

CAPITULO 3

VALORACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO NORMA UNE-EN 12697-22. PROCEDIMIENTO B:

1. INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir adecuadamente las cargas debidas al tránsito a la subrasante natural que lo soportan (Davis R., 1988)

Se define como mezcla bituminosa en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura más elevada que la ambiente (superior a los 130 °C) (PG3. Pliego De Especificaciones Técnicas Del Ministerio De Fomento De España, 2001).

Se deben considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de un camino (Botasso et al, 2002):

- La función resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas a emplear en la construcción.
- La función superficial, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del camino para que resulten seguras y confortables.

Como material estructural se puede caracterizar de varias formas; así por ejemplo la evaluación de parte de sus propiedades como cohesión, adherencia, estabilidad, deformación, comportamiento modular y comportamiento frente a acciones dinámicas tales como las deformaciones plásticas permanentes.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores (temperatura y duración de la carga), lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material (Asphalt Institute, 1997).

Las cualidades funcionales del camino residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción, dependen aspectos inherentes a los usuarios como (Padilla Rodríguez A., 2002):

- La adherencia del neumático a la calzada.
- Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- El desgaste de los neumáticos.
- El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- La comodidad y estabilidad en marcha.
- Las cargas dinámicas del tránsito.
- La resistencia a la rodadura (consumo de combustible).
- El envejecimiento de los vehículos.
- Las propiedades ópticas.

2. CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas (PG3. Pliego De Especificaciones Técnicas Del Ministerio De Fomento De España, 2001):

Por fracciones de agregado pétreo empleado

- Mastic asfáltico: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más mastic.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

Por la temperatura de puesta en obra

- Mezclas asfálticas en caliente: Se fabrican con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 °C, según la viscosidad del ligante; se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún, compactarse adecuadamente.
- Mezclas asfálticas en frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas semi-cerradas o semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.

VALORACION DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA
MODIFICANDO EL TIPO FILLER Y ASFALTO

- Mezclas porosas o drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

Por el tamaño máximo del agregado pétreo

- Mezclas gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas finas: También llamadas microaglomerados, lechadas, tratamientos superficiales, etc. Se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino, incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo o incluso su tamaño máximo como el tratamiento superficial.

Por la estructura del agregado pétreo

- Mezclas con esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente; su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados, es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe al mastic.
- Mezclas sin esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente; la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión del mastic. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

Por la granulometría

- Mezclas continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- Mezclas discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico. Generalmente con falta de una fracción entre los tamices N° 4 y 8 de ASTM.

En muchas ocasiones, el proyecto de una mezcla asfáltica se reduce a determinar su contenido de ligante; sin embargo, ésta es sólo la última fase de un proceso más amplio, que requiere de un estudio cuidadoso de todos los factores involucrados, a fin de garantizar un comportamiento adecuado de la mezcla y un considerable ahorro económico en la solución (Estudio De Las Mejoras Mecánicas De Mezclas Asfálticas Con Desechos De Llantas, 2002), como ya se ha venido diciendo.

Las fases de las que consta el proyecto de una mezcla son las siguientes:

- Análisis de las condiciones en las que va a trabajar la mezcla: tránsito, tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, etc.), la capa de la que se trata (rodadura, intermedia o base) y espesor, naturaleza de

VALORACION DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA
MODIFICANDO EL TIPO FILLER Y ASFALTO

las capas subyacentes, intensidad del tráfico pesado, clima, etc. Asimismo, hay que distinguir si se trata de un pavimento nuevo o de una rehabilitación (Fernández Del Campo J.A., 2001).

- Determinación de las propiedades fundamentales que ha de tener la mezcla, dadas las condiciones en las que ha de trabajar. Debe establecerse la resistencia a las deformaciones plásticas o la flexibilidad, rigidez, adherencia, cohesión y susceptibilidad térmica, en la etapa de diseño.
- Variables de desempeño en obra, tales como macro y micro textura, factor de calidad, regularidad de las juntas, perfil transversal, entre otras.
- Elección del tipo de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados, incorporando en este análisis las consideraciones económicas o de puesta en obra que haya que considerar.
- Materiales disponibles y elección de los agregados pétreos, los cuales deben cumplir con determinadas especificaciones, pero que en general serán los disponibles en un radio limitado y, por lo tanto, a un costo razonable. Asimismo, hay que elegir el polvo mineral de aportación y su relación con la cantidad de ligante asfáltico. En el caso particular de las dos aplicaciones de este proyecto se tendrá por un lado la utilización de áridos de la provincia de Mendoza y de la provincia de Buenos Aires. De este último origen se ocupa el presente trabajo.
- Tipo de filler ha utilizar.
- Elección del tipo de ligante (asfalto convencional, asfalto modificado, emulsión asfáltica); el costo es siempre un factor muy relevante. Esto será de acuerdo al tipo de mezcla, tipo de tránsito, clima.
- Dosificación o determinación del contenido óptimo de ligante según un proceso que debe adaptarse al tipo de mezcla, la cual debe hacerse para distintas combinaciones de las fracciones disponibles del agregado pétreo, de manera que las granulometrías conjuntas analizadas estén dentro de un huso previamente seleccionado.
- Otros factores a tener en cuenta en el diseño y selección de una mezcla asfáltica son los siguientes: exigencias de seguridad vial, estructura del camino, técnicas de diseño y ejecución, sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, periodo de lluvias, trazado de la vía, entre otros), condiciones de drenaje, consideraciones económicas (Magalhães Pinheiro Jorge Enrique, 2004).

3. FENOMENOS DE SUPERFICIE

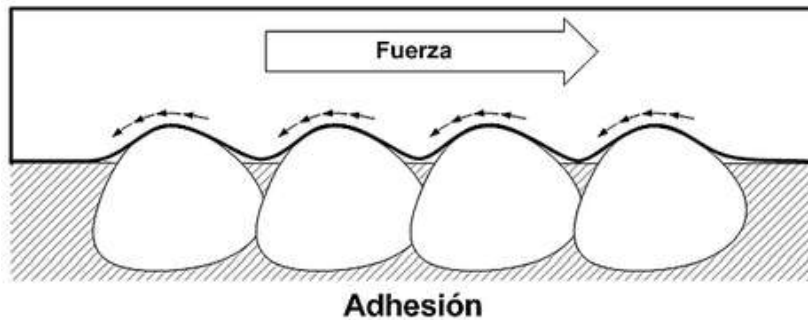
Si bien en este capítulo se desarrollarán las condiciones de diseño de la mezcla densa seleccionada a las deformaciones plásticas permanentes, conviene señalar que las mezclas deben además cumplir, en el campo, con condiciones exigibles de regularidad superficial. Uno de las condiciones exigidas es la adherencia neumático calzada.

Mecanismos físicos de la adherencia neumáticos

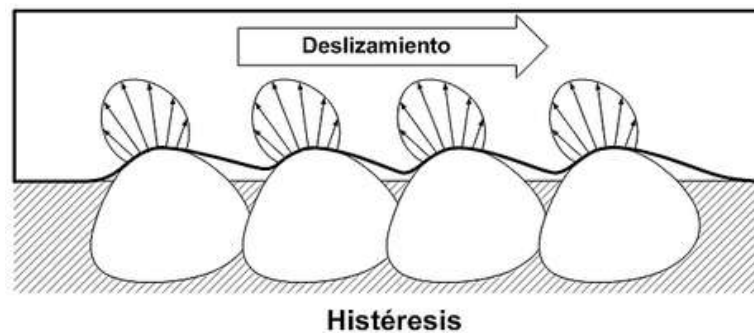
VALORACION DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA
MODIFICANDO EL TIPO FILLER Y ASFALTO

Los principales mecanismos físicos por los que un neumático proporciona su capacidad de adherencia con el suelo son dos: adhesión e histéresis. Ambos son descritos a continuación para el caso de una pieza cualquiera de caucho apoyada sobre una superficie rugosa.

Por adhesión se denomina al fenómeno por el que los átomos de dos cuerpos en contacto, sean rígidos o no, desarrollan una pequeña fuerza electromagnética de atracción mutua. La resistencia a la rotura de estas fuerzas provoca la aparición de otras paralelas a la superficie de contacto, que se opondrán a cualquier movimiento relativo entre los dos cuerpos (Mecanismos Físicos De La Adherencia, 2007).



El segundo mecanismo por el que el neumático desarrolla su adherencia y que diferencia el caucho de otros muchos materiales, es la histéresis. El fenómeno de histéresis está presente en el caucho por su comportamiento visco-elástico. El deslizamiento de una pieza de este material sobre una irregularidad en la superficie de contacto provoca una deformación. Cuando esta irregularidad se ha superado, el caucho tiende a recuperar su forma original y su contacto con la superficie pero, debido a la histéresis, no de manera inmediata (Botasso et al, 2002).



Este desfase entre causa (presión o tensión aplicada) y efecto (deformación) hace que el neumático apoyado sobre una superficie rugosa como es el asfalto «abra» las irregularidades de manera asimétrica, más por delante de esa rugosidad que por detrás, en el sentido de la marcha. Esto genera una distribución de presiones orientada en sentido contrario al deslizamiento, lo que contribuye a la fuerza de fricción total.

A este fenómeno se debe que un neumático «blando» tenga mejor agarre que uno «duro», y que la mayor tracción se obtenga cuando la rueda está sufriendo un cierto deslizamiento.

El área de la superficie de contacto entre un neumático y el suelo queda definida en gran medida por la presión de inflado y el peso que recae sobre él, y no es por lo tanto responsable de la mayor adherencia que un neumático ancho puede proporcionar.

Sin embargo, cuanto mayor es la anchura de un neumático más ancha y corta es la huella. Como se verá al describir la resistencia a la rodadura, esto reduce la magnitud de la deformación que sufre el neumático en su contacto con el asfalto, lo que redundará en una distribución de presiones más homogénea y por tanto más propicia para desarrollar una mayor adherencia.

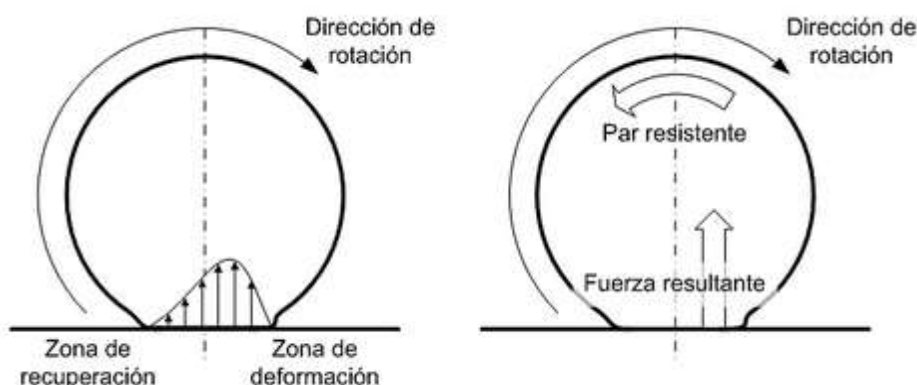
Esta menor deformación permite además el empleo de compuestos más blandos en neumáticos anchos. El grado de histéresis aceptable está limitado en última instancia por la generación de calor asociada a la deformación cíclica del caucho, que puede degradar las prestaciones del neumático y en última instancia, destruirlo. La disminución en la generación de calor debida a las menores deformaciones que sufre un neumático ancho, permite el empleo de compuestos más blandos, que proporcionen una mayor adherencia.

Sobre asfalto seco, un neumático de turismo tiene un coeficiente de rozamiento en torno a 0,8 - 1,0. Es decir, puede desarrollar una fuerza (lateral, longitudinal o combinada) ente el 80 y el 100 por ciento del peso que recae sobre él. Un neumático de competición puede fácilmente duplicar estos valores (Panorámica Actual De Las Mezclas Bituminosas, 2001).

Histéresis y resistencia a la rodadura

Una consecuencia negativa de la histéresis de un neumático, es la resistencia a la rodadura.

Al girar, sucesivas secciones del neumático son deformadas al entrar en contacto con el suelo pero no recuperan de forma inmediata su forma original, a consecuencia de la visco-elasticidad del caucho (Mecanismos Físicos De La Adherencia, 2007).



Funcionamiento en rotación

Este retardo provoca que buena parte de la energía empleada en su deformación no sea recuperada al volver a su forma original. Esto se traduce en una distribución de presiones desigual en la huella, más intensas en su parte delantera.

Esta distribución de presiones puede ser resumida en una única fuerza resultante, que a efectos de análisis dinámico cause el mismo efecto sobre la rueda. Dicha fuerza tendrá una dirección vertical, y su punto de aplicación estará ligeramente desplazado por delante del eje vertical del neumático.

Como toda fuerza cuya dirección de aplicación no pase por el centro de rotación de un objeto, imprimirá al mismo un momento angular o par. En el caso del neumático, este par se opondrá a su rodadura, y deberá ser vencido por la energía proveniente del motor, incrementando por tanto el consumo de combustible y reduciendo la velocidad máxima (Cooper K. E. et al, 1985).

La resistencia a la rodadura crece con la velocidad, pero de manera reducida siempre que no se sobrepase aquella para la que el neumático ha sido diseñado. En tales circunstancias se puede cuantificar entre el 1,0 por ciento y 1,5 por ciento del peso que recae sobre ella. A velocidades reducidas, como las alcanzadas en tránsito urbano, su valor es netamente superior a la resistencia aerodinámica, que crece con el cuadrado de la velocidad. A las velocidades desarrolladas en carretera, la resistencia aerodinámica es el factor dominante de la resistencia al avance.

La resistencia a la rodadura de un neumático no es propiamente una fricción. Una fuerza de fricción tiene dirección paralela a la superficie de contacto entre dos objetos; en el caso que se considera, paralela al camino. Por el contrario, la distribución de fuerzas responsable de la resistencia a la rodadura, tienen una dirección normal al asfalto.

La histéresis tiene, por tanto, un efecto provechoso, la adherencia con el asfalto y uno negativo, la resistencia a la rodadura. En los denominados neumáticos ecológicos se emplean compuestos con una limitada histéresis, lo que reduce su resistencia a la rodadura pero, como contrapartida, también su adherencia (Carrasco, Orlando, 2001).

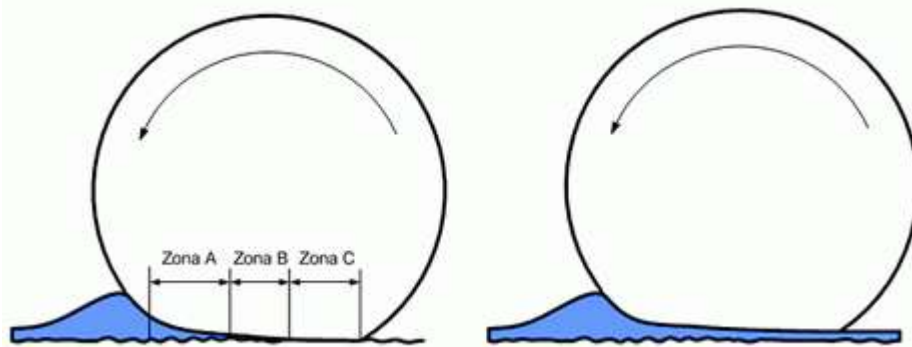
Histéresis y adherencia sobre pavimento mojado

Cuando un neumático rueda sobre pavimento seco, el contacto entre la banda de rodadura y el pavimento se produce en toda la superficie de la huella. Cuando lo hace sobre asfalto lo suficientemente mojado como para que exista una película de agua sobre él, es necesario que los canales tallados sobre el neumático evacúen el agua hacia los laterales. Pero esto no es un proceso instantáneo ni que se produzca de manera homogénea a lo largo de la huella. Es posible distinguir así tres distintas zonas, caracterizadas por la cantidad de agua que se ha logrado evacuar (Mecanismos Físicos De La Adherencia, 2007):

- La primera de ellas (zona A) se encuentra en el frontal de la huella, donde el neumático acaba de entrar en contacto con la película de agua y por tanto el volumen de agua evacuado es muy reducido. El espesor es todavía lo suficientemente grande como para que no se produzca

contacto alguno entre la rueda y el asfalto, por lo que la adherencia proporcionada por esta zona es prácticamente nula.

- En la zona B el espesor de la película de agua se ha reducido lo suficiente como para que se inicie un leve contacto entre las irregularidades más prominentes del asfalto y la superficie de la banda de rodadura. Se empieza a generar fricción, pero muy lejos de los valores que proporcionaría un contacto sobre asfalto seco.
- Finalmente, si la capacidad de evacuación de agua es suficiente, en la zona C de la huella se logrará un contacto franco, proporcionando un agarre cercano al que se daría sobre asfalto seco.



Zonas entre neumático pavimento mojado

La consecuencia de todo esto es que el área sobre la que efectivamente se genera adherencia es mucho más reducida en mojado que en seco, por lo que el agarre es más reducido. Únicamente en la parte trasera de la huella participan los dos mecanismos principales de generación de fricción (adhesión e histéresis). En la región intermedia apenas hay contacto directo entre superficies, por lo que sólo la histéresis puede proporcionar algo de adherencia.

Un neumático «blando», con una elevada histéresis, presenta por tanto ventajas también en el agarre sobre suelo mojado. Además, por causa del agua, hay un coeficiente de fricción menor y una mayor refrigeración; es decir un neumático hecho para agua tolera un grado de histéresis muy alto sin que el calor generado suponga un problema.

Un neumático de calle tiene que proporcionar un resultado satisfactorio en situaciones muy variadas, por lo que el margen de maniobra es escaso. En competiciones en las que las ruedas pueden ser sustituidas si las condiciones climatológicas cambian, los neumáticos de lluvia pueden presentar grados de histéresis tan elevados que serían destruidos en pocas vueltas si fueran empleados a ritmo de carrera sobre pavimento seco.

La proporción de huella ocupada por cada una de las tres regiones descritas depende de factores como el espesor de la película de agua presente en la calzada, la forma y profundidad de dibujo de la banda de rodadura, la presión de inflado y la velocidad a la que se circule.

A mayor velocidad, menor es el tiempo disponible para acelerar y desplazar el agua hacia los laterales y, por tanto, mayor la superficie que «flota» sobre el agua y menor la que efectivamente proporciona agarre. Si la velocidad es excesiva y el neumático es incapaz de evacuar la suficiente cantidad de agua como para que se llegue a producir contacto con el suelo, toda la huella se encontrará cubierta por una película de agua, y el neumático ofrecerá una direccionalidad y capacidad de tracción prácticamente nula. Es lo que se conoce como «aquaplaning».

A mayor anchura del neumático, mayor será su tendencia a sufrir aquaplaning. Al ser la huella más ancha, la distancia que debe recorrer el agua hasta ser expulsada por los laterales también es mayor. Además, esta mayor distancia debe ser recorrida en menor tiempo, puesto que la huella también es más corta.

Una característica que hace al aquaplaning especialmente peligroso, es lo difícil que es para el conductor apercibirse de su inminencia a través del volante. La pérdida de adherencia lateral sobre asfalto seco se percibe por un progresivo incremento en la ligereza de la dirección, fruto de la pérdida de la tendencia autocentrante del neumático. Por el contrario, la pérdida de firmeza en la dirección provocada por aquaplaning se produce repentinamente, cuando las ruedas ya han perdido completamente el contacto con el suelo (Friedenthal, Esteban, 2004).

Características de la mezcla

Las mezclas que mejor performance desarrollan a nivel de superficie generando texturas ásperas y rugosas, son mezclas que en general serán de espesor menor a 3 cm. Las texturas deseables se denominan (Botasso et al, 2002):

Macrotextura: dada por la longitud de onda del tamaño del agregado grueso, es la que permite la evacuación del agua, como se comentó con anterioridad.

Microtextura: dada por la aspereza del mastic asfáltico conformado por el ligante, los finos y filler de la mezcla.

Ambas en nivel adecuado, permiten disminuir las distancias de frenado, con pavimento mojado.

La macrotextura se puede medir en forma puntual con un ensayo denominado parche de arena (Norma IRAM 1555).

La microtextura se puede medir en forma puntual con un ensayo denominado péndulo inglés TRRL (Norma IRAM 1850).

Como puede observarse en el diseño de las mezclas asfálticas se incorporan como parámetros de diseño determinaciones realizadas “in situ”, trascendiendo el diseño de laboratorio en forma estricta.

En la experiencia del actual trabajo la capa de mezcla diseñada, no tiene como objeto dar valores de macro y micro textura sino de dar resistencia estructural modular y a las deformaciones plásticas permanentes, ya que es una mezcla densa para espesores superiores a los 5 cm.

4. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS ASFÁLTICAS

Dentro de los aspectos centrales en el proceso de diseño de la mezcla densa tipo CAC D19 del presente trabajo, se encuentra valorar su resistencia a las deformaciones plásticas permanentes a modo de contar con una valoración de la respuesta de la mezcla frente a cargas pesadas y temperaturas superiores a los 45 °C.

Deformación plástica en una mezcla asfáltica

Se puede decir que las deformaciones plásticas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, debido a su incidencia preponderante en el camino, y su alta intervención como factor generador de accidentes (Padilla Rodríguez A., 2002).

La acumulación de deformaciones plásticas en una capa de concreto asfáltico, pueden ser causadas por una reducción volumétrica del material que compone la mezcla asfáltica y por las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes que transmiten las cargas del tránsito.

La deformación plástica permanente se caracteriza por una sección transversal del pavimento que no se encuentra en la posición original de diseño; se llama permanente porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga. Existen dos tipos principales (Garnica Anguas P. et al, 2004):

por fallas en la subrasante por fallas en la capa de la mezcla asfáltica

Es importante entonces diseñar mezclas que resistan las deformaciones plásticas.

En este tipo de fallas, es central el diseño de las mezclas asfálticas que resistan las acciones dinámicas del tránsito. Resultan relevantes las condiciones ambientales, tales como humedad y temperatura, y cobra especial importancia la intensidad del tránsito y la frecuencia del mismo. Las cargas pesadas y lentas serán en general las que mayor incidencia posean en las deformaciones plásticas, al elevarse el tiempo de permanencia de la carga.



Ahuellamiento

Formación del ahuellamiento en una mezcla asfáltica

Se puede decir que los mecanismos principales de formación de huellas en el área de solicitación son los siguientes:

- Compactación del tránsito. En esta fase inicial, la compactación debida al tránsito tiene una mayor influencia en las deformaciones.
- Luego, el volumen que disminuye por debajo de las llantas, es aproximadamente igual al volumen que se incrementa por los bordes en la parte superior del pavimento. Esto es un indicador de que mayormente la compactación se lleva a cabo bajo las solicitaciones del tránsito, y que las huellas son causadas primordialmente por desplazamiento con volumen constante. Esta fase se consideró en gran parte para representar el comportamiento de la deformación en el tiempo de vida del pavimento.

La deformación a través de las capas de concreto asfáltico es mayor cerca de la superficie donde se aplican las cargas y gradualmente decrece en las capas de niveles inferiores. El flujo plástico se reduce con la profundidad (Hofstra et al, 1972).

Principales factores a considerar

Los principales factores que hacen sensible a una mezcla al ahuellamiento son (Brown S. F. et al, 1979):

- Granulometría de los áridos.
- Forma, tamaño y textura de los áridos.
- Contenido de polvo mineral en la mezcla.
- Tipo y cantidad de ligante asfáltico.
- Contenido de vacíos en el agregado mineral y contenido de vacíos en la mezcla asfáltica.
- Cargas por eje equivalente de los vehículos y presión de contacto de los neumáticos con el pavimento, y frecuencia.
- Las condiciones ambientales.

Granulometría de los áridos

Las mezclas de granulometrías densas son de mejor prestación ya que mitigan la aparición de huellas. Cuando las mezclas asfálticas densas o de granulometrías continuas, se compactan adecuadamente con buenos equipos

VALORACION DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA
MODIFICANDO EL TIPO FILLER Y ASFALTO

y a temperatura adecuada, se logran mezclas con menor porcentaje de vacíos y con mayores puntos de contacto entre las partículas, que las mezclas de granulometría abierta.

Las mezclas abiertas o de granulometría discontinua, presentan una mayor susceptibilidad a las deformaciones plásticas y son aún más vulnerables a las deformaciones plásticas a temperaturas altas que las mezclas densas o elaboradas con granulometrías continuas (Brown et al, 1974).

Forma, tamaño y textura de los áridos

En climas cálidos, donde las deformaciones permanentes son más factibles de aparecer, la textura de la superficie del agregado desarrolla un rol de significación. Tanto la textura como la forma del agregado, son valores que traban la mezcla, producen una mayor fricción interna y el rozamiento final hace que disminuya el riesgo a generar deformación permanente.

En este estudio el efecto de la trituración en la textura superficial no fue definido, debido a que es muy difícil separar los efectos de la textura superficial y los de la forma, debido a las caras de fractura.

De esta forma se puede decir que las experiencias realizadas han notado el mejor comportamiento de las mezclas con áridos triturados que con naturales, y que a medida que la fracción natural aumenta, se incrementa el riesgo a la deformación permanente. El empleo de áridos de mayor angularidad y el aumento de la fracción triturada, obliga al diseño de mezclas más trabadas, a modificar los trenes de compactación contribuyendo el esqueleto mineral a la componente elástica del material; su forma y textura influyen en las propiedades elásticas de las mezclas asfálticas, así como la compactación, ya que un esqueleto mineral bien compactado tiene un mayor comportamiento elástico (Uge et al, 1974).

Contenido de polvo mineral en la mezcla.

El polvo mineral junto con el ligante forman el mastic asfáltico. La calidad de éste tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica. Los factores que intervienen para conseguir un buen mastic son diversos:

- a) La relación polvo mineral/asfalto de manera que cuanto más alta es esta relación, más elevada es la viscosidad de masa y más rígida es la mezcla.
- b) La finura del polvo mineral y su afinidad por el agua.

Es importante comprobar la insensibilidad al agua de los polvos minerales ya que estos ponen en riesgo la estabilidad de la mezcla. El Test de Lottman modificado y la estabilidad remanente del ensayo Marshall ponen en evidencia los riesgos.

El riesgo de sensibilidad al agua del mortero de la mezcla, puede deberse no solamente a la naturaleza del polvo mineral sino también a ciertas composiciones químicas de algunos asfaltos.

El polvo mineral tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas por su elevada superficie específica, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de la mezcla.

El polvo mineral o filler forma parte del esqueleto mineral y por lo tanto soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas; además cumple con las siguientes funciones (Padilla Rodríguez A., 2002):

- Rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos; por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto. Sustituye parte del asfalto o betún que de otra manera sería necesario para conseguir unos huecos en mezcla suficientemente bajos.
- Proporciona puntos de contacto entre agregados de mayor tamaño y los encaja limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto.
- Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los áridos más gruesos.
- Hace la mezcla más trabajable al envolver los áridos gruesos y evitar su segregación.

Tipo y cantidad de ligante asfáltico. Modificación del asfalto.

Los ligantes asfálticos necesariamente deben ser de mayor viscosidad a efectos de aumentar la resistencia a las deformaciones plásticas.

El uso de cualquier tipo de modificador mejora el comportamiento frente a las sollicitaciones pesadas y lentas, combinadas con elevadas temperaturas. Se debe recordar que se produce una tensión con el concepto de rigidez.

La componente elástica del ligante asfáltico contribuye a aumentar el comportamiento elástico de la mezcla; de igual forma, el ligante influye decisivamente en la componente viscosa y su mayor presencia dentro de la mezcla hace que aumente esta componente (Corté et al, 1994).

En cuanto a la cantidad de ligante asfáltico, se puede diseñar en forma preliminar con el ensayo Marshall, para luego hacer las comprobaciones con ensayos dinámicos. Los elevados contenidos de asfalto producen mezclas de bajos vacíos y como consecuencia un incremento potencial en la susceptibilidad a la deformación plástica de la mezcla (Mahboub, et al, 1988).

En general se ha observado una mejora en las mezclas con ligantes modificados frente a estados de sollicitaciones dinámicas como la del tránsito. Los modificadores pueden ser utilizados para incrementar la rigidez de las mezclas asfálticas a temperaturas crítica, reduciendo la susceptibilidad ante la formación de huellas (Monismith et al., 1994).

Contenido de vacíos en el agregado mineral y contenido de vacíos en la mezcla asfáltica

La buena resistencia a la deformación plástica de las mezclas requieren bajo contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM) y la granulometría deseada para mínimos contenidos de VAM puede ser determinada usando ensayos a agregados secos. Sin embargo se debe tener precaución que la mezcla contenga el mínimo nivel de vacíos teóricos en el agregado mineral. Puede ser deseable que hubiera suficientes vacíos en el agregado mineral con el fin de asegurar que la cantidad de ligante asfáltico sea satisfactoria (Cooper, et al, 1985).

Se ha encontrado que los desplazamientos relativos de las partículas minerales ocurren cuando la mezcla asfáltica es manejada a altas temperaturas (durante la extensión y compactación de la mezcla) o a moderada temperatura, pero

también bajo cargas prolongadas sucede de la misma forma (Uge y Van de Loo, 1974).

En general, se puede decir que un incremento en el contenido de vacíos en la mezcla provoca una baja en la resistencia de la misma a la deformación plástica. Por lo que por durabilidad y por plasticidad resulta conveniente ser muy cuidadosos en el control de vacíos de la mezcla en obra.

Por último, las mezclas con bajo contenido de vacíos se comportaron mejor que las mezclas con altos contenidos de vacíos.

El grado de compactación es uno de los principales parámetros de calidad de las mezclas en el lugar, especialmente para diseños críticos con bajos contenidos de ligante para favorecer la resistencia al ahuellamiento. Es por eso que los cuidados en la colocación deben extremarse pues un buen diseño puede fracasar en el proceso de colocación. Se tiene que mencionar que la compactación en laboratorio también es un factor crítico en la preparación de muestras. Se debe tratar de simular y reproducir, en la medida de lo posible, la compactación que se llevará a cabo en campo en condiciones reales.

En los casos del diseño de mezclas, se deben incluir requisitos sobre los porcentajes mínimos y máximos aceptables referentes al contenido de vacíos tanto en la mezcla como en el agregado mineral para poder garantizar un funcionamiento adecuado del pavimento durante el periodo de servicio (Padilla Rodríguez A., 2002).

Los bajos contenidos de vacíos, por debajo del 3 %, generan también riesgos de aparición de deformaciones plásticas en las mezclas. Esto es debido fundamentalmente a que resultará excesiva generalmente la relación betún vacíos, por lo que frente al potencial riesgo de escurrimiento interno del ligante el mismo no tiene donde migrar y por ende lubrica en exceso el sistema y exuda.

Cargas por eje equivalente de los vehículos y presión de contacto de los neumáticos con el pavimento y frecuencia

El contacto de los neumáticos con el pavimento vuelve a ser un punto central. Como se mencionó, en las características superficiales en relación a la adherencia, se deben diseñar mezclas que sean de adecuada macro y micro textura.

Desde el punto de vista estructural deben ser considerados los neumáticos como el elemento de apoyo, por lo que la presión de inflado y el área de contacto es un factor importante a considerar. Las presiones altas de contacto sobre los pavimentos están directamente relacionadas con los valores de las cargas por eje de los vehículos, lo que conlleva a la formación de huellas son presiones altas de contacto sobre los pavimentos.

A su vez es importante considerar la frecuencia del tránsito. Un aumento en el número de repeticiones de carga establece una disminución en la resistencia de los pavimentos a la generación de deformaciones plásticas; es decir, que cuando se incrementa el número de repeticiones de carga, el pavimento es más susceptible a sufrir este tipo de deterioro (Monosmith et al, 1994).

Las condiciones ambientales

Las altas temperaturas actúan sobre la consistencia del asfalto (lo reblandece) ocasionando una enorme susceptibilidad a sufrir deformaciones plásticas debido a que la mezcla presenta un comportamiento muy viscoso, que la hace fluir y desplazarse con mucha facilidad. La temperatura medioambiental, por lo tanto, es un factor que influye de una manera muy importante en las deformaciones plásticas de los pavimentos porque permite que una mezcla asfáltica se comporte de manera viscosa o elástica.

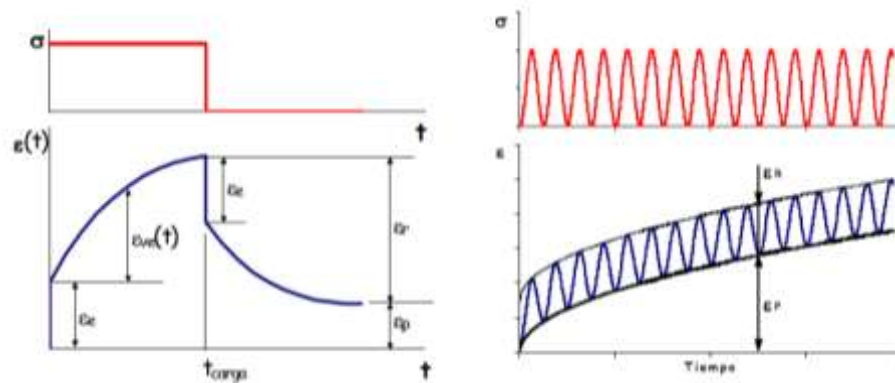
La presencia de agua puede aumentar la susceptibilidad de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas permanentes. Los efectos del agua pueden ser considerados en la fase inicial de diseño de las mezclas o como una parte del proceso de evaluación de las mismas. Cuando existe una modificación de la estructura del pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla. Haciendo una síntesis se puede decir:

	Factor	Cambio del factor	Efecto sobre la resistencia al ahuellamiento
Agregado	Textura superficial	Lisa a rugosa	Incremento
	Granulometría	Discontinua a continua	Incremento
	Forma	Redondeada a granular	Incremento
	Tamaño	Aumento del tamaño máximo	Incremento
Ligante Asfáltico	Módulo de rigidez	Incremento	Incremento
Mezcla Asfáltica	Contenido de ligante	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos de aire	Incremento	Disminuye
	Contenidos de vacíos de agregado mineral	Incremento	Disminuye
	Método de compactación	Superado el límite superior o el inferior	Disminuye
Condiciones de ensayo	Temperatura	Incremento	Disminuye
	Estado y nivel de tensiones	Incremento en el nivel de tensiones	Disminuye
	Presencia de humedad	Seco a saturado	Disminuye si la mezcla es sensible al agua

Cuadro sintético de principales sensibilidades de la mezcla asfáltica

5. MODELOS PARA MEDIR AHUELLAMIENTO

El modelo de sollicitación aplicado y la deformación resultan ser los siguientes:



Gráfica de carga estática y dinámica de las sollicitaciones para ahuellamiento y formación de la deformación permanente

El comportamiento de la mezcla frente a un estado de sollicitación es mediante el inmediato desarrollo de deformaciones específicas del tipo elástico, seguidas por otras del tipo viscoso y dependientes del tiempo tal cual se expresara con anterioridad. Si la carga es cíclica, como la que se muestra en el gráfico, la deformación plástica se va acumulando en el tiempo.

La evolución de la deformación en el tiempo se desarrolla en tres fases:

La primaria: se produce rápidamente en los primeros ciclos

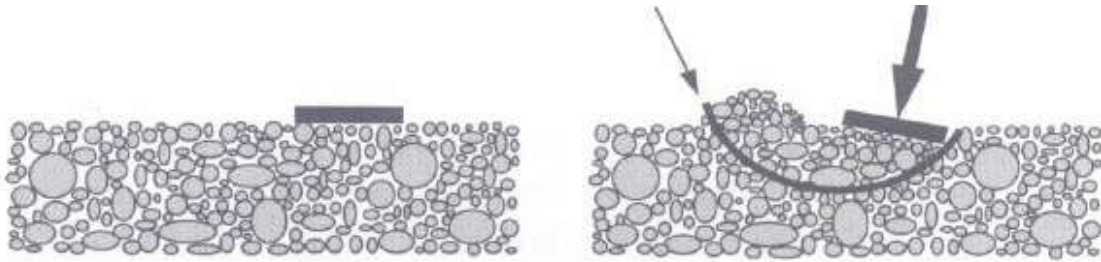
La secundaria: propia de cada mezcla como se ha visto.

La terciaria: es una deformación a volumen constante y deformaciones por corte



Etapas de las deformaciones permanentes

Se puede representar el efecto de la siguiente forma:



Vista de la estructura de la mezcla antes y después de la aplicación de la carga

El método AASHTO 2002 de diseño de pavimentos, sintetiza la ecuación de cálculo en la siguiente fórmula:

$$\log \left(\frac{\epsilon_P}{\epsilon_R} \right) = a_1 + a_2 \log N + a_3 \log T + a_4 \log \sigma_d + a_5 \log \eta + a_6 \log V_{beff} + a_7 \log V_a$$

ϵ_P : deformación específica axial permanente

ϵ_R : deformación específica axial resiliente

N: Número de ciclos

T: Temperatura

Σd : Tensor desviador

η : Viscosidad del ligante a 60 °C

V_{beff} : Porcentaje de volumen efectivo del ligante

V_a : Porcentaje de vacíos

a_i y b_i : Constantes de correlación experimentales

6. PRINCIPALES RIESGOS DEL AHUELLAMIENTO EN LA CALZADA Y FORMA DE MEDICIÓN IN SITU

Los principales riesgos asociados a la formación de este tipo de falla en la calzada son los siguientes:

- Acumulación de agua en las huellas
- Pérdida de control del vehículo
- Inseguridad en las maniobras
- Falta de confort
- Hidroplaneo

Por esta razón el Pliego de Especificaciones Generales del Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios en el punto 20.1 para el OCCOVI, en las Concesiones Viales, establece (ver sitio web <http://www.carreterascentrales.com.ar/Documentacion.html>)

20.1 Medición de las condiciones técnicas de las calzadas de rodamiento.

VALORACION DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA MODIFICANDO EL TIPO FILLER Y ASFALTO

A los efectos del control del estado de las calzadas pavimentadas, el ÓRGANO DE CONTROL efectuará cuando lo considere conveniente y razonable, y por lo menos UNA (1) vez por año y en toda la longitud del CORREDOR VIAL concesionado, las mediciones necesarias para evaluar las condiciones técnicas de las calzadas.

Se deberá tener en cuenta que los equipos a utilizar en las mediciones preferentemente deberán ser de alto rendimiento, entendiéndose por tales a los que efectúan un gran número de pruebas "in situ" produciendo la menor molestia posible al tránsito.

Todos los equipos necesarios para realizar las mediciones que se indican en el presente Artículo, deberán ser provistos por la CONCESIONARIA durante el plazo que demande la realización de las mediciones.

Previo al inicio de los trabajos, el ÓRGANO DE CONTROL aprobará el equipo que la CONCESIONARIA proponga utilizar, el personal técnico a cargo de la tarea, la metodología de trabajo y verificará los certificados de calibración correspondientes.

A los efectos de realizar la evaluación, el ÓRGANO DE CONTROL comunicará fehacientemente a la CONCESIONARIA, con TREINTA (30) días corridos de anticipación, la fecha de comienzo de evaluación para que ésta tenga prevista la provisión de los equipos necesarios para realizar las mediciones.

Todos los gastos que demanden las mediciones establecidas en el presente Artículo, estarán a cargo de la CONCESIONARIA, incluyendo los relacionados con la seguridad vial de las tareas. Por lo tanto, será obligación de la CONCESIONARIA la provisión de todos los elementos de seguridad que requiera el personal del ÓRGANO DE CONTROL afectado a realizar las mediciones, en cantidad suficiente y calidad adecuada para la finalidad a cumplir.

En caso de que el volumen de tránsito así lo amerite (a criterio exclusivo del ÓRGANO DE CONTROL); la CONCESIONARIA deberá garantizar la presencia de banderilleros que asistan al personal del ÓRGANO DE CONTROL durante todo el lapso de tiempo que demanden las mediciones.

Todas las mediciones se efectuarán con equipos que se encuentren previamente homologados por la DIRECCIÓN NACIONAL DE VIALIDAD y bajo la supervisión directa del ÓRGANO DE CONTROL.

Se suscribirá un Acta entre el representante del ÓRGANO DE CONTROL y de la CONCESIONARIA, en la que se dejará constancia, por un lado que ambas partes están de acuerdo con la calibración previa de los equipos y, por otro, que ambas partes intervienen en la medición.

En aquellos tramos en que se halla previsto la ejecución de obras de Reacondicionamiento de Infraestructura durante el Año UNO (1) de CONCESIÓN, hasta que éstas obras finalicen, la obligación de la CONCESIONARIA en dichos tramos con relación a los parámetros del presente Artículo relacionados con el estado de las calzadas de rodamiento, será cumplir sólo con las exigencias de desprendimientos, baches, resaltos o hundimientos, estado de bordes del pavimento. Una vez terminadas las obras, la CONCESIONARIA deberá cumplir con todas las exigencias establecidas en el presente Artículo.

Del mismo modo, durante el transcurso del Año de CONCESIÓN durante el cual se ha previsto la ejecución de la Obra de Reacondicionamiento de Infraestructura, las exigencias para el tramo en ese año serán sólo cumplir con lo referente a desprendimientos, resaltos o hundimientos, estado de bordes del pavimento y tomar las fisuras tipo DOS (2) y CUATRO (4) con sellado tipo puente con asfalto modificado.

Si una vez finalizado el año donde se había previsto la ejecución de la Obra de Reacondicionamiento de Infraestructura, ésta no se ejecutó por causas no imputables a la CONCESIONARIA, la misma realizará las tareas de conservación y mantenimiento necesarias para cumplir con las exigencias totales del presente Artículo, excepto la rugosidad. Los mayores gastos en que incurriere la CONCESIONARIA en este tramo, serán reconocidos de acuerdo a lo establecido en el Artículo 89 "OBRAS DE READECUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA NO EJECUTADAS POR DECISIÓN DEL CONCEDENTE", del Capítulo VI del PLIEGO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES.

Se realizarán determinaciones de los siguientes parámetros:

20.1.1 Deformación longitudinal (rugosidad).

VALORACION DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA
MODIFICANDO EL TIPO FILLER Y ASFALTO

Se determinará mediante la utilización de equipos que permitan medir el perfil longitudinal en forma dinámica. En cualquier caso, si bien el equipo medirá en sus propias unidades, deberán ser éstas fácilmente correlacionables al IRI (Índice de Rugosidad Internacional).

Se determinará la deformación longitudinal de la calzada mediante mediciones que se realizarán en la huella más deteriorada de cada trocha, a exclusivo criterio del ÓRGANO DE CONTROL.

20.1.1.1 Exigencias para las calzadas nuevas y existentes a partir de su repavimentación:

- **(a)** Calzadas con pavimento flexible. En el tramo evaluado, el CIEN (100%) por ciento de los valores kilométricos de rugosidad medida en m/km deberá resultar inferior o igual a 3,2 m/km (IRI).
- **(b)** Calzadas con pavimento de hormigón. En el tramo evaluado el CIEN (100%) por ciento de los valores kilométricos de rugosidad medida en m/km deberá resultar inferior o igual a 3,6 m/km (IRI).

20.1.1.2 Exigencias para las calzadas existentes antes de su repavimentación.

- **(a)** Calzadas con pavimento flexible. Para un tramo continuo de longitud igual o inferior a DIEZ (10) kilómetros, el NOVENTA (90%) por ciento de los valores kilométricos de rugosidad medida en m/km deberá resultar inferior o igual a 3,2 m/km (IRI).
- **(b)** Calzadas con pavimento de hormigón. Para un tramo continuo de longitud igual o inferior a DIEZ (10) kilómetros, el NOVENTA (90%) por ciento de los valores kilométricos de rugosidad medida en m/km deberá resultar inferior o igual a 4,80 m/km (IRI).

20.1.2 Deformación transversal (ahuellamiento).

Se determinará en cada trocha la deformación transversal de las calzadas mediante la aplicación de una regla de CIENTO VEINTE (120) centímetros de longitud del tipo prevista en el MANUAL DE EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS de la DIRECCIÓN NACIONAL DE VIALIDAD, o también podrán emplearse para la medición de ahuellamiento equipos de alto rendimiento.

Cuando se mida mediante la aplicación de la regla de CIENTO VEINTE (120) centímetros de longitud, las determinaciones se efectuarán cada DOSCIENTOS (200) metros (CINCO (5) mediciones por kilómetro), sobre la huella más deteriorada, a criterio exclusivo del ÓRGANO DE CONTROL, de la siguiente manera:

- PRIMERO Y QUINTO AÑO DE CONCESIÓN: progresiva 50m, progresiva 250m; progresiva 450m, progresiva 650m, progresiva 850m.
- SEGUNDO Y SEXTO AÑO DE CONCESIÓN: progresiva 100m, progresiva 300m; progresiva 500m, progresiva 700m, progresiva 900m.
- TERCER AÑO DE CONCESIÓN: progresiva 150m, progresiva 350m; progresiva 550m, progresiva 750m, progresiva 950m.
- CUARTO AÑO DE CONCESIÓN: progresiva 200m; progresiva 400m, progresiva 600m, progresiva 800m, progresiva 1000m.

En el caso en que se mida la profundidad de huella mediante la aplicación de equipos de alto rendimiento, las determinaciones deberán dar los resultados cada DOSCIENTOS (200) metros, sobre la huella más deteriorada, a criterio exclusivo del ÓRGANO DE CONTROL.

En caso que se utilicen equipos de alto rendimiento, el ÓRGANO DE CONTROL exigirá una verificación en un tramo de prueba antes del comienzo de la medición. Si el equipo no superara esta verificación, no será admitido. Asimismo, en caso de duda durante la medición con un equipo de alto rendimiento, se podrán exigir verificaciones utilizando la regla de CIENTO VEINTE (120) centímetros.

20.1.2.1 Exigencias para las calzadas nuevas y existentes a partir de su repavimentación:

Para un tramo continuo de longitud igual o inferior a CUATRO (4) kilómetros, el NOVENTA Y CINCO (95%) por ciento de los valores medidos en la trocha analizada, deberán ser iguales o menores que DOCE (12) milímetros. Ninguno de los valores individuales medidos podrá ser superior a QUINCE (15) milímetros.

20.1.2.2 Exigencias para las calzadas existentes antes de su repavimentación.

Para un tramo continuo de longitud igual o inferior a CUATRO (4) kilómetros, el NOVENTA (90%) por ciento de los valores medidos en la trocha analizada, deberán ser iguales o menores que DOCE (12) milímetros.

20.1.2.3 Exigencias para todas las calzadas pavimentadas:

No se admitirán rellenos de huella ni texturizados, sin la terminación con algún revestimiento asfáltico que uniformice la superficie de rodamiento en todo el ancho de una o mas trochas hasta completar todo el ancho del sentido de circulación.

Por ninguna circunstancia se permitirá la ejecución de tratamientos bituminosos tipo simple, doble o triple, o lechadas asfálticas sobre los pavimentos, admitiéndose la aplicación de microaglomerado con asfalto modificado conforme la Especificación Técnica Complementaria. Queda absolutamente prohibido librar al tránsito superficies de rodamiento fresadas o texturizadas, salvo durante cortos períodos de tiempo por obras en ejecución sobre los tramos involucrados.

Para poder evaluar las exigencias antes citadas, el equipamiento a utilizar se puede dividir en equipos manuales y de alto rendimiento:

En forma manual se puede utilizar la regla de 1,20m.



Vista de la regla de 1,20 m.

La Dirección Nacional, y varias Direcciones Provinciales de Vialidad poseen equipos de alto rendimiento. Se puede ver en la siguiente fotografía el detalle del equipo de la DNV. Posee dos emisores laser, dos cámaras de videos que cubren todo el carril y puede establecer perfiles transversales cada diez metros o menos.



Vista del equipo de alto rendimiento

Con este equipo, se pueden obtener perfiles como el que se muestra en el siguiente gráfico



Vista del perfil obtenido

7. EQUIPOS PARA MEDIR EL AHUELLAMIENTO EN LABORATORIO

En forma creciente, las agencias de transporte en los Estados Unidos y en la comunidad Europea, se están ampliando los procedimientos de diseño de mezclas con ensayos empíricos de resistencia. Se llaman empíricos debido a que de sus resultados derivan de una decisión de “se acepta/no se acepta”. Basado en la experiencia de la agencia con el ensayo calibrado para el pavimento real, un ejemplo al respecto, es el de las ruedas cargadas (loaded wheel tester) que simulan el paso del tránsito. Este tipo de ruedas se han empleado para determinar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a presentar deformación permanente y fatiga.

Dispositivos de ruedas cargadas

En los últimos años se han empleado en Europa y Estados Unidos distintos dispositivos de ruedas cargadas para evaluar las propiedades de la mezclas asfálticas, entre las que se encuentran: la rueda cargada de Hamburgo (HWDT); la rueda cargada (LCPC); el evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham; la rueda cargada de Georgia (GLWT); el analizador de pavimentos asfálticos (APA) y el equipo bajo la norma europea UNE-EN 12697-22

Rueda Cargada de Hamburgo (HWTD)

La rueda cargada de Hamburgo (HWTD) la desarrolló la compañía Helmit-Wind, de Alemania. Se utiliza como especificación en algunas de las carreteras más transitadas en Alemania para evaluar la deformación permanente y la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la humedad (stripping).



Vista rueda cargada de Hamburgo

Rueda cargada LCPC

La rueda cargada (LCPC) también llamada rueda cargada francesa (French Rutting Tester FRT), se ha empleado en Francia durante los últimos 20 años exitosamente en la prevención de la deformación permanente en los pavimentos asfálticos. En los últimos años, la FRT se ha aplicado en Estados Unidos notablemente en el estado de Colorado, y por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) en algunos de sus centros de investigación. La FRT es capaz de ensayar simultáneamente dos vigas de mezcla asfáltica.



Rueda cargada LCPC

Evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham

El evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham, Inglaterra, permite ensayar secciones de pavimento de 4.8 m (16 pies) de largo por 2.4 m de ancho, construida sobre una fosa de 1.5 m (5 pies). La prueba se lleva a cabo bajo temperaturas controladas, y la carga, de 10 kN, se aplica por medio de un neumático que transmite una presión de contacto de 73 lb/pulg², a una velocidad de 16 km/h. El rango de trabajo de este dispositivo es de 20 a 25 °C.



Evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham

Rueda cargada de Georgia (GLWT)

La rueda cargada de Georgia (GLWT), se desarrolló a mediados de los 80's a través de una investigación entre el Departamento de Transporte de Georgia y el Instituto de Tecnología del mismo estado. El desarrollo de la GLWT consistió en modificar una rueda cargada diseñada originalmente por CR Benedict, de Benedict Slurry Seal, Inc, para evaluar la calidad de las lechadas asfálticas. El principal propósito en el proyecto de la GLWT fue un dispositivo que permitiera actividades de rutina para el control de calidad en la producción de las mezclas asfálticas elaboradas en caliente, en términos de la deformación permanente. La GLWT es capaz de ensayar vigas o especímenes cilíndricos. Las dimensiones de las vigas son generalmente 125 mm de ancho, 300 mm de largo, y 75 mm de altura (5 x 12 x 3 pulgadas).



Rueda cargada de Georgia

Analizador de pavimentos asfálticos (APA)

El analizador de pavimentos asfálticos es una modificación de la rueda cargada de Georgia, y se fabricó por primera vez en 1996 por Pavement Technology, Inc. El APA se ha utilizado por algunas agencias de transporte de los Estados Unidos para evaluar la deformación permanente, fatiga y sensibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. Su uso se ha difundido también en Centro América.

Dado que el APA es la segunda generación de la GLWT, se siguen procedimientos similares de ensayo; la rueda cargada realiza movimientos de ida y vuelta sobre la manguera presurizada, para inducir la rodera en la probeta.

A diferencia de la GLWT, el APA puede ensayar especímenes sumergidos en agua. Los especímenes de prueba pueden ser vigas o probetas cilíndricas; las dimensiones de las vigas son idénticas a las que utilizan en la GWLT.

Actualmente, el método más común para elaborar vigas es con el compactador vibratorio de mezclas asfálticas (Asphalt Vibratory Compactor). Para elaborar las probetas cilíndricas se ha recurrido al compactador giratorio SuperPave y el martillo Marshall. Cabe mencionar que se pueden ensayar probetas con diámetros de 100 o 150 mm.



Vista del analizador APA

8. VALORACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO. NORMA UNE-EN 12697-22. PROCEDIMIENTO B:

Se ha utilizado como base la Norma de la Comunidad Europea, 2004. (BS EN 12697-22:2003 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt part 22. Wheel Tracking).

Se dispone de un equipo de ensayo y de un equipo de moldeo.

El equipo de moldeo es el requerido en la norma, denominado Roller Compact, el cual se muestra en la siguiente figura:



Vista del compactador Roller Compact disponible en el LEMaC

En cuanto al equipo de ensayo exigido por la norma cumple con las siguientes características:

Características de la probeta

Dimensiones de la probeta, de acuerdo al espesor de la capa

Espesor probeta (cm)	2.5	4	6	8
Tamaño máximo del agregado (mm)	< 8	8<TMT>16	16<TMT<22	22<TMT<32

Espesor probetas en función del tamaño máximo del agregado

La probeta utilizada es de 30 cm de lado



Probeta de ensayo

- Cantidad de probetas: 2 probetas
- Grado de compactación exigido: mínimo 97 %
- Determinación de la densidad: según Norma EN 12697-33 o EN 12697-32 con muestra sumergida
- Acondicionamiento previo al ensayo: 4 horas a 60 °C

Características de la rueda:

- Diámetro: 20 cm
- Ancho: 5 cm
- Espesor: 2 cm
- Dureza Shore A: 80
- Carga estática: 700 N

Características generales del ensayo:

- Recorrido: 23 cm
- Frecuencia: 26,5 ciclos/minutos
- Temperatura de Ensayo: 60 °C precisión 0,1 °C
- Largo del brazo: 1 m

- Dispositivo de control de la temperatura
- Con termocuplas en el recinto
- Elementos de medición de las deformaciones: LVDT
- Duración del ensayo: 10000 ciclos o 20 mm de huella
- Resolución en la medición del ahuellamiento: 0,01 mm
- Cada muestra está compuesta por el promedio de 25 puntos distribuidos en los 100 mm centrales de la probeta.

Pendiente de ahuellamiento

$$WTS_{AIRE/AGUA} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \left[\frac{mm}{10^3 \text{ ciclos}} \right]$$

Donde:

Di = profundidad de la huella a los i ciclos
 WTS = pendiente media de ahuellamiento

PRD, profundidad de ahuellamiento media proporcional

Es el promedio de la profundidad de la huella respecto del espesor de 2 o más muestras expresadas en porcentaje de +/- 0,1 % para N ciclos de carga.

RD, profundidad de ahuellamiento media

Profundidad de huella de 2 o más muestras +/- 0,1 mm para N ciclos de carga.

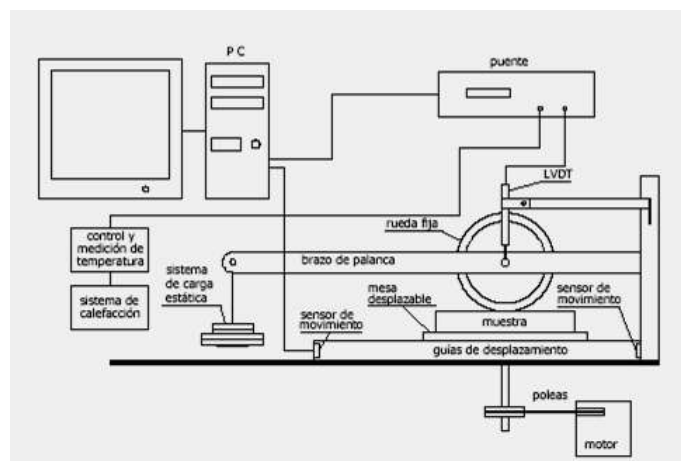


Diagrama del equipo de Wheel Tracking Test



Equipo de Wheel Tracking del LEMaC

9. VALORACION DE LA MEZCLA CAC D 19

Se recuerdan la nomenclatura y los valores Marshall finales obtenidos en las mezclas diseñadas según los valores informados en el capítulo 1

- Mezcla 1. Con 100 % FG proveniente de la arena de trituración con CA-30
- Mezcla 2. Con 100 % FG proveniente de la arena de trituración con AM-3
- Mezcla 3. Se reemplaza el PT 200 de la arena de trit. Por FC con CA-30
- Mezcla 4. Se reemplaza el PT 200 de la arena de trit. Por FC con AM-3.

FG: Filler Granítico
FC: Filler Cal

Síntesis de los valores Marshall obtenidos

Parámetro	Unidades	Mezcla 1 FG CA-30	Mezcla 2 FG AM-3	Mezcla 3 FC CA-30	Mezcla 4 FC AM-3
Porcentaje óptimo de Asfalto	%	4.7	4.7	4.8	4.8
Densidad Marshall (Dm)	g/cm ³	2.323	2.422	2.422	2.418
Densidad Rice (Dr)	g/cm ³	2.410	2.510	2.508	2.499
Vacíos	%	3.6	3.5	3.4	3.2
Estabilidad	Kg	1078	1210	1029	1290
Fluencia	mm	3.6	4.0	3.3	3.8
Relación E/F	Kg/cm	2855	3025	3118	3394
VAM*	%	13.9	14.9	13.8	14.8
Relación B/V	%	78.4	76.6	84.2	78.3

Las mezclas para el ensayo de Wheel Tracking fueron moldeadas en el siguiente horno, especialmente diseñado para producir el mezclado con paletas en ejes horizontal, similar al mezclado en planta, y calefaccionado por mechero a gas sobre cuba de pared doble con aceite pesado en su interior.

VALORACION DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA
MODIFICANDO EL TIPO FILLER Y ASFALTO



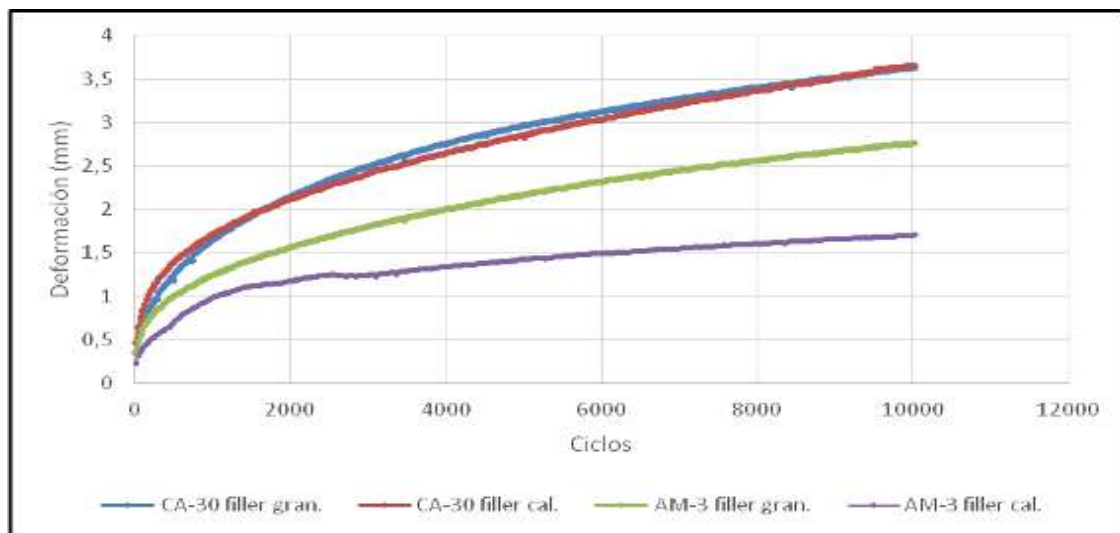
Vista superior del dispositivo de mezclado

Se procedió a moldear por cada tipo de mezcla 2 probetas. En todos los casos se han alcanzado densidades de cada probeta superior al 98 %.

Valores del ensayo de WTT

Parámetros	Unidades	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3	MEZCLA 4
		FG CA-30	FG AM-3	FC CA-30	FC AM-3
Rd	mm	3.630	2.765	3.655	1.710
PRD	%	7.26	5.53	7.31	3.42
WTS	mm/10 ³ ciclos	0.134	0.118	0.165	0.055
Espesor	mm	50	50	50	50

Los valores se pueden observar en el siguiente gráfico:



Curva de deformación vs ciclos en ensayo de WTT

10. CONCLUSIONES

Las mezclas 1 y 3 con CA-30, la RD (profundidad media de la huella) es aproximadamente parecida para los dos tipos de filler. Para los asfaltos modificados se observa una fuerte disminución con el filler cal. La combinación de FC y AM-3 produce la menor profundidad de huella.

En cuanto a la profundidad proporcional de la huella (PRD) sólo la utilización de asfalto modificado ha promovido un valor de PRD ≤ 5.5 % recomendable como aceptable en las recomendaciones realizadas por Silvia Angelone en su tesis doctoral. Mientras que para el CA-30 el comportamiento ha sido similar para los dos tipos de filler.

Si se observan los valores de la pendiente media de ahuellamiento, WTS, se detectan los cambios producidos en forma marcada cuando se varía el tipo de asfalto. El cambio del filler dentro del mismo tipo de asfalto ha producido mayores cambios cuando se combina el FC con el AM-3. El cambio de betún tiene un efecto más significativo sobre el comportamiento de la mezcla para resistir el ahuellamiento y la capacidad de adherencia, que el filler utilizado.

Para el estudio de los resultados se utilizaron los valores orientativos adoptados por Silvia Angelone en el desarrollo de su tesis doctoral. Los mismos son:

WTS < 0,100 mm/10³ ciclos
PRD <5,5%.

En muchas obras de ambas provincias se ha asistido a toma de decisiones en las que, al considerar en el proceso de diseño solo la metodología Marshall, se han tomado decisiones de no fillerizar las mezclas o cambiar en algunos casos por razones de costo el diseño original de mezclas que contemplaban asfaltos modificados con polímero por asfalto convencionales. Se pone de manifiesto aquí que se generan mezclas de muy diferentes respuestas frente a las cargas pesadas y temperaturas por encima de los 45 °C, con potencialidades de ahuellamiento diferentes.