

Los mismos son productos tensoactivos, llamados también surfactantes, que constituyen especies químicas de estructura polar-no polar que ofrecen una especie de “puente” entre la superficie de los agregados y el ligante asfáltico.

Los agentes de superficie contienen en su molécula uno o varios grupos hidrofílicos que pueden ser de tipo iónico o no iónico, y además una estructura hidrocarbonada hidrofóbica. Esta última estructura hidrofóbica de baja polaridad presenta compatibilidad con el asfalto mientras que en el otro extremo se tiene que los grupos hidrófilos verifican una alta compatibilidad con la superficie de los agregados.

Dependiendo del tipo de árido que se considere, se tendrán que seleccionar aditivos con grupos hidrofílicos no iónicos o iónicos; y si se está frente a esta última situación, también se tendrá que definir el tipo de carga conveniente.

Pasando ahora a la clasificación de los agentes tensoactivos, la misma se fundamenta en el poder de disociación de los componentes en presencia de un electrolito y de sus propiedades fisicoquímicas. De este modo, según la dirección de transferencia del ion activo se constituyen dos grandes grupos: agentes iónicos y no-iónicos.

En la Figura 1 se pueden ver graficados sintéticamente los medios y las cargas eléctricas correspondientes a cada grupo dentro de los cuales se clasifican los mejoradores de adherencia.

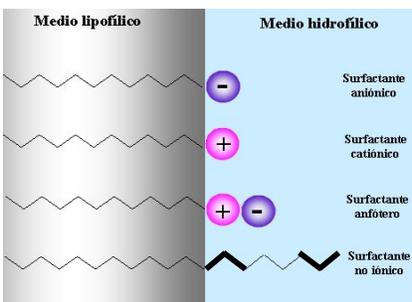


Figura 1. Clasificación de los mejoradores

A continuación se vuelca una breve descripción sobre cada uno de los grupos representados en la figura 1; es decir, los iónicos y los no-iónicos.

Los Surfactantes iónicos se los distingue principalmente por su gran afinidad electrostática con los dipolos del agua, los mismos pueden ser: aniónicos, catiónicos o anfóteros.

.- Tensoactivos aniónicos: Están formados por una cadena alquílica (hidrógeno y carbono) lineal o ramificada que va de 10 a 14 átomos de carbono, mientras que en el extremo polar de la molécula se encuentra un anión. Representantes de este grupo son los derivados del ión sulfato o de sulfonato, como es el dodecil sulfato de sodio o el dodecil bencen sulfonato de sodio.

.- Tensoactivos catiónicos. Están formados por una cadena larga de sales de amonio cuaternarias o sales de alquilaminas. La cadena larga constituye el grupo hidrofóbico mientras que en el extremo polar de la molécula se encuentra el catión constituido por nitrógeno tetravalente en forma de sales de amonio cuaternario. Representantes de este grupo son el cloruro de aquil dimetilbencilamonio y el cloruro de cetil trietil aminio.

.- Tensoactivos anfotéricos: Presentan en su molécula a grupos aniónicos y catiónicos, son productos estables en sistemas ácidos y alcalinos. Estos tensoactivos actúan dependiendo del medio en que se encuentren, en medio básico son aniónicos y en medio ácido son catiónicos. Representantes de este grupo son las betaínas y los derivados de imidiazolinas como por ejemplo aquil dimetil betaína.

Los Surfactantes no iónicos: Estos compuestos, como su nombre lo indica, no se ionizan en agua. El grupo hidrofóbico está formado por una cadena larga que contiene una serie de grupos débilmente solubilizantes tales como enlaces etéreos o grupos hidroxilos. Representantes de este grupo son los derivados de los polioxietilenados, polioxipropilenados y anhídridos del sorbitán.

Al margen de la clasificación y descripción de las diferentes alternativas de mejoradores de adherencia, los surfactantes más eficaces son, por su resultado y por la compatibilidad con el asfalto, los de tipo amínico.

Las aminas son compuestos orgánicos nitrogenados derivados del amoníaco, en el que se ha sustituido uno, dos o los tres átomos de hidrógeno por radicales hidrocarbonados. Resultan así, tres clases diferentes de aminas: primarias, secundarias y terciarias respectivamente, como se puede observar en la Figura 2. Intervienen ligaduras covalentes, ligaduras hidrogenadas, ligaduras iónicas y fuerzas de Van der Waals.

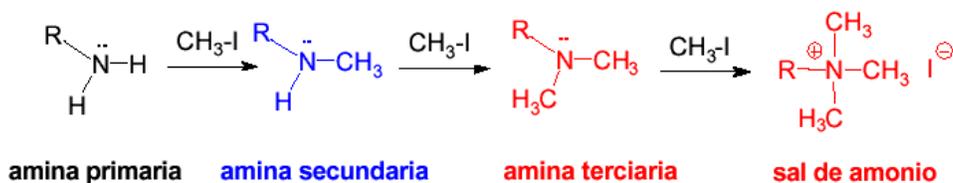


Figura 2. Enlaces químicos de las aminas

5.2. Principio de funcionamiento de los aditivos mejoradores de adherencia

Como se mencionara anteriormente, la mayor parte de los aditivos mejoradores de adherencia son compuestos amínicos. En el momento en que estos compuestos son incorporados al ligante asfáltico, la cadena hidrocarbonada de naturaleza hidrófoba se incorpora al seno del asfalto mientras que el segundo grupo amínico hidrófilo se sitúa en la superficie.

Cuando el asfalto con el aditivo incorporado hace contacto con la humedad que contienen los áridos, el aditivo se hidroliza de la manera que se muestra en la figura 3.

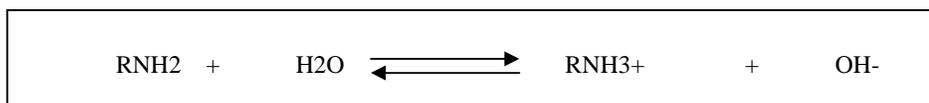


Figura 3. Reacción de las aminas en presencia de agua.

Posteriormente, si se considera un agregado ácido (-), los glóbulos de asfalto cargados positivamente son atraídos por los iones del árido silíceo $(\text{SiO}_4)^{-4}$ formándose una unión mediante el compuesto químico llamado silicato de amina, el cual proporciona una gran adherencia y resistencia a la presencia de agua y a los cambios térmicos.

Si en cambio se considera un árido básico o calizo (+), la combinación con el mejorador puede dar lugar a carbonato de amina el cual es un compuesto de carácter insoluble y de mayor adhesividad.

De esta forma los áridos serán mojados por dos líquidos, promotor de adhesión y asfalto, de tensiones interfaciales diferentes.

Para que exista un equilibrio que se manifieste en un buen recubrimiento, será necesario que el trabajo desarrollado por el promotor de adhesión sea mayor que el desarrollado por cualquier otro líquido, sea agua o asfalto. Si se tuviera que hablar de un signo de la tensión de adhesión, el trabajo desarrollado por el mejorador de adhesión deberá ser lo suficientemente grande para permitir el desarrollo de la adherencia activa, como así también el trabajo opuesto generado por al fuerzas de desprendimientos (adhesión pasiva).

6. Técnicas recomendadas para la determinación de la dosis óptima

Como se adelantara oportunamente, existen numerosas metodologías tendientes a evaluar y cuantificar la adherencia árido-ligante en presencia de agua.

Continuando con esta variedad de ensayos, tenemos que algunos de estos métodos ponen en evidencia en mayor medida la adherencia activa mientras que otros se centralizan en la adherencia pasiva. Tenemos también que algunos métodos se realizan sobre ciertas fracciones del árido en estudio mientras que otros se llevan adelante sobre la composición de áridos que se empleará en la mezcla.

Se tiene así métodos de ensayo efectuados sobre mezclas disgregadas y otros sobre la mezcla asfáltica ya compactada. De esta manera podemos continuar este análisis por toda esta amplia gama de posibilidades.

El estudio comparativo de la mayoría de estas metodologías, involucrando los materiales típicos empleados en el mercado argentino, ya fue realizado y presentado en trabajos y congresos anteriores. En ellos no sólo se evaluaron las características, ventajas y sensibilidad derivadas de cada metodología sino también la aplicabilidad al medio local.

En virtud de la información y conclusiones a las cuales se arribaron en esa oportunidad, en esta ocasión se describirán las metodologías que se recomiendan para la evaluación de la adherencia árido-ligante y la determinación de la dosis óptima de mejorador de adherencia en aquellos casos que esto último resulte necesario.

Para ordenar la presentación de los mismos, se ha realizado una agrupación de las metodologías de ensayo en dos grandes grupos: las cualitativas y las cuantitativas.

6.1. Métodos cualitativos

Dentro de este grupo se encuentra una batería de posibilidades muy amplias que van desde el ensayo del hervido descrito en la norma ASTM D-3625:96 “Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water” que evalúa visualmente el efecto que provoca sobre el recubrimiento asfáltico someter a una muestra de mezcla bituminosa a un período de inmersión en agua hirviendo, hasta un método de mucho uso en Argentina que es el ensayo denominado “Determinación de la adherencia entre agregado y ligante” descrito en la norma IRAM-6842:2007 en el cual se analiza cualitativamente la acción que produce someter bajo inmersión en agua a una temperatura superior en 5 °C al punto de ablandamiento del ligante considerado al recubrimiento de ligante asfáltico de una fracción del agregado en estudio.

También dentro de este grupo se encuentra al ensayo Riedel-Weber descrito en la metodología IRAM-1803:2010 empleado para la evaluación de la adherencia entre el asfalto utilizado y la fracción fina de los agregados.

Estos métodos en general son de utilidad para evaluar cualitativamente la compatibilidad entre los agregados en estudio y el o los diferentes tipos de ligantes asfálticos, dado que rápidamente pone en evidencia cualquier tipo de problema de compatibilidad potencial entre los dos componentes principales del sistema. Otra ventaja importante que presentan estas metodologías es su fácil aplicabilidad en obra, ya que no requieren de un equipamiento sofisticado para poder ser llevadas adelante.

Sin embargo estos métodos, al menos desde la experiencia del equipo de trabajo, no son recomendados para determinar la dotación de mejorador de adherencia a emplear, fundamentalmente por su falta de representatividad de las condiciones en las cuales luego el sistema árido-asfalto presentará durante su vida en servicio, principalmente la compactación del concreto asfáltico.

Este aspecto conduce generalmente a fijar dotaciones de mejorador de adherencia superiores a las necesarias, siendo este aspecto no deseable por las razones mencionadas en este trabajo anteriormente.

6.2. Métodos cuantitativos

En este caso se abordan aquellos métodos que permiten cuantificar a partir de una propiedad mecánica la respuesta que el concreto asfáltico en estudio presentará ante la presencia de agua. Generalmente estos métodos poseen una estructura de tratamiento similar, consistente en efectuar una comparación entre la magnitud de la propiedad del concreto asfáltico tomada como referencia antes y después de someterlo a un determinado acondicionamiento en presencia de agua.

Estas metodologías generalmente presentan una mejor representatividad del fenómeno que la verificada por los métodos cualitativos, razón por la cual son las metodologías recomendadas en el momento de determinar la necesidad de uso de un agente mejorador de adherencia, y en este último caso la dosis recomendada.

Dentro de los métodos disponibles para este grupo de ensayos y con campo de aplicación en mezclas asfálticas densas o semidensas en caliente, también se dispone de un abanico amplio de alternativas.

Para este caso, y basado en estudios comparativos presentados en trabajos anteriores, el método recomendado es el descrito bajo las normativas ASTM D-4867:2009 “Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures” y/o AASHTO T-283:2007 “Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage”

Se pueden encontrar también dentro de este campo de aplicación, los métodos basados en procesos de inmersión-compresión como el descrito en la normativa ASTM D-1075:2007 “Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures”, métodos basados en el parámetro de estabilidad Marshall y otros como los mencionados en la tabla 2.

Sin embargo se considera que la metodología que mejor pone en evidencia el fenómeno y presenta una sensibilidad adecuada frente a la acción que el agua produce en los concretos asfálticos, es la mencionada oportunamente (ASTM D-4867:2009 “Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures” y/o AASHTO T-283:2007 “Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage” a la cual comúnmente se la denomina como “test de Lottman modificado”. Otra ventaja operativa importante es la de requerir de un equipamiento para su aplicación que la mayoría de los laboratorios de obra posee en nuestro país.

Continuando la línea de las ventajas de este método, un aspecto fundamental lo constituye su alta sensibilidad frente a la pérdida de cohesión que el concreto asfáltico verifica cuando comienza a fallar la adherencia entre árido y ligante ante la existencia de humedad.

Esta pérdida de cohesión es cuantificada a partir de determinar la resistencia a la tracción indirecta de un grupo de especímenes del concreto asfáltico en estudio como resultado de los efectos de la saturación acelerada en agua y un período de congelamiento seguido de otro de inmersión en agua y compararla con el mismo parámetro correspondiente a un grupo de especímenes que no fue sometido al acondicionamiento antes mencionado.

Tabla 2: Métodos cuantitativos

Método	Norma	Sensibilidad del método	Frecuencia de uso en Argentina
Test de inmersión-compresión	ASTM D-1075:2007 AASHTO T-165:2002	Media	Baja
Tracción indirecta Test de Lottman	AASHTO T:283:2007 ASTM D-4867:2009	Alta	Media
Estabilidad remanente Marshall	DNV-E9:1986	Media	Alta
Ensayo del Cántabro	EN 12697-17:2007	Alta	Baja

Para la situación de considerar mezclas asfálticas en caliente de granulometría discontinuas y de altos contenidos de vacíos, como por ejemplo las mezclas asfálticas drenantes, la aplicación del Test de Lottman basado en la resistencia a

tracción indirecta está en estudio; fundamentalmente porque estas mezclas mucho distan de una de las hipótesis en las cuales se basa el cálculo de esta magnitud que es la continuidad del material. Al margen de lo mencionado, la normativa europea ha tomado a este ensayo para evaluar la sensibilidad de las mezclas drenantes frente a la presencia de agua.

Continuando en el ámbito de las mezclas drenantes, el ensayo que se presenta como de mayor aplicabilidad a la hora de establecer el comportamiento de las mismas frente a la acción de la humedad es la pérdida por desgaste del cántabro húmedo, originalmente descrito bajo la normativa NLT-352 y actualmente contemplado luego de la armonización en la EN-12697-17:2007 “Particle loss of porous asphalt specimen”. En relación a este ensayo aplicado a esta tipología de mezclas asfálticas, se han reportado en el ámbito local experiencias diferentes; que van desde resultados adecuados hasta niveles de dispersión de resultados muy elevados que no permiten establecer a ciencia cierta un valor consistente de la magnitud medida.

Por esta razón, insistiendo que sólo para el caso de las mezclas drenantes, se cree conveniente evaluar en detalle estos aspectos comentados anteriormente de manera de establecer qué metodología se presenta como más idónea y aplicable en el momento de evaluar la sensibilidad que estos concretos presentan a la acción de la humedad.

7. Recomendaciones en el tratamiento de los mejoradores de adherencia en planta

Una vez efectuados los análisis y ensayos correspondientes a determinar la necesidad del empleo de agentes mejoradores de adherencia, existe el desafío de llevar a la práctica la solución encontrada en los procesos de dosificación de laboratorio, y más específicamente para el caso la incorporación del aditivo mejorador de adherencia en la dosis y condiciones que permitan asegurar el efecto pretendido sobre el concreto asfáltico.

Existen en el proceso de incorporación del aditivo al ligante asfáltico y la posterior elaboración de la mezcla asfáltica, algunas etapas o hitos de importancia en los cuales focalizar cierta atención dado que de ellas dependerá en gran medida el éxito del proceso final.

En este sentido es importante resaltar que en la actualidad, y al menos en el mercado argentino, estos controles o verificaciones mínimas no se están llevando adelante en las plantas asfálticas tomando un riesgo casi innecesario considerando la magnitud económica que pueden significar las verificaciones que a continuación se recomiendan en cada una de las etapas de este proceso.

7.1. Control de recepción de los mejoradores de adherencia

El primer paso de estas recomendaciones es efectuar una rápida pero efectiva verificación de los agentes surfactantes en la planta asfáltica, de manera de contar con la seguridad que el aditivo que se incorpore corresponda al producto considerado en la etapa de dosificación.

En este sentido una metodología de fácil aplicación en un laboratorio y que brinda mucha información es la determinación del contenido total de aminas. En efecto estos compuestos son la materia activa principal que otorga al aditivo la propiedad de mejorador de adherencia.

Con un sencillo ensayo realizado a partir de un pHmetro se puede obtener el contenido de aminas totales, sin distinguir el tipo de amina. Si se utilizan aminas en estado de base se realizará por potenciometría en medio de ácido acético puro, neutralizando con ácido perclórico. Cuando la amina está como clorhidrato, se agrega acetato mercúrico que fija los iones cloro desprendidos durante la neutralización.

De esta manera se puede determinar si el aditivo utilizado presenta el contenido de materia activa especificado; si esto es así incorporando la dosis determinada en la etapa de laboratorio, los resultados de la mezcla elaborada en planta se corresponderán con los obtenidos en la mencionada etapa de diseño. Si por el contrario el contenido de materia activa es inferior al utilizado en el momento de la dosificación, se deberá incrementar el contenido de aditivo para lograr el efecto esperado, con todos los inconvenientes que ello involucra (económicos e influencia en la rigidez del ligante).

Otra posibilidad para controlar la recepción de estos aditivos es a partir de su estructura química. Para ello es necesario enviar una muestra del aditivo empleado en el momento de dosificación a un laboratorio que cuente con la posibilidad de realizar una espectrografía infrarroja que muestre las bandas características de los grupos químicos presentes en la molécula. Luego en el momento de recepción del aditivo en planta, también se debe enviar una muestra del compuesto para la realización del mismo ensayo; de esta manera se podrán comparar las bandas características de ambas muestras y detectar alguna potencial diferencia.

Si bien el equipo necesario para la realización de esta metodología no se encuentra presente en los laboratorios viales, son equipos muy frecuentes en los laboratorios químicos. La realización del ensayo demanda un par de minutos y no es una metodología muy costosa, sobre todo si se considera los gastos en los cuales se incurren al fallar una estructura por problemas de adherencia con los agregados.

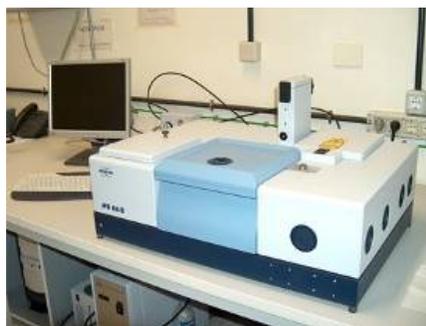


Figura 4. Vista de espectrofotómetro infrarrojo

7.2. Metodología de adición

Esta etapa es de importancia por dos razones principalmente: en primer lugar porque se debe asegurar que la cantidad de aditivo a adicionar sea la que surgió de los estudios de dosificación, mientras que en segundo término también en esta etapa se debe garantizar que la homogeneización del aditivo en el seno del ligante asfáltico resulte eficiente.

Actualmente esta operación se lleva adelante durante la descarga de las cisternas de asfalto a los tanques de almacenamiento para posteriormente proceder a efectuar una recirculación del asfalto aditivado a través de la bomba de asfalto de la propia planta de asfalto. Este proceso como es de imaginar es bastante precario, poco preciso y de dudosa eficiencia. Simultáneamente es necesario en este caso contar con un aditivo estable a la temperatura, dado que es muy probable que el asfalto aditivado permanezca por varios días a una temperatura del orden de los 140 °C a 160 °C.

La metodología más adecuada y recomendada para la adición de este tipo de aditivos es la inyección de los mismos a la línea de asfaltos a través de una bomba (para la impulsión del compuesto) y un caudalímetro (para la dosificación del mismo). Adicionalmente el sistema se completa con la colocación de un mezclador estático en línea colocado justo antes de la entrada del asfalto al mezclador de la planta.

Con este sistema se asegura una mayor precisión en la dosificación, homogeneidad en el mezclado del sistema asfalto-aditivo y el hecho de que el agente mejorador de adherencia permanezca poco tiempo en contacto con el asfalto caliente, dado que en forma casi inmediata el ligante con el aditivo se incorpora a los áridos.

Un mezclador estático es un conjunto de piezas dentro de una tubería que producen diferentes corrientes del caudal lo cual origina la energía necesaria para efectuar una mezcla completa sin piezas en movimiento. Poseen además bajo costo, no necesitan mantenimiento y gozan de una larga vida útil. Se muestra un esquema de vista exterior e interior en la Figura 5.

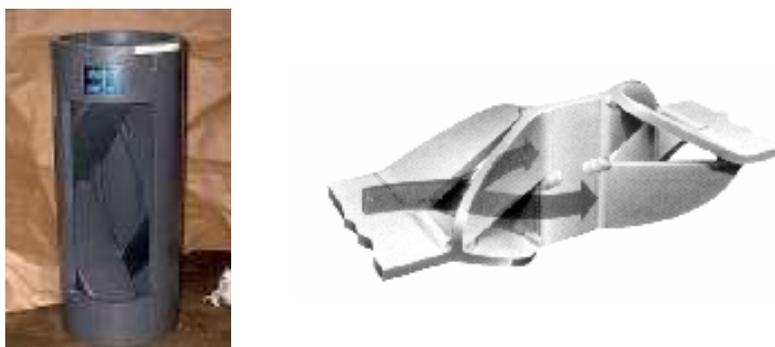


Figura 5. Vista exterior e interior de un estático en línea típico.

7.3. Cómo saber si un asfalto posee un tensoactivo

Cuando se quiere determinar o detectar si un determinado cemento asfáltico se encuentra aditivado con un mejorador de adherencia, se puede emplear también en este caso la espectrometría infrarroja. Para hacer esto posible se deberá conocer qué tipo de aditivo se está considerando ya que la metodología consiste en realizar un análisis comparativo de los espectros correspondientes al asfalto, al aditivo y al asfalto aditivado.

En la figura 6 se pueden observar los espectros mencionados anteriormente: el correspondiente al cemento asfáltico, el del aditivo mejorador de adherencia y por último el del asfalto aditivado con un 0,3 % del agente mejorador de adherencia. Se puede observar que el aditivo mejorador de adherencia presenta un pico distintivo del compuesto

considerado en el orden de los 1700 cm⁻¹, pico este que no aparece en el espectro del asfalto; de allí que el espectro correspondiente del asfalto aditivado posee en esta misma longitud de onda un pico insipiente que confirma la presencia del agente mejorador de adherencia en el cemento asfáltico.

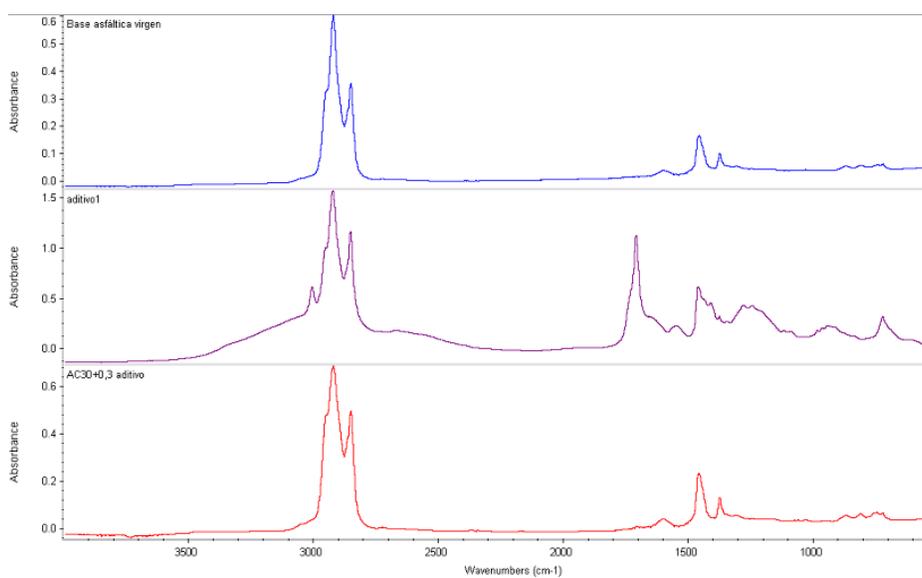


Figura 6. Reporte de espectrofotómetro infrarrojo

También esta metodología brinda una herramienta para evaluar el grado de homogeneización logrado por el sistema de mezclado presente en la planta; o en el caso de contar con una recirculación o agitación, definir el tiempo mínimo a partir del cual el agente mejorador de adherencia se encuentra correctamente incorporado.

7.4. Condiciones de almacenamiento del asfalto aditivado: efectos de la temperatura en los tensoactivos

La mayoría de los compuestos que constituyen a los aditivos mejoradores de adherencia pierden progresivamente su efecto al permanecer en el asfalto a elevadas temperaturas, es decir en el rango de las temperaturas empleadas usualmente en el almacenaje de los cementos asfálticos en planta.

Esta pérdida de las propiedades se origina por la reacción de las aminas con los compuestos ácidos del asfalto, y el tiempo en el cual este fenómeno se origina depende fundamentalmente del origen del asfalto considerado y de la temperatura de almacenaje; incrementándose este efecto con la temperatura del asfalto y con la acidez del crudo del cual se obtuvo el ligante. Si bien se mencionaron las variables intervinientes en esta pérdida de efecto del mejorador de adherencia, se puede comentar que estos tiempos rondan generalmente entre 1 (uno) día y 3 (tres) días.

Por este motivo siempre lo recomendable es efectuar la aditivación del cemento asfáltico lo más cerca posible de la elaboración de la mezcla asfáltica, siendo la situación ideal la inyección de estos agentes en la línea de asfalto tal cual se comentara oportunamente. Si esto no fuera posible se deberán tomar los recaudos necesarios desde el punto de vista logístico para utilizar el asfalto aditivado con este tipo de compuestos dentro de un período de tiempo en el cual no se pierda el efecto de la aditivación.

8. Consideraciones finales

- Al momento de estudiar la adherencia de un determinado agregado con un cemento asfáltico, es importante primeramente efectuar un análisis de los componentes del sistema individualmente (árido y asfalto), para luego sí continuar con el estudio de la interacción entre ellos. Esto brindará la información previa necesaria para inferir la respuesta de los mismos y decidir por ejemplo qué tipo de compuesto mejorador de adherencia se comportará de manera más eficiente y efectiva.
- En lo referente a las metodologías de laboratorio tendientes a evaluar este fenómeno, se cuenta con una variedad muy importante de alternativas. En líneas generales se puede dividir a las mismas en metodologías que evalúan el fenómeno cualitativamente y metodologías que lo analizan cuantitativamente.
- Las metodologías cualitativas son herramientas importantes a la hora de determinar el grado de compatibilidad que un agregado presenta frente a un tipo de asfalto dado; de todos modos no se recomiendan para fijar la dosis

- óptima de mejorador de adherencia a emplear, para este aspecto la recomendación es emplear los métodos cuantitativos, siendo considerado como métodos de aproximación primario de la adherencia activa.
- De la recolección y análisis de estudio y trabajos presentados anteriormente por los autores, se recomienda para esta labor el empleo del ensayo denominado Lottman modificado, descrito bajo las normativas ASTM D-4867 y AASHTO T-283. Esta recomendación se basa en la representatividad y sensibilidad del ensayo con el fenómeno estudiado, obedeciendo esto a la evaluación que la metodología realiza de la pérdida de cohesión de la mezcla asfáltica causada por la presencia de humedad; análisis éste realizado a partir de la medición de la resistencia a tracción indirecta. Lo significativo del método radica en la valoración que se realiza de la adherencia pasiva del sistema.
 - Solo para el caso de mezclas drenantes, basado en su granulometría discontinua y su elevado contenido de vacíos, el ensayo que se presenta como de mayor aplicabilidad a la hora de establecer el comportamiento de las mismas frente a la acción de la humedad es la pérdida por desgaste del cántabro húmedo, originalmente descrito bajo la normativa NLT-352 y actualmente contemplado luego de la armonización en la EN-12697-17:2007 “Particle loss of porous asphalt specimen”. Sin embargo se han reportado en el ámbito local experiencias diferentes; que van desde resultados adecuados hasta niveles de dispersión de resultados muy elevados que no permiten establecer a ciencia cierta un valor consistente de la magnitud medida. Por esta razón, insistiendo que sólo para el caso de las mezclas drenantes, se cree conveniente evaluar en detalle estos aspectos comentados anteriormente de manera de establecer qué metodología se presenta como más idónea y aplicable en el momento de evaluar la sensibilidad que estos concretos presentan a la acción de la humedad.
 - Finalizada la etapa de diseño de la mezcla, la cual incluirá la necesidad o no de emplear un aditivo mejorador de adherencia, y en este último caso su dotación, se deben de tener en cuenta algunos aspectos prácticos vinculados con el tratamiento del aditivo en planta para asegurar la eficacia de la aditivación.
 - El primer aspecto de los mencionados anteriormente lo constituye la realización de algún tipo de control de recepción de los aditivos mejoradores de adherencia para asegurar que los mismos presenten las mismas características que las muestras de aditivos empleados durante la etapa de diseño. En esta área existen técnicas sencillas de implementar de modo de determinar el contenido de materia activa de estos compuestos; otra posibilidad es hacer uso de espectroscopia infrarroja, que con rápidas y sencillas técnicas pueden constituir una herramienta sobre la cual tomar decisiones.
 - Cumplimentadas las etapas anteriores los puntos sobre los cuales recae la atención son la inyección del aditivo al asfalto y luego el grado de homogeneización logrado. Lo recomendable en estos casos es realizar la incorporación del aditivo en la línea de asfaltos a partir de una bomba y un caudalímetro que nos asegure la cantidad incorporada; a este sistema se lo debe de complementar con un mezclador estático en línea que asegure la correcta homogeneidad de la mezcla aditivo-asfalto.
 - Esta manera de incorporarlo presenta además de las ventajas de homogeneidad y precisión el aspecto de no exponer al aditivo a elevadas temperaturas. La permanencia del asfalto aditivado a elevadas temperaturas produce una pérdida de eficacia del efecto de los agentes mejoradores, razón por la cual lo más recomendable es minimizar este tipo de situación.
 - También se pueden emplear las técnicas basadas en la espectroscopia infrarroja para determinar la eficiencia del sistema de mezclado propuesto o ajustarlo hasta lograr la homogeneidad deseada.
 - Por último, se puede decir que el fenómeno de adherencia asfalto-agregado, si bien como se enunciara es un mecanismo de compleja interpretación, se puede postular que superado el análisis de afinidad árido-asfalto se deberá recorrer un camino de caracterización que permita valorar la permanencia de dicha adherencia bajo la acción del tránsito, la temperatura y la humedad.

9. Bibliografía

- BRAVO RODRIGUEZ, GARCIA LOPEZ y VICARIA RIVILLAS. Comportamiento reológico de disoluciones acuosas de surfactantes comerciales no iónicos. Editorial de la Universidad de Granada, España. 2009.
- BOTASSO, BALIGE, BISIO, GONZALEZ y REBOLLO. Nueva Metodología para la Valoración de la Adherencia Árido Ligante. Trabajo presentado en la XXXII Reunión de la Comisión Permanente del Asfalto. 2006.
- CORTEZ APARICIO A. Técnicas Cualitativas para la Detección de Mejoradores de Adherencia en Tratamientos Superficiales. Trabajo presentado en la XVII Reunión Anual de la Comisión Permanente del asfalto. 1971.
- GIUDICE C. A. y PEREYRA A. M. Tecnología de Pinturas y Recubrimiento. Componentes, Formulación, Manufactura y Control de Calidad. B. Relación pigmentos/ Material formador de película. C. Manufactura de pinturas. Cap. VIII Dispersión de pigmentos. Editorial edUTecNe. 2010.
- KIGGUNDU B. M. y ROBERTS F. L. Stripping in HMA Mixtures: State –Of-The-Art and critical review of test Methods. National Center for Asphalt Technology, Report No. 88-2. 1988.
- SUNDARAM LOGARAJ. Chemistry of asphalt aggregate interaction-Influence of additive.