



Matriz árido-ligante: factores implicados en la capacidad adhesiva y cohesiva del ligante asfáltico

Aggregate – asphalt binder matrix: factors involved in the adhesive and cohesive capacities of asphalt binder

Valdés G.¹, Calabi A. ¹, Sanchez E. ¹, Miró R.2, Reyes O.³

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del
artículo:

Recibido
13-05-2015
Aceptado
03-09-2015
Publicado
09-12-2015

Palabras Claves:
Cemento Asfáltico
Cohesión
Adhesión

Article history:

Received
13-05-2015
Accepted
03-09-2015
Available
09-12-2015

Keywords:
Asphalt Binder
Cohesion
Adhesion

¹Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Chile.

²Departamento de Infraestructuras del Transporte, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

³Departamento de Ingeniería Civil Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.
gonzalo.valdes@ufrontera.cl, teléfono: 56-45-325681

Resumen

En este artículo se presentan, en un lenguaje sencillo y técnico, los factores que afectan a las uniones entre el árido y el ligante de una mezcla asfáltica. En primer lugar, se describen los conceptos de adhesión y cohesión asociados al fallo en las mezclas asfálticas. Se explican las teorías de adhesión y se presentan los factores internos y externos que influyen en el comportamiento de las uniones de estos materiales. Además, se describen los mecanismos de fallo y los principales deterioros asociados al fallo en las uniones árido-ligante de una mezcla asfáltica.

Abstract

This paper presents, in an easy and technical language, the factors which affect the bonds between aggregate and binder in asphalt mixture. First, the concepts of adhesion and cohesion associated with failure in asphalt mixtures are described. Theories of adhesion are explained, and the internal and external factors that influence the behavior of the bonds of these materials are presented. In turn, the mechanisms of failure and main damages related to failure between aggregate-binder bonds in an asphalt mixture are described.

1. Introducción

Las mezclas asfálticas son materiales compuestos por áridos, filler y ligantes asfálticos, mezclados en distintas proporciones. Este material ha sido considerado por mucho tiempo como uno de los materiales más importantes utilizados en las capas superiores de los pavimentos flexibles [1]. Esto se debe principalmente a las propiedades funcionales y estructurales que posee este material, que permite por una parte, obtener un buen nivel de confort y seguridad en la conducción a los usuarios, mientras que por otra, puede resistir las solicitaciones del tráfico y del medioambiente, obteniéndose un buen nivel de durabilidad acorde al periodo de diseño considerado para la estructura de pavimento [2]. En este contexto, se entiende por durabilidad de una mezcla asfáltica la propiedad relacionada con la capacidad del material o de sus materiales constituyentes para resistir los agentes medioambientales, tales como el efecto del agua, el envejecimiento y las variaciones térmicas; simultáneamente a las cargas originadas por el tráfico, sin presentar deterioros significativos en un periodo de tiempo considerado [3]. Aunque existen diferentes tipos de pavimentos flexibles con distintas propiedades que sirven a diversos propósitos (basados principalmente en el nivel de tráfico, clima, características del suelo de fundación, entre otros), todas las mezclas asfálticas utilizadas en estas estructuras deben tratar de maximizar las siguientes cualidades: la resistencia a la deformación, a la fisuración, al daño por humedad y ser durables en el tiempo [4]. Sin embargo, independiente de la eficiencia con las cuales son diseñadas y construidas las mezclas asfálticas, éstas van a estar sometidas al efecto combinado de solicitaciones medioambientales y altas cargas de tráfico que tenderán a producirles un daño acumulado, con un grado de severidad creciente en el tiempo. De acuerdo a lo anterior, el principal objetivo de este artículo es presentar, en un lenguaje sencillo, pero con un rigor técnico de los conceptos, formas de fallo y factores internos y externos que influyen en las uniones árido-ligante cuando las mezclas asfálticas están en servicio en una estructura de pavimento, conjuntamente con los mecanismos de fallo y los deterioros de las mezclas asfálticas.

2. Conceptos de adhesión y cohesión

Para lograr una mejor comprensión de los deterioros producidos en las mezclas asfálticas cuando están sometidas a distintos tipos de solicitaciones en las estructuras del pavimento, es fundamental comprender los conceptos de adhesión y cohesión asociados al material. Adhesión se entiende como la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies diferentes cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares y mecanismos de anclaje [5]. Mientras que cohesión se define como la propiedad

que mide la fuerza de atracción entre las partículas o moléculas de un mismo cuerpo o material, concepto que se diferencia de la adhesión, principalmente debido a que ésta última propiedad se produce entre la superficie de distintos cuerpos o materiales [6], tal cual se observa en la Figura 1.

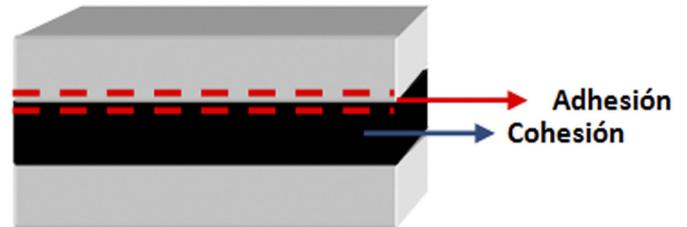


Figura 1: Cohesión y adhesión. Fuente: Adaptada de [4]

Particularmente, en el caso de las mezclas asfálticas, el fallo adhesivo (pérdida de adhesión) se presenta cuando se produce una ruptura de la unión en la interfaz entre el ligante asfáltico (ómástico=ligante + filler) y el árido; mientras que el fallo cohesivo ocurre debido a la ruptura de la unión entre las propias moléculas del ligante asfáltico.

En el contexto de las mezclas asfálticas, la adhesión puede ser utilizada para referirse a la cantidad de energía que se requiere para lograr romper la unión entre el ligante asfáltico y los áridos; mientras que la cohesión puede ser utilizada para referirse a la energía que se requiere para romper las fuerzas intermoleculares que se desarrollan para mantener unidas las moléculas dentro del propio ligante asfáltico [7] [4]. Este fenómeno se puede visualizar en la Figura 2, que muestra cómo interactúan los esfuerzos de adhesión y cohesión entre el ligante asfáltico y los áridos.

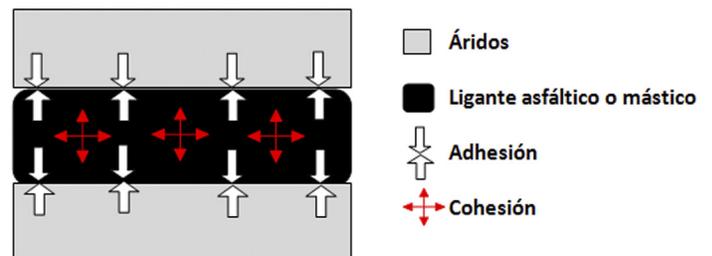


Figura 2: Fuerzas de adhesión y cohesión entre ligante asfáltico y áridos. Fuente: Adaptada de [4]

Para comprender los tipos de fallos adhesivos y cohesivos se requiere definir los conceptos de tensión de rotura teórica (σ_t) y tensión de rotura real (σ_r). La tensión de rotura teórica es aquella fuerza máxima por unidad de superficie que soporta el adhesivo, el ligante asfáltico mástico en el caso de las mezclas. Mientras que la tensión de rotura real es la fuerza máxima por unidad de superficie que soporta la interfaz de ambos materiales, es decir, la unión de superficies entre el árido y el ligante o mástico asfáltico para el caso de las mezclas.

En este contexto, en la Figura 3 se observan los diferentes tipos de fallos que pueden ocurrir entre el ligante o mástico asfáltico y los áridos. El fallo adhesivo se produce en la interfaz entre la superficie del árido y el ligante (zona de adhesión), y se caracteriza porque el ligante se ha separado completamente del árido, pudiendo o no, dejar alguna mancha o descoloramiento en el árido producto de la separación del ligante. Este tipo de fallo se produce cuando la tensión de rotura real (σ_r) es menor a la tensión de rotura teórica (σ_t). Por otra parte, el fallo cohesivo en la unión árido-ligante se produce cuando la rotura se encuentra en el propio ligante asfáltico y se pueden observar restos de ligante en ambas superficies de los áridos. Este tipo de fallo se origina cuando la tensión de rotura teórica (σ_t) es menor que la tensión de rotura real (σ_r). Finalmente, se encuentra el fallo mixto, que es aquel en que se puede observar el efecto combinado de un fallo adhesivo y cohesivo. De acuerdo a diferentes investigadores, el fallo mixto es el que se produce mayoritariamente en las mezclas asfálticas [4] [8], en mayor o menor grado de ponderación de cada fallo (adhesivo o cohesivo), según sea la exposición de las mezclas asfálticas a los diversos agentes solicitantes (tráfico y medioambiente).

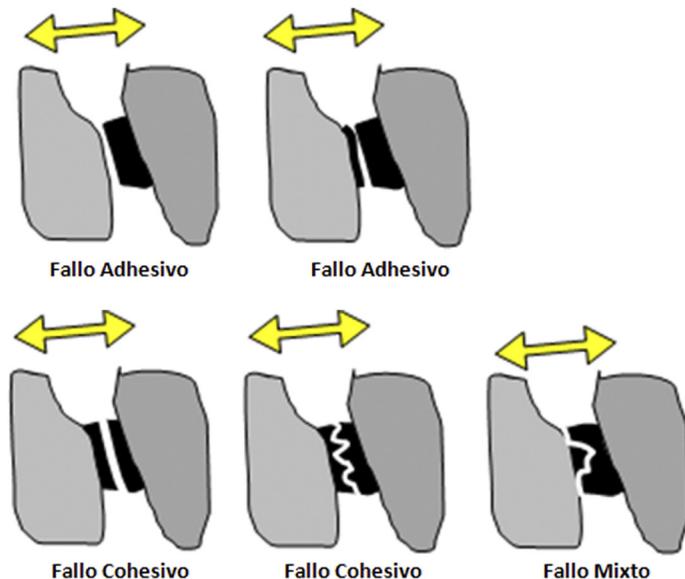


Figura 3: Tipos de fallo en la unión árido-ligante

2.1. Teorías de adhesión en las uniones árido-ligante

La interacción entre el árido y el ligante es un fenómeno complejo. Las teorías que tratan de explicar los fallos a partir del estudio del fenómeno de adhesión entre los áridos y el ligante en una matriz de mezcla asfáltica son varias, y no existe alguna que pueda justificar en plenitud todos los mecanismos de fallo. Es por ello, que dependiendo del caso particular de estudio, toma más importancia una u otra teoría. A continuación, se resumen las teorías más significativas en la interacción adhesiva entre el árido y el ligante.

Teoría mecánica de adhesión

Es una de las primeras teorías desarrolladas y se basa en el anclaje que se produce entre el adhesivo y el sustrato, producto de las rugosidades y porosidades de éste último, es decir, de la topografía superficial del sustrato. En el caso de las uniones árido-ligante, la adhesión está influenciada por las propiedades físicas de los áridos (Figura 4), tales como el tamaño de las partículas, textura superficial, angulosidad, porosidad o absorción y área superficial [9].

Estas características de los áridos van a influir en su topografía superficial, permitiéndole al ligante penetrar y rellenar las irregularidades y poros, produciéndose zonas de anclajes de sujeción entre el ligante y el árido, mejorando la resistencia de rotura real (σ_r). En general, se obtendrá una mejor unión adhesiva entre el árido y el ligante cuanto más rugoso sea éste y posea mayor cantidad de superficie de contacto en la matriz. A parte de la existencia de porosidad y rugosidad en el árido, es necesario que el ligante, en el momento del mezclado, posea la viscosidad adecuada para que pueda cubrir correctamente toda la superficie del árido penetrando en todas las irregularidades y poros de éste, generando así una zona de anclaje y sujeción que mejore la adhesión entre ambos materiales. Esta teoría tiene el inconveniente de no poder explicar los fenómenos de adhesión entre superficies de baja rugosidad o lisas y aquellas producto de incompatibilidades por afinidad química entre el ligante asfáltico y el árido.

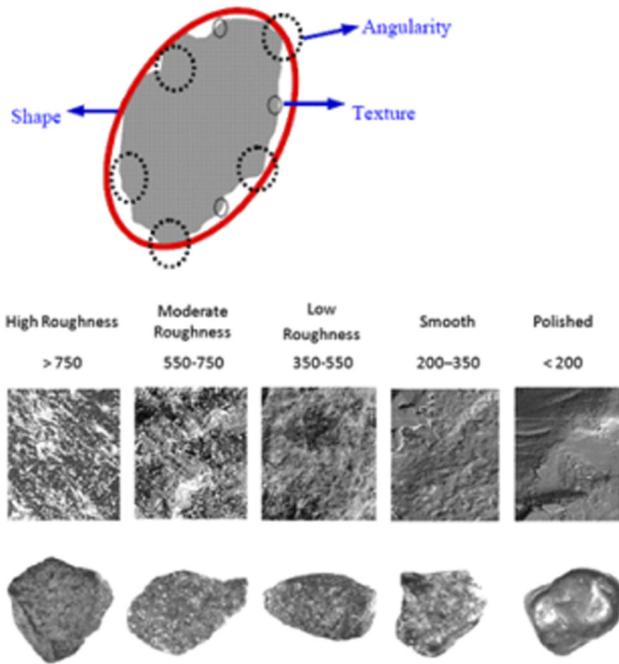


Figura 4: Propiedades físicas de los áridos importantes en la adhesión mecánica con el ligante. Fuente: [10] [11]

Teoría química de adhesión

La teoría química de adhesión resulta cuando dos materiales pueden formar un compuesto al unirse producto de su afinidad, es decir, entre el adhesivo y el sustrato. Una vez que el adhesivo ha mojado correctamente al sustrato, el fenómeno de la adhesión se origina siempre y cuando se generen fuerzas intermoleculares, es decir, enlaces químicos entre ellos. El concepto de reacción química surge de la presencia de componentes reactivos (ácidos y básicos) en la interacción o interfaz entre árido y ligante. Estos componentes son llamados radicales y existen principalmente en forma de dipolos. Este concepto señala que la unión árido-ligante resulta de la reacción de esos componentes entre sí para formar compuestos, los cuales algunas veces se separan en presencia de agua produciendo el fenómeno de stripping [12].

Teoría de la adsorción

El fenómeno de adhesión entre el ligante asfáltico (adhesivo) y el árido (sustrato) se explica también a través de la teoría de adsorción, mediante conceptos como el ángulo de contacto, la humectabilidad (capacidad de mojado de un sustrato) y la tensión superficial. El ángulo de contacto y las energías superficiales del ligante asfáltico y del árido van a definir la capacidad de humectar o mojar del ligante ante un árido determinado. Por ángulo de contacto se entiende la forma que se genera cuando entra en contacto una gota de ligante asfáltico con la superficie del árido,

indicando el grado de humectabilidad existente entre el ligante y el árido, Figura 5.

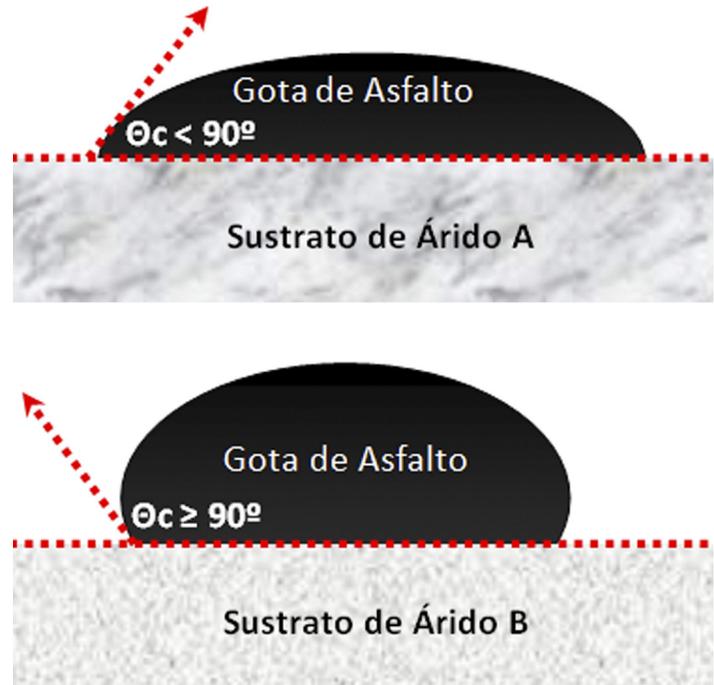


Figura 5: Ángulo de contacto entre el asfalto y agregado.

Para ángulos inferiores a 90° , se entiende que el ligante humecta o moja correctamente al árido, generando una buena adhesión entre ambos materiales, mientras que para ángulos mayores a 90° , no se genera una correcta adhesión. Asociado al concepto de ángulo de contacto, y que definen parte de la teoría de adsorción, se encuentran los conceptos de tensión superficial y energía superficial. La tensión superficial es la resistencia que, en este caso, presenta el ligante asfáltico a deformarse o romperse, mientras que la energía superficial es la propiedad que posee el árido para atraer o repeler de su superficie al ligante asfáltico a través de fuerzas intermoleculares. Para el caso de la interacción árido-ligante, cuando el ligante dispone de una tensión superficial inferior a la energía superficial del árido, este es capaz de humectar la superficie del árido generando un ángulo de contacto inferior a 90° , creando una buena adhesión entre ambos materiales. En otras palabras, cuando el árido posee una alta energía superficial, tiende a atraer al ligante que tiene una baja tensión superficial, debido a su viscosidad a la temperatura de fabricación de la mezcla.

3. Factores internos que influyen en las uniones árido- ligante

De acuerdo a lo presentado en las teorías del apartado anterior, son muchos los factores que pueden determinar el comportamiento de las uniones árido-ligante en una mezcla asfáltica, y muchas veces los efectos analizados no son individuales, sino una mezcla de ellos. En este apartado se presentan aquellos factores internos que tienen relación con los materiales constituyentes de las mezclas asfálticas y su diseño.

3.1. Propiedades de los materiales

La influencia que, en general, tienen los materiales que componen las mezclas asfálticas en el proceso de adhesión entre ambos es compleja. El comportamiento adhesivo de la unión árido-ligante va a depender de sus propiedades físico-químicas [13].

En el caso del árido, sus propiedades físicas estarán definidas por su mineralogía y por el proceso de triturado (forma, superficie, estructura, porosidad y tamaño del árido), mientras que sus propiedades químicas estarán definidas, principalmente, por su procedencia y composición mineralógica. Así, por ejemplo, se encuentran áridos silíceos, como cuarzos y granitos, formados por compuestos polares inorgánicos, cuyas propiedades permiten que sus superficies sean levemente ácidas. Diferente es el caso de los áridos calizos o mármol, que están formados, en un alto porcentaje, de carbonato de calcio que permite que las superficies sean levemente básicas. En el caso del ligante asfáltico, sus propiedades físicas van relacionadas con su consistencia, la cual depende, principalmente, de la temperatura a la que se encuentre por tratarse de un material viscoelástico termo-dependiente, presentando un comportamiento sólido elástico a baja temperatura y líquido viscoso a altas temperaturas [14]. Desde el punto de vista químico, el ligante asfáltico es una mezcla de muchos compuestos orgánicos, en su mayoría hidrocarburos, que varían en estructura y peso molecular [15]. Adicionalmente a los hidrocarburos, los ligantes asfálticos contienen compuestos orgánicos polares, tanto ácidos como básicos. En la mayoría de los ligantes asfálticos existe un exceso de compuestos ácidos en relación a los compuestos básicos [14].

Estas características de los materiales constituyentes de las mezclas asfálticas influyen en una mayor o menor adhesión que puede haber entre ellos, puesto que, como se ha señalado en las teorías de adhesión, esta mezcla de propiedades influye en el grado de adhesión entre estos materiales [13]. Un ejemplo de lo comentado se observa en la Figura 6, que señala las diferencias registradas en el comportamiento de las uniones árido-ligante consecuencia de las propiedades de los materiales [16]. En esta figura se observan las pérdidas de desgaste en el ensayo cántabro (fallas cohesivas,

adhesivas o mixtas) para tres tipos de áridos con diferentes características. Los áridos AF1 y AF2 son de origen fluvial y poseen las mismas características mineralógicas y químicas entre sí, pero con distinto patrón de forma y textura, siendo el árido AF1 aquel que posee mejores propiedades de forma y textura. Por otra parte, el árido AC es un árido de cantera, con un patrón de forma muy similar al árido AF1, pero con un grado menor de acidez producto de su mineralogía.

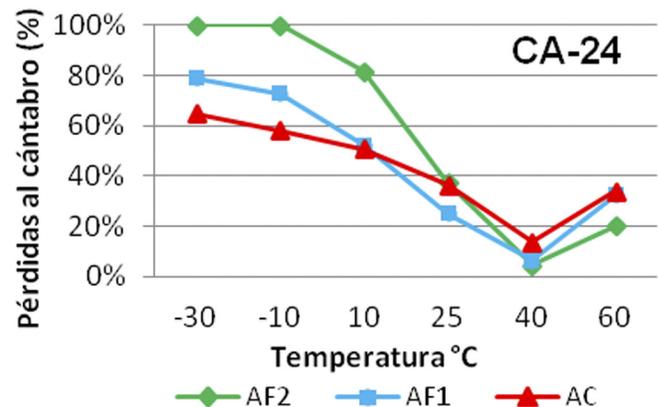


Figura 6: Curvas de estado unión árido-ligante de tres tipos de áridos con ligante CA-24. Fuente: [16]

3.2. Diseño de la mezcla: Granulometría, contenido de ligante y espesor de recubrimiento

Existe una influencia directa en el comportamiento de las uniones árido-ligante de una mezcla asfáltica por efecto de la granulometría de los áridos. Las mezclas que presentan una granulometría más continua, poseen una menor superficie específica de los áridos envueltos con el ligante en contacto con los agentes atmosféricos que deterioran dichas uniones, retardando así el envejecimiento de éstas y, por tanto, la fragilidad de los puentes de adherencia entre el árido y el ligante de la mezcla [17]. Los agentes atmosféricos que deterioran los puentes de adherencia árido-ligante y que contribuyen al envejecimiento del ligante, y en consecuencia a su fragilidad, corresponden principalmente al oxígeno y los rayos UV que producen la volatilización de las fracciones livianas del ligante. Como resultado del proceso de envejecimiento, el ligante se torna frágil y propenso a sufrir daño por humedad, por lo cual, mezclas más porosas y con huecos interconectados en la matriz, se verán más afectadas por dichos agentes debido a la mayor exposición. El contenido de ligante en la mezcla es un factor muy importante en el comportamiento de las uniones árido-ligante en la matriz de una mezcla asfáltica. El contenido de ligante debe ser el óptimo que permita una correcta unión en toda la matriz de áridos componentes de una determinada mezcla, sin producir posibles exu-

daciones ni desprendimientos como consecuencia de un exceso o falta de ligante, respectivamente. Así mismo, el espesor teórico de recubrimiento de los áridos es función del contenido específico de ligante, de la granulometría utilizada y de las características superficiales del árido. Recubrimientos muy finos contribuyen a un envejecimiento prematuro de la mezcla, lo que lleva consigo un incremento en la fragilidad de ésta. Por ello, Kandhal y Chakraborty [18] señalan que para mezclas con un contenido de huecos entre 4 y 5%, los áridos deberían tener un espesor óptimo de recubrimiento entre 9 y 10 micrones. Adicionalmente, el efecto de espesor de recubrimiento de los áridos influye en la susceptibilidad al agua de las uniones árido-ligante. Estos espesores de recubrimiento se confirman con el estudio realizado por Sengoz y Agar [19], quienes llegaron a resultados similares a los obtenidos por Kandhal y Chakraborty, pero evaluando el daño por humedad en las uniones adhesivas de la matriz árido-ligante, señalando que el espesor de recubrimiento óptimo fluctúa entre 9,5 y 10,5 micrones. Estos investigadores señalan que para espesores de recubrimiento menores al rango de 9,5 a 10,5 micrones, las diferencias de resistencia registradas en las uniones árido-ligante, medidas a través del ensayo de tracción indirecta (pre y post inmersión), comienzan a ser mayores a medida que se disminuyen los espesores de recubrimiento.

4. Factores externos que influyen en las uniones árido- ligante

4.1. Efectos del envejecimiento del ligante

El envejecimiento es uno de los factores responsables del deterioro de varias de las cualidades de una mezcla asfáltica. Se ve perjudicada la flexibilidad, la impermeabilidad, la resistencia a la fatiga y la durabilidad. Esto se manifiesta con la modificación de las propiedades del ligante y consta de dos etapas, tal como se observa en la Figura 7: una a corto plazo, producto de la fabricación en planta y los procesos constructivos; y otra a largo plazo, que se desarrolla a lo largo de la etapa de servicio del pavimento [20].

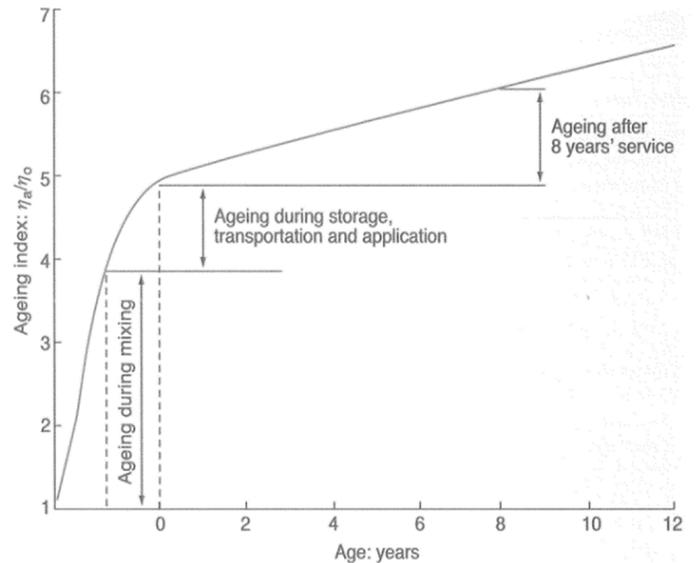


Figura 7: Envejecimiento a corto y largo plazo del cementos asfáltico. Fuente: [13]

El envejecimiento del ligante asfáltico provoca un endurecimiento de los puentes de adherencia o uniones en la matriz árido-ligante, inducido por tres factores esenciales [13] [21] [22] [23]:

1. La pérdida de fracciones livianas por volatilización o por absorción de los áridos porosos.
2. Los cambios en la distribución de fracciones SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos) y la microestructura molecular del ligante asfáltico debido al proceso de oxidación por la reacción del 2. ligante con el oxígeno de la atmósfera y la exposición a los rayos UV.
3. Finalmente, la reestructuración o empaquetamiento molecular que experimenta el ligante, formando estructuras tipo gel, en condiciones de moderada y baja temperatura durante la vida de servicio de la mezcla en el pavimento.

Durante el proceso de oxidación, se generan compuestos polares como cetonas y sulfóxidos, además de anhídridos dicarboxílicos y ácidos carboxílicos [24]. El aumento de polaridad del sistema, facilita la asociación de especies y su agregación, formando estructuras más compleja a través de reacciones de polimerización de las moléculas del ligante asfáltico, transformándose gradualmente los compuestos aromáticos en resinas y posteriormente en asfaltenos, cuya consecuencia es un aumento de la fracción de asfaltenos y una disminución de compuestos aromáticos, explicando el aumento de viscosidad o rigidización que experimenta el material [25]. Finalmente, los anhídridos y ácidos carboxílicos, corresponden a compuestos solubles en agua, por tanto contribuyentes a patologías asociadas al daño por humedad [26] [27].

4.2. Efectos del agua (daño por humedad)

La acción del agua, ya sea en forma líquida o vapor, puede producir el despegue justo en la interfaz entre el ligante y el árido, es decir, un fallo adhesivo. Esto se produce porque el agua penetra entre el ligante asfáltico y la superficie del árido, reemplazando al ligante como revestimiento del árido, tal como se observa en la Figura 8. Sin embargo, existen estudios que señalan que la ruptura de las uniones puede ocurrir en el ligante o mástico asfáltico, es decir, un fallo cohesivo, o bien también, una combinación de ambos fallos [8] [28].

Se pueden señalar varios mecanismos de fallo asociados al efecto de la acción del agua, los cuales pueden ocurrir de forma individual o conjuntamente. Entre ellos están: desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro y abrasión hidráulica.

El desprendimiento ocurre cuando queda una película de agua o polvo en la superficie del árido, aunque el ligante esté recubriéndolo completamente, no existe una adherencia o unión adhesiva entre ambos elementos, pudiéndose desprender fácilmente el ligante del árido.

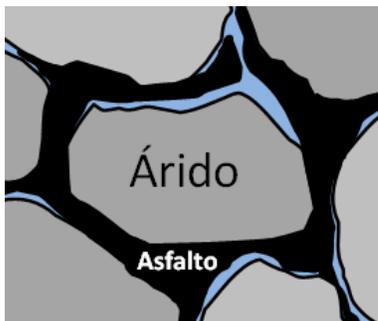


Figura 8: Despegue de película de ligante de la superficie del árido.

El desplazamiento ocurre por una ruptura de la película del ligante cuando el árido está cubierto completamente, o bien producto de un recubrimiento inadecuado. En este caso, una vez que ingresa el agua, el ligante se retrae de la superficie del árido (en mayor o menor grado de acuerdo al grado de acidez del árido), aumentando el ángulo de contacto entre el ligante y el árido, dejando una mayor superficie de contacto de éste último con el agua. En este fenómeno, el envejecimiento actúa como contribuyente, debido a que, tal como se indicó en el apartado anterior, algunos productos de las reacciones de oxidación corresponden a compuestos solubles en agua, los cuales debilitan la película de ligante que cubre los áridos, permitiendo el ingreso del agua a través de microporos debido a la solución de compuestos, o bien a través de microfisuras producto de la fragilización del ligante.

La emulsificación espontánea se produce cuando el ligante se combina con el agua produciéndose una emulsión en la cual el ligante pierde su capacidad adhesiva.

La presión de poro es uno de los mecanismos más importantes en mezclas abiertas o porosas. Ocurre cuando el agua es atrapada en el interior de la mezcla y ésta es compactada por efecto del tráfico, generando presiones internas en el material, que provocan la ruptura de las uniones entre el árido y el ligante.

Por último, la abrasión hidráulica se produce como consecuencia de la acción de las cargas de los neumáticos de los vehículos en zonas donde existen precipitaciones acentuadas. Este es uno de los principales deterioros en pavimentos asfálticos asociados a fallos de las uniones de la matriz árido-ligante.

Los deterioros producidos en los pavimentos asfálticos generalmente son ocasionados, no por un sólo mecanismo de fallo, sino que muchas veces son una combinación de ellos. Sin embargo, algunas patologías están más condicionadas por un tipo de mecanismo de fallo que por otro. En este contexto, se presentan en este apartado algunos de los deterioros más frecuentes en pavimentos asfálticos, producto de fallos ocurridos en las uniones entre el árido y el ligante de las mezclas asfálticas.

Uno de los fallos característicos es el desprendimiento de áridos de la mezcla asfáltica que se observa en la Figura 9. Este deterioro es atribuido, entre otras causas, al fallo de la unión cohesiva o adhesiva de la matriz árido-ligante, producto de la utilización de ligante y áridos con poca afinidad, a la falta de recubrimiento o espesor de ligante, a la utilización de áridos sucios, a la posible presencia de agua durante el extendido de la mezcla.



Figura 9: Desprendimiento de áridos de la mezcla asfáltica. Fuente: [30]

El efecto del envejecimiento del ligante asfáltico produce un aumento del endurecimiento y fragilidad de las uniones de la matriz árido-ligante, por tanto, la mezcla asfáltica es más rígida y susceptible a fallos por fisuración [31]. Entre los fallos por fisuración más frecuentes asociados a este fenómeno se encuentran la fisuración en bloque, la fisuración transversal y la fisuración por fatiga. Los dos primeros fallos son causados principalmente por las tensiones generadas debido a gradientes térmicos, especialmente en mezclas asfálticas con módulos de rigidez muy altos, en las cuales se provocan retracciones superficiales. La fisuración por fatiga, ocurre con mayor frecuencia en las zonas del pavimento que recibe la mayor parte de las sollicitaciones del tráfico. Este fallo se caracteriza por estar formado de muchos trozos de pavimento de ángulos agudos, que en etapas avanzadas de deterioro forman un patrón geométrico parecido a una “malla de gallinero” o “piel de cocodrilo”, Figura 10.

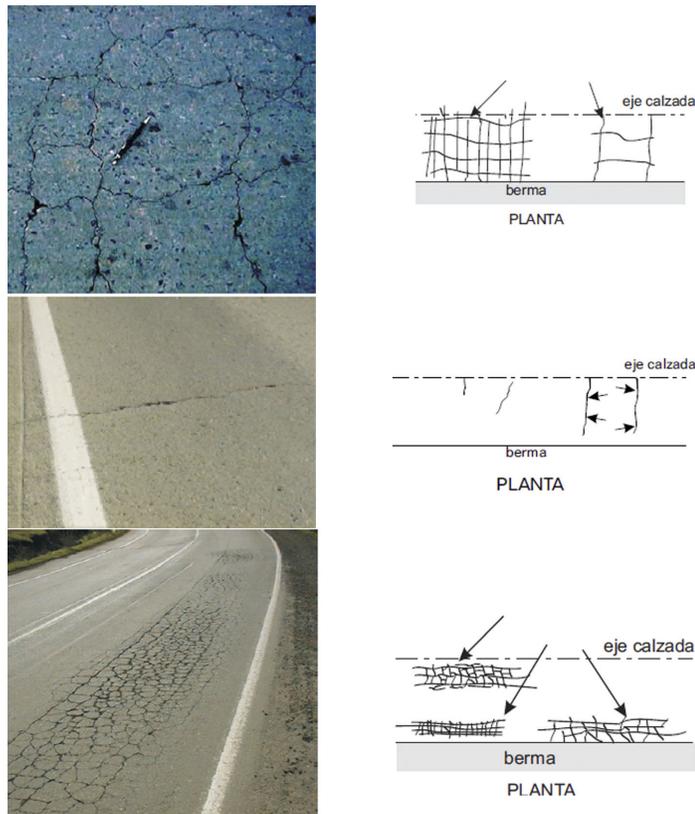


Figura 10: Fisuración de bloque, transversal y de fatiga. Fuente: [32]

Por último, uno de los principales daños de las mezclas asfálticas in situ ocurre cuando se separa el ligante asfáltico del árido debido a la presencia de agua. Este fenómeno se identifica con el nombre de stripping (Figura 11) y puede ocurrir por uno o más mecanismos de fallo asociados a la acción del agua descritos en el apartado anterior. Sin embargo, este deterioro puede acelerarse dependiendo de la interacción química en la unión adhesiva for-

mada en la matriz árido-ligante. En la práctica, si los áridos están completamente secos, se dejan envolver fácilmente por el ligante, en cambio, si los áridos están húmedos, presentan una cierta polaridad cuyo signo depende de si son ácidos con superficies que tienden a ser de carga negativa (-), o básicos con superficies que tienden a estar cargadas positivamente (+). Es decir, los áridos ácidos, que se caracterizan por tener un mayor contenido de sílice, presentan peor adhesividad con los ligantes asfálticos, en relación a aquellos más básicos [33]. Otro factor acelerante de este tipo de patología sería el envejecimiento del ligante debido a la aparición de microporos o microfisuras en la película de ligante que cubre los áridos, permitiendo el ingreso del agua en la interfaz árido-ligante, tal como se explicó anteriormente.

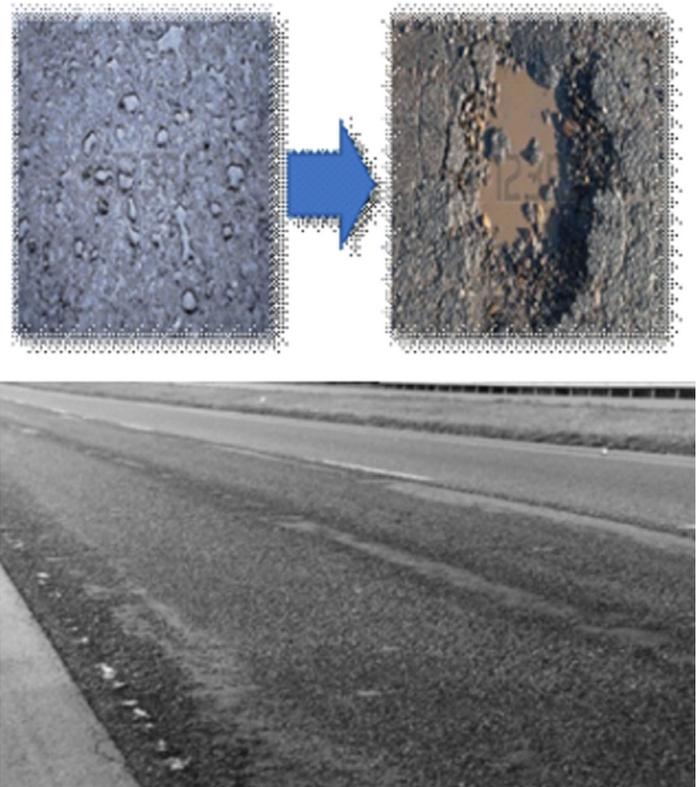


Figura 11: Desprendimiento de los áridos por efecto del agua. Fuente: [34]

6. Conclusiones

Este artículo entrega una revisión, en un lenguaje sencillo, pero manteniendo un cierto rigor técnico, de los principales factores que afectan al comportamiento de las uniones de la matriz árido-ligante de las mezclas asfálticas, que incluyen los conceptos de adhesión y cohesión, las teorías de adhesión, factores internos y externos, junto con los principales deterioros asociados a los mecanismos de fallo. Basados en esta revisión se puede concluir lo siguiente:

Existen variadas teorías que tratan de explicar el comportamiento de las uniones en la matriz árido-ligante. Sin embargo, ninguno de estos efectos, por si solos, puede explicar los deterioros que se presentan en las mezclas asfálticas.

Los fallos adhesivos, cohesivos y mixtos están influenciados por factores internos y externos. Los factores internos dependen de las propiedades de los materiales: árido y ligante, de su diseño y composición en la mezcla asfáltica, y de la interacción química entre ellos. Los factores externos son de origen medioambiental que influyen en el grado de envejecimiento del ligante asfáltico, y que se traduce en uniones más frágiles y susceptibles de rotura, y en el despegue por efecto del daño por humedad.

El fenómeno del envejecimiento afecta el desempeño de las uniones árido-ligante en forma generalizada. Por una parte, contribuye a fragilizar el ligante aumentando el potencial de agrietamiento en cualquiera de sus formas. Por otra parte, debido a la generación de compuestos solubles en agua, producto de las reacciones de oxidación, se generan zonas de fallo a través de microporos o microfisuras por las cuales ingresa el agua a la interfaz árido-ligante aumentando la propensión al daño por humedad.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen al programa CONICYT en el marco del proyecto de investigación FONDECYT de Iniciación N°11130723: ASPHALT BINDERS IN AGGREGATE-BINDER MATRIX "AN ADHESION EVALUATION ACCORDING TO THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE AGGREGATE USED".

8. Referencias

- [1] Asphalt-Institute, The Asphalt Handbook, USA: Asphalt Institute Manual Series N°4, 2007.
- [2] H. De Solminihaç, Gestión de Infraestructura Vial, Santiago: Universidad Católica de Chile, 2001.
- [3] T. Scholz, Durability of Bituminous Paving Mixtures, Nottingham: University of Nottingham, 1995.
- [4] F. Jakarni, Adhesion of Asphalt Mixtures, United Kingdom: University of Nottingham, 2012.
- [5] ASTM-D907-96a, Standard Terminology of Adhesives, West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2000.
- [6] J. Israelachvili, Intermolecular and Surfaces forces - Third Edition., Elsevier, 2011.
- [7] K. Kanitpong y H. Bahía, «Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA,» Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, pp. 611-642, 2003.
- [8] R. Moraes, R. Velasquez y H. Bahia, «Measuring Effect of Moisture on Asphalt-Aggregate Bond With The Bitumen Bond Strength Test,» de Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, 2011.
- [9] R. Terrel y S. Al-Swailmi, «Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: Test selection:Strategic Highway Research Program-Report A403.,» Oregon State University, Oregon, 1994.
- [10] E. Masad, D. Little, L. Tashman, S. Saadeh, T. Al-Rousan y R. Sukhwani, «Evaluation of aggregate characteristics affecting HMA concrete performance. Report N° ICAR 203-1,» Texas Transportation Institute, Texas, 2003.
- [11] FHWA, «Aggregate Imaging Measurement System (AIMS),» 2014.
- [12] C. Curtis, K. Ensley y J. Epps, «Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption. SHRP-A-341.,» Strategic Highway Research Program, Washington, 1993.
- [13] J. Read y D. Whiteoack, The Shell Bitumen Handbook. Fifth Edition., UK, 2003.

- [14] Asphalt-Institute, The Asphalt Binder Handbook, USA: Asphalt Institute, 2011.
- [15] P. Morgan y A. Mulder, The Shell Bitumen Industrial Handbook, UK, 1995.
- [16] G. Valdés, A. Calabi, R. Miró y R. Osses, «Caracterización funcional de la cohesión de los cementos asfálticos utilizados en Chile mediante el procedimiento UCL,» de XVII Congreso Ibero Latinoamericano el Asfalto, Guatemala, 2013.
- [17] G. Malan, P. Straus y F. Hugo, «A Field Study of Premature Surface Cracking in Asphalt,» Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 58, pp. 142-162, 1989.
- [18] P. Kandhal y S. Chakraborty, «Evaluation of Voids in The Mineral Aggregates. NCAT Report Nº 96-4.,» National Center for Asphalt Technology, USA, 1996.
- [19] B. Sengoz y E. Agar, «Effect of Asphalt Film Thickness on the Moisture Sensitivity Characteristics of Hot-Mix Asphalt,» Build- ing and Environment, p. 3621–3628, 2007.
- [20] H. D. Bianchetto y A. I. Asurmendi, «Influencia de la temperatura de fabricación y del contenido de cal en el envejecimiento de mezclas bituminosas: un caso real.,» NOVAFIR/1, Ingeniería de pavimentos., pp. 32-33, 2012.
- [21] R. Robertson, Chemical properties of asphalts and their relationship to pavement performance, Strategic Highway Research Program-National Research Council, 1991.
- [22] C. Ouyang, S. Wang, Y. Zhang y Y. Zhang, «Improving the aging resistance of asphalt by addition of Zinc dialkydithiophosphate,» Fuel, vol. 85, pp. 1060-1066, 2006.
- [23] J. C. Petersen, «Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability,» Asphaltenes and Asphalts, 2, pp. 363-399, 2000.
- [24] A. Calabi-Floody y G. Thenoux, «Controlling asphalt aging by inclusion of byproducts from red wine industry,» Construction and Building Materials, vol. 28, pp. 616-623, 2012.
- [25] X. Lu y U. Isacson, «Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology,» Construction and Building Materials 16, pp. 15-22, 2002.
- [26] S. Bishara, R. Robertson y D. Mahoney, «Lignin as an antioxidant: a limited study on asphalt frequently used on Kansas roads,» de Transportation Research Board, Washington DC, 2006.
- [27] T. Mill, D. Tse, C. Loo, D. Yao y E. Canavesi, «Oxidation pathways of asphalt,» Fuel Chem., vol. 37, nº 3, pp. 1367-1375, 1992.
- [28] G. Valdés, R. Miró, A. Martínez y A. Calabi, «Effect of the physical properties of aggregates on aggregates-asphalt bond measured using the UCL method,» Construction and Building Materials, pp. 399-406, 2014.
- [29] J. P. Aguiar Moya, «CARACTERIZACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS,» Boletín técnico, pp. 1-2, 2014.
- [30] «Ingeniería Civil en El Salvador,» [En línea]. Available: <http://ingenieriasalva.blogspot.com/2009/03/deterioros-de-pavimentos-flexibles.html>. [Último acceso: 24 abril 2015].
- [31] G. Valdés, F. Pérez y A. Calabi, «La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro,» Revista Ingeniería de Obras Civiles- RIOC, vol. 1, pp. 28-30, 2012.
- [32] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras, Volumen 7, Santiago: Ministerio de Obras Públicas, 2015.
- [33] G. Botasso, O. Rebollo, C. Soengas, M. Balige, A. Bisio y A. Berardo, «Metodología para la Evaluación de Promotores de Adherencia en Cementos Asfálticos,» de XVI CILA- Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Río de Janeiro, 2011.
- [34] FHWA, Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program, Publication Nº FHWA-RD-03-031, USA: Federal Highway Administration, 2003.