

EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ENSAYOS DE DESEMPEÑO: UN CASO REAL

Rodolfo Adrián Nosetti¹, Hugo Daniel Bianchetto²,
Roger Flores Laura³

¹ Consultoría Integral de Obras Civiles S.A., Av. Monroe 2450 7º Dpto. 702 Ciudad Autónoma de Buenos Aires; ranosetti@coninoc.com.ar

² Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Avellaneda, R. Franco 5050, Villa Domínico, Avellaneda; hbianchetto@fra.utn.edu.ar

³ Bureau Veritas Argentina S.A. Sucursal Bolivia, Avenida Beni entre Segundo y Tercer Anillo, Edificio Casa Grande, Primer Piso, Of. 208, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia; roger.flores@msn.com

Resumen

En el presente trabajo se reporta la caracterización de dos mezclas asfálticas mediante ensayos de desempeño, las que fueron utilizadas como base y carpeta en dos obras contiguas en Bolivia, en zona de altura, con un intervalo de elevación desde 3800 m.s.n.m. hasta 4500 m.s.n.m., y que estuvieron constituidas por áridos de diferente origen y un mismo ligante asfáltico. Si bien ambas mezclas cumplieron en general con lo preceptuado en las especificaciones, a modo de investigación se decidió realizar una serie de determinaciones en laboratorio con materiales remitidos y con testigos y muestras de calzada extraídos de la obra, que abarcaron no sólo ensayos rutinarios sino además resistencia a tracción indirecta y módulo dinámico por compresión diametral, fatiga con viga prismática de cuatro puntos y resistencia al ahuellamiento y al daño por humedad mediante el Test de Hamburgo. A partir de los resultados obtenidos se lograron valiosas conclusiones que permitieron correlacionar las propiedades de las mezclas evaluadas con sus respectivas composiciones, corroborándose la necesidad de incluir a los ensayos de desempeño durante el diseño de las mezclas a fin de tomar decisiones correctas en lo concerniente a los materiales componentes y a la dosificación final de la misma.

Palabras Clave: diseño, mezclas asfálticas, ensayo de desempeño

1 Introducción

En la ingeniería de pavimentos, la tendencia actual es evaluar las mezclas asfálticas mediante ensayos de desempeño en laboratorio y en obra. Dentro de éstos podemos considerar el Modulo de Rigidez y los ensayos para determinar la resistencia a fatiga, al ahuellamiento y al daño por humedad, entre otros. Para tal fin, se han diseñado diferentes metodologías de ensayo que deberían ser tenidas en cuenta para realizar una adecuada evaluación de las mezclas a producir y colocar.

En el presente trabajo se reportan los resultados de ensayos realizados sobre mezclas asfálticas de base y carpeta moldeadas en el laboratorio de la Unidad de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Civil - Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UIDIC-LaPIV, FI-UNLP), y también se estudiaron muestras extraídas de distintos frentes de obra de dos tramos contiguos de pavimento flexible de la República de Bolivia. Cabe destacar que cada tramo presentaba dos capas de mezcla asfáltica y que dichas capas se ejecutaron con la misma mezcla que correspondía al tramo.

A los agregados pétreos y al ligante asfáltico modificado se les determinaron sus características y propiedades.

Con las distintas dosificaciones de las mezclas y con los materiales enviados desde las obras se reprodujeron dichas fórmulas y fabricaron probetas Marshall obteniéndose los parámetros volumétricos y mecánicos previstos en el procedimiento; también se efectuaron ensayos de módulo dinámico o resiliente a 20°C.

Se moldearon con el equipo de *roller compactor* los especímenes para posteriormente realizar el aserrado a fin de conseguir las vigas que fueron ensayadas a fatiga en la modalidad de "4 (cuatro) puntos".

Los testigos extraídos de los dos tramos de obra se separaron según las capas de carpeta y base asfáltica y en algunos casos puntuales se ensayaron base y carpeta sin realizar la separación de los mismos: De todas estas muestras se determinaron densidades, resistencia a tracción indirecta mediante el ensayo de compresión diametral y sobre algunos de estos testigos se determinó el módulo de rigidez, también mediante la modalidad de compresión diametral.

La respuesta frente al ahuellamiento y el daño por humedad se realizó mediante el Hamburgo Test; el mismo se efectuó con panes de pavimento extraídos de los dos tramos de las obras.

Se presenta a continuación una breve descripción de los ensayos ejecutados y la metodología aplicada, indicando la correspondiente Normativa.

2 Ensayos de desempeño de los pavimentos asfálticos

Varios factores afectan el desempeño de un pavimento, incluyendo la temperatura, la tensión de carga, el envejecimiento y la humedad. La valoración del desempeño de una mezcla asfáltica debe ser parte primordial del diseño, de manera de obtener un pavimento resistente y durable a lo largo de su vida útil.

Actualmente, los pavimentos son sometidos a mayores volúmenes de tránsito y cargas y, debido a las particularidades geográficas de la zona de la obra y los cambios climáticos, en algunos casos están expuestos a condiciones muy adversas. Es por ello que es esencial plantear ensayos de desempeño desde el inicio del proyecto. El diseño, caracterización y evaluación del pavimento en laboratorio se

hace estudiando su comportamiento y teniendo en cuenta los diferentes modos de falla. Las fallas más importantes que presenta un pavimento pueden dividirse en fisuraciones (térmica o por fatiga) y deformaciones permanentes (especialmente, ahuellamiento). Para evitar un deterioro prematuro es importante estimar con mayor certeza cuál será su comportamiento en campo.

2.1 Ensayos de compresión diametral en probetas Marshall: RTI y módulo de Rigidez.

Las probetas cilíndricas normalizadas por la metodología Marshall se utilizan, cada vez más, para determinar otros dos parámetros: la resistencia a tracción por compresión diametral en seco y embebida o saturada; y el módulo dinámico, denominado para mezclas asfálticas también como de Rigidez o “Stiffness” de la mezcla. La información que brindan estos ensayos permite complementar la dosificación, realizar control de calidad o ajustar con mayor precisión el diseño estructural de las capas de un pavimento. El ensayo de tracción indirecta reproduce el estado de tensión bajo la carga en la zona más crítica de una capa asfáltica, que es la fibra inferior de la misma [1]; en tanto que el módulo toma en cuenta aquellas condiciones que afectan su comportamiento o respuesta ante cargas repetidas: temperatura, velocidad de carga, compactación, composición de la mezcla asfáltica y envejecimiento [2].

El ensayo de tracción indirecta para mezclas asfálticas normalmente se realiza a una velocidad de aplicación de carga de 50.8 mm/min y a 25°C, aunque también puede realizarse a otras temperaturas (especialmente las más bajas) para predecir el comportamiento de la mezcla sometida a agrietamientos por baja temperatura; Norma EN-12697-23/2003 [3].

Por su parte, la NORMA UNE-EN 12697-26/2019 para mezclas bituminosas [4] especifica los métodos para caracterizar la rigidez de las mezclas asfálticas, como una guía del comportamiento relativo en el pavimento. Las probetas se someten a deformación en su rango lineal, bajo cargas repetidas, midiéndose las amplitudes del esfuerzo aplicado y de la deformación junto con la diferencia de fase entre tales parámetros. La norma prevé frecuencias desde 0,1 hasta 50 Hz; al finalizar la secuencia se vuelve a 0,1 Hz para verificar que la probeta no ha sufrido daños (la diferencia de rigidez debe ser < 3 %); las temperaturas posibles son desde 0 hasta 40 °C. Se mide fuerza (tensión), desplazamiento, ángulo de fase y se calculan el módulo complejo visco-elástico E^* y su valor absoluto, el módulo dinámico $|E^*|$, con sus componentes E_1 y E_2 .

2.2 Ahuellamientos

Las deformaciones permanentes o ahuellamientos son el deterioro caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Es la acumulación de pequeñas deformaciones irrecuperables producidas con cada aplicación de carga. Este proceso se ve favorecido por la acción combinada de elevados niveles de tránsito pesado lento y altas temperaturas. Esta depresión, canalizada en la huella de circulación de los vehículos, deriva en una seguridad vial deficiente porque los surcos que se forman pueden retener suficiente agua para provocar hidroneo; pero aún sin la presencia de agua, la conducción se torna problemática, produciéndose un mayor stress y cansancio del conductor.

Si bien el ahuellamiento puede tener varias causas (compactación por efecto del tránsito, mezcla mal dosificada, etc.), hay dos principales que son la falla estructural de la subrasante y la falla de la carpeta asfáltica, o una combinación de ambas. El ahuellamiento que se debe a la acumulación de deformaciones en las capas asfálticas propiamente dichas es causado por una mezcla asfáltica cuya resistencia al corte es demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las cuales está sometida.

El estudio y la caracterización de los ahuellamientos de las mezclas asfálticas en forma racional han llevado al desarrollo de ensayos de laboratorio que tratan de reproducir el problema, como los que simulan el efecto del tránsito sobre el pavimento midiendo las deformaciones que sufre la mezcla a través del tiempo bajo condiciones extremas de tránsito y de clima. La configuración del ensayo consta básicamente de una rueda, rígida o neumática, que aplica una carga sobre la probeta a la vez que circula sobre ésta; este ensayo revela el futuro comportamiento de la mezcla en el pavimento, permitiendo cambios en el diseño ante un mal funcionamiento [5].

Existen a nivel mundial diferentes equipos con configuraciones similares pero con variaciones de uno a otro. En los estudios realizados se utilizó la variante "Hamburgo Wheel Tracking Test". El método consiste en someter a una probeta de mezcla asfáltica, ya sea preparada y compactada en el laboratorio o testigo de pavimento, a cargas repetitivas mediante la acción alternativa de una rueda de acero.

En la Figura 1 pueden observarse dos vistas del equipo, el cual está constituido por una rueda de acero de 203,6 mm de diámetro y 47 mm de ancho que ejerce una carga de 705 N (71 Kg) sobre una probeta de mezcla asfáltica de aproximadamente 300 mm de lado y 50 mm de espesor. La rueda se mueve a razón de 53 pasadas por minuto. La muestra se encuentra sumergida en un baño de agua termostatzado a 50 °C (NORMA AASHTO T324-11) [6]. El equipamiento ilustrado en las fotografías pertenece a la UIDIC-LaPIV de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.



Figura 1. Equipo de Ensayo de Hamburgo

Los datos que se registran son graficados en una curva de deformaciones producida en función del número de pasadas de la rueda. Una representación típica de lo que se obtiene es mostrada en la Figura 2.

Tal cual se aprecia, la curva resultante presenta dos pendientes bien diferenciadas. La denominada pendiente “creep slope” o pendiente de deformación se emplea para medir o evaluar la susceptibilidad al ahuellamiento. La misma mide la acumulación de deformación permanente debido a mecanismos que se diferencian del daño producido por el agua. La segunda pendiente conocida como “stripping slope” o pendiente de descubrimiento o falta de cobertura del árido con ligante, indica la acumulación de deformación permanente debido a daños por humedad y es utilizada para evaluar dicho deterioro.

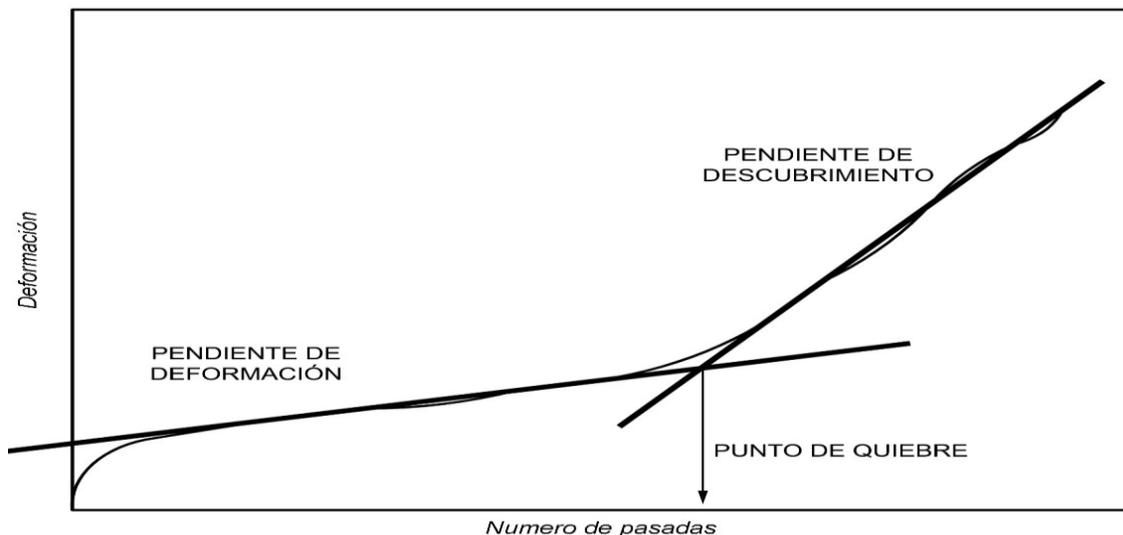


Figura 2. Curva deformación versus número de pasadas

El punto de quiebre entre las dos pendientes, conocido como “stripping point” o punto de descubrimiento, es el número de pasadas de la rueda en el que se comienzan a notar los daños ocasionados por el agua. Es a partir de este punto donde se produce el desprendimiento de la capa de cemento asfáltico del agregado pétreo y se visualiza la pérdida de adherencia.

A los efectos de evaluar las características de adherencia de un determinado agregado pétreo, muchas instituciones especializadas indican informar el valor de las pendientes de deformación y de descubrimiento junto con el punto de quiebre. Otras consideran el desempeño de un agregado pétreo respecto a sus características de adherencia. El Departamento de Transportes de Texas tiene en cuenta la consistencia de los ligantes empleados sobre la base de su PG, para lo cual aconseja tomar como valor límite del ensayo el número de pasadas para alcanzar una profundidad de huella o deformación de 12,5 mm (Tabla 1) [7].

Tabla 1. Consideraciones del Departamento de Transporte de Texas

| PG | 64 | 70 | 76 |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| Nº Pasadas para d=12,5 mm | 10.000 | 15.000 | 20.000 |

2.3 Fatiga

La fisuración por fatiga de un material es un deterioro que se produce ante la aplicación repetida de un gran número de sollicitaciones. En el caso de mezclas asfálticas, las sollicitaciones son de corta duración al paso de los ejes del vehículo,

apareciendo las fisuras generalmente después de un tiempo de servicio debido a la repetición de cargas, aunque también es factible que se manifieste la fatiga debido a esfuerzos horizontales, en particular por gradientes térmicos [8].

Cuando la fatiga se produce por las cargas verticales del tránsito, la falla se inicia en la parte inferior de la capa de pavimento a causa de tensiones de tracción que se acumulan a cada paso de los neumáticos, progresando hacia la parte superior; a esto se lo llama “agrietamiento estructural del pavimento”. Ésta es la denominada “falla por fatiga por repeticiones de carga”. Visualmente, los signos prematuros suelen manifestarse como fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella; a posteriori, el entramado de fisuras que se unen progresa hasta llegar al aspecto de piel de cocodrilo e incluso hasta la desintegración.

La fatiga también puede producirse por causas de índole térmica en los pavimentos, por tensiones debido a las variaciones de temperatura o eventualmente por esfuerzos horizontales del tránsito como frenadas, aceleraciones o giros. Se manifiesta como fisuras transversales u oblicuas respecto del eje de la calzada. En este caso, su progresión se da en sentido contrario a las fisuras por cargas: comienzan en la superficie de la capa de rodamiento y se desarrollan en profundidad.

La fatiga en los pavimentos asfálticos puede modelarse en laboratorio con ensayos específicos. La “Mecánica de Fractura” es la herramienta para interpretar cómo se generan, crecen y se propagan las grietas o fisuras por fatiga. El ensayo “perfecto” sería aquél que manifieste el estado tensional completo del pavimento ante el paso de los vehículos.

Como es muy difícil representar ensayos que permitan manifestar los cuatro estados tensionales a la vez, se ha optado (a partir de numerosas investigaciones) por simular el estado más crítico, que es el correspondiente a la fibra inferior de la capa bajo la carga aplicada. Los ensayos normalizados plantean distintas configuraciones geométricas, entre ellas, tronco piramidal, prismática y cilíndrica, con distintas configuraciones de apoyo, carga y esfuerzos tensionales.

Debe tenerse presente que el fenómeno de fatiga está asociado al deterioro que se produce en un material a consecuencia de la aplicación de cargas repetidas con una magnitud muy inferior a la resistencia máxima que puede soportar el material en un ensayo de rotura “estático”. Así, estos *tests* se caracterizan por la aplicación repetitiva de cargas. El ensayo puede efectuarse de dos maneras, con carga o con esfuerzo controlado. O sea: sometiendo a una probeta a ciclos de carga con amplitud de esfuerzo constante, lo que redundará en una deformación creciente; o bien mediante deformación controlada, que implica cargar a una probeta de modo tal que su deformación sea constante, resultando un esfuerzo decreciente a medida que el material se fatiga y su módulo decrece.

En el presente trabajo se empleó el ensayo de “Flexión en viga de 4 puntos”, considerándose como criterio de falla cuando la carga decrece de modo tal que el Módulo se reduce a un 50% de su valor inicial. La norma utilizada fue la UNE-EN 12697-24 [9], que utiliza probetas prismáticas simplemente apoyadas, que es la forma más empleada [10], con cargas en los tercios, dentro de una cámara ambientada que permite mantener la temperatura constante y un sistema que permite un esfuerzo sinusoidal repetido con un rango entre 0 y 10 Hz. En la Figura 3 puede verse el equipo y parte del grupo de vigas ensayadas y su previo acondicionamiento, el cual también pertenece a la UIDIC-LaPIV de la UNLP.



Figura 3. Vigas y equipo para medida de resistencia a fatiga en 4 puntos

3 Análisis de resultados

Se presentan las características de las dos mezclas utilizadas en este trabajo.

En primer lugar, el Tramo I con los ensayos más relevantes de sus materiales componentes y los resultados de las probetas Marshall fabricadas para la determinación de parámetros del método y el módulo resiliente. Idénticas consideraciones se hacen *a posteriori* para el Tramo II.

3.1 Materiales pétreos utilizados, Tramo I

Los agregados pétreos que se utilizaron son una arena natural, una arena de trituración, un agregado grueso de tamaño máximo $\frac{1}{2}$ " denominado "Chips $\frac{1}{2}$ " y un agregado prácticamente monogranular, comprendido mayormente entre los tamices de 4,75 mm y 2,38 mm, denominado "Gravilla #4". El ligante fue un "asfalto polimerizado 60-85". Es dable destacar que la mezcla dosificada carece de fíller de aporte.

En Tabla 2 y Tabla 3 se presenta la caracterización de los áridos.

Tabla 2. Ensayos realizados sobre el agregado grueso, Tramo I

| Ensayo a realizar | Norma | Chips $\frac{1}{2}$ |
|--|-------------|---------------------|
| Desgaste Los Ángeles [%] | IRAM 1532 | 26,4 |
| Micro – Deval [%] | IRAM 1762 | 26 |
| Elongación [%] | IRAM 1687-2 | 28,3 |
| Lajosidad [%] | IRAM 1687-1 | 12,6 |
| Densidad Relativa real I[g/cm ³] | IRAM 1533 | 2,685 |
| Densidad Relativa aparente I[g/cm ³] | IRAM 1533 | 2,528 |
| Densidad Relativa sss I[g/cm ³] | IRAM 1533 | 2,586 |
| Absorción de agua [%] | IRAM 1533 | 2,3 |
| Polvo Adherido [%] | VN-E.68 | 4,1 |

Tabla 3. Ensayos realizados sobre los agregados finos, Tramo I

| Ensayo a realizar | Norma | Arena natural | Gravilla #4 | Arena trituración |
|---------------------------------------|-----------|---------------|-------------|-------------------|
| Equivalente de Arena [%] | IRAM 1682 | 68 | 70 | 31 |
| Densidad Relativa rea $[g/cm^3]$ | IRAM 1520 | 2,677 | 2,681 | 2,663 |
| Densidad Relativa aparente $[g/cm^3]$ | IRAM 1520 | 2,518 | 2,494 | 2,522 |
| Densidad relativa sss $[g/cm^3]$ | IRAM 1520 | 2,578 | 2,564 | 2,575 |
| Absorción de agua [%] | IRAM 1520 | 2,35 | 2,8 | 2,10 |

El ligante bituminoso modificado utilizado en los dos tramos proviene de un único fabricante. Se indican en la Tabla 4 las viscosidades realizadas con un Viscosímetro Brookfield Modelo DV – III – ULTRA a altas temperaturas, mientras que en la Tabla 5 se indican los valores obtenidos de penetración, punto de ablandamiento, retorno elástico por torsión y PG, que denotan un buen grado de modificación.

Tabla 4. Viscosidades realizadas con viscosímetro Brookfield (Rotor: SC4-28)

| Viscosidad Brookfield | | Unidad | Valor |
|-----------------------|---------------------------------------|---------|--------|
| 135°C | 50 rpm; Vel. Fluir 14; Torque 12,2 | [mPa.s] | 1220,0 |
| | 100 rpm; Vel. Fluir 28; Torque 24,3 | | 1215,0 |
| | 200 rpm; Vel. Fluir 56; Torque 48,3 | | 1208,0 |
| | 250 rpm; Vel. Fluir 70; Torque 60,5 | | 1210,0 |
| 150°C | 100 rpm; Vel. Fluir 28; Torque 12,3 | [mPa.s] | 615,0 |
| | 150 rpm; Vel. Fluir 42; Torque 18,4 | | 613,0 |
| | 200 rpm; Vel. Fluir 56; Torque 24,5 | | 612,0 |
| | 250 rpm; Vel. Fluir 70; Torque 30,7 | | 614,0 |
| 170°C | 180 rpm; Vel. Fluir 50,4; Torque 10,3 | [mPa.s] | 286,0 |
| | 200 rpm; Vel. Fluir 56; Torque 11,4 | | 285,0 |
| | 220 rpm; Vel. Fluir 61,6; Torque 12,6 | | 286,0 |
| | 250 rpm; Vel. Fluir 70; Torque 14,3 | | 286,0 |
| 190°C | 250 rpm; Vel. Fluir 70; Torque 7,5 | [mPa.s] | 150,0 |

Tabla 5. Otros parámetros del ligante asfáltico modificado

| Ensayo sobre el ligante asfáltico | Norma | Valor |
|-----------------------------------|-------------|--------|
| Penetración [dmm] | IRAM 6576 | 68 |
| Punto de Ablandamiento [°C] | IRAM 6841 | 76.2 |
| Retorno elástico por torsión [%] | IRAM 6830 | 82 |
| PG | AASHTO M332 | 64 - E |
| True PG | AASHTO M332 | 69 - E |

La dosificación de los materiales componentes se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Dosaje de agregados, Tramo I

| Porcentaje en peso de mezcla | | | | |
|------------------------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|
| Chips ½ | Gravilla Nº4 | Arena Trituración | Arena Natural | Asfalto 60-85 |
| 54,2 | 11,2 | 14,0 | 14,0 | 6,5 |

La granulometría de la composición de áridos se presenta en la Figura 4.

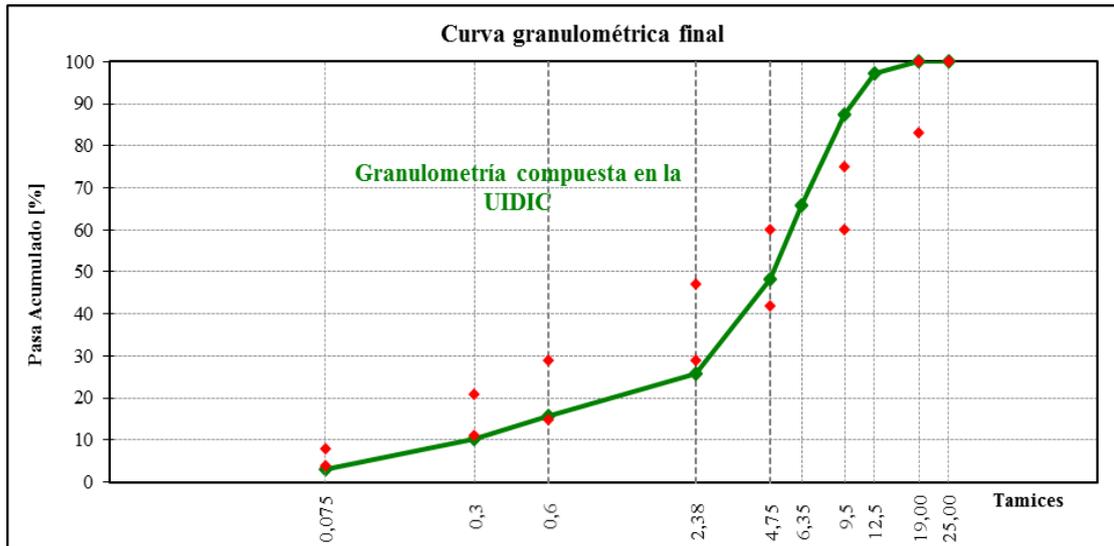


Figura 4. Granulometría de los áridos componentes del Tramo I

Con los porcentajes de la Tabla 6. se moldearon probetas Marshall con 75 golpes por cara, con temperaturas de elaboración y compactación de $167^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $163^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Los resultados promedios de los parámetros volumétricos y mecánicos promedios se detallan en Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros Marshall

| Parámetros Marshall | |
|--|-------|
| Densidad aparente (D_a) [g/cm^3] | 2,257 |
| Rice (D_{Rice}) [g/cm^3] | 2,385 |
| Vacíos totales [%] | 5,3 |
| Vacíos del agregado mineral, VAM [%] | 20,0 |
| Vacíos ocupados por betún, VOB [%] | 73,3 |
| Estabilidad [kN] | 14,2 |
| Fluencia [mm] | 5,6 |
| Relación Estabilidad/Fluencia promedio [kN/mm] | 2,5 |

Los valores de la concentración crítica (C_s) y concentración volumétrica (C_v) del pasa tamiz de $75 \mu\text{m}$ se presentan en la Tabla 8. Permiten relacionar la C_v de filler en el sistema filler/betún en referencia a su C_s . En Argentina este concepto está muy arraigado gracias al Dr. Celestino Ruiz [10]; en el caso de asfalto modificado, este valor es menor o igual a 1,1 [12, 13].

Tabla 8 Parámetros del pasa tamiz $75 \mu\text{m}$ ("filler mix")

| Parámetro | Valor |
|---|-------|
| Pasa Tamiz $75 \mu\text{m}$ (N°200) de fórmula [%] | 3,0 |
| Peso específico del filler mix [g/cm^3] | 2,675 |
| Concentración crítica del filler mix: C_s | 0,36 |
| Asfalto fórmula [%] | 6,5 |
| Concentración volumétrica: C_v | 0,14 |
| Relación C_v/C_s | 0,39 |

Los valores de Modulo de Rigidez se presentan en la Tabla 9; los mismos son promedio de seis determinaciones de tres probetas Marshall. Los valores reportados resultantes corresponden al promedio de las determinaciones obtenidas entre posiciones desfasadas a 90° a una temperatura de 20°C en 5 ciclos con una deformación inducida 5 µm con probetas de diámetro de 10,2 cm y con tiempo de excitación de 124 ms y período de repetición del pulso cada 3 seg con tiempo de reposo: 2752 ms.

Tabla 9. Módulo de Rigidez, Tramo I

| Parámetro | Valor |
|---|-------|
| Espesor [cm] | 6,7 |
| Densidad Aparente Promedio [g/cm ³] | 2,257 |
| Módulo de Rigidez Promedio [MPa] | 3403 |

3.2 Materiales pétreos utilizados Tramo II

Los áridos pétreos que componen la mezcla del Tramo II son un agregado grueso de tamaño máximo 12,5 mm denominado “Gravilla ½”, una arena natural, una especie de arena gruesa denominada “Gravilla 3/16”, y un material fino al que denominamos “Arena Fina”. pero que en realidad tiene mayormente tamaño arena aunque con 22,9% de pasante del tamiz 75 µm (N° 200); fracción ésta que constituye formalmente un verdadero “filler”, con una concentración crítica de 0,3 (similar a un filler calizo), y que participa en sólo el 1,37% en peso sobre el total de áridos, componiéndose el resto del pasante del tamiz 75 µm (N° 200) de la mezcla con el polvo de los otros agregados hasta completar un 6,6% en peso de los áridos totales.

El ligante fue un asfalto modificado con polímeros Betuflex 60-85 (la caracterización del mismo se presentó en las Tablas 5 y 6), en una proporción de 6,3% en peso de la mezcla.

En las Tablas 10, 11 y 12 se presentan las características más relevantes de los materiales pétreos que integran la fórmula de obra del Tramo II, en tanto que en la Tabla 13 se muestran los porcentajes en peso de la mezcla.

Tabla 10. Ensayos realizados sobre el agregado grueso, Tramo II

| Ensayo a realizar | Norma | Gravilla ½ |
|---|-------------|------------|
| Desgaste Los Ángeles [%] | IRAM 1532 | 29,2 |
| Micro – Deval [%] | IRAM 1762 | 15 |
| Elongación [%] | IRAM 1687-2 | 32,6 |
| Lajosidad [%] | IRAM 1687-1 | 12,3 |
| Densidad Relativa real I [g/cm ³] | IRAM 1533 | 2,647 |
| Densidad Relativa aparente I [g/cm ³] | IRAM 1533 | 2,525 |
| Densidad Relativa sss I [g/cm ³] | IRAM 1533 | 2,571 |
| Absorción de agua [%] | IRAM 1533 | 1,8 |
| Polvo Adherido [%] | VN-E.68 | 3,5 |

Tabla 11. Ensayos realizados sobre los agregados finos Tramo II

| Ensayo a realizar | Norma | Arena natural | Gravilla 3/16" |
|---|-----------|---------------|----------------|
| Equivalente de Arena [%] | IRAM 1682 | 49 | 65 |
| Densidad Relativa rea [g/cm ³] | IRAM 1520 | 2,865 | 2,650 |
| Densidad Relativa aparente [g/cm ³] | IRAM 1520 | 2,626 | 2,469 |
| Densidad relativa sss [g/cm ³] | IRAM 1520 | 2,710 | 2,573 |
| Absorción de agua [%] | IRAM 1520 | 3,18 | 2,77 |

Tabla 12. Ensayos realizados sobre el pasa tamiz 75 µm de la "Arena Fina", Tramo II

| Ensayo a realizar | Norma | |
|--|-----------|-------|
| Peso específico aparente de relleno mineral [g/cm ³] | VN-E15-89 | 2,718 |
| Concentración Crítica | IRAM 1542 | 0,30 |

Tabla 13. Composición porcentual de la mezcla en peso, Tramo II

| Porcentaje en peso de mezcla | | | | |
|------------------------------|---------------|---------------|--------|---------------|
| Gravilla 1/2 | Gravilla 3/16 | Arena Natural | Filler | Asfalto 60-85 |
| 45,0 | 15,0 | 28,1 | 5,6 | 6,3 |

La granulometría componente de los agregados pétreos se presenta en Figura 5.

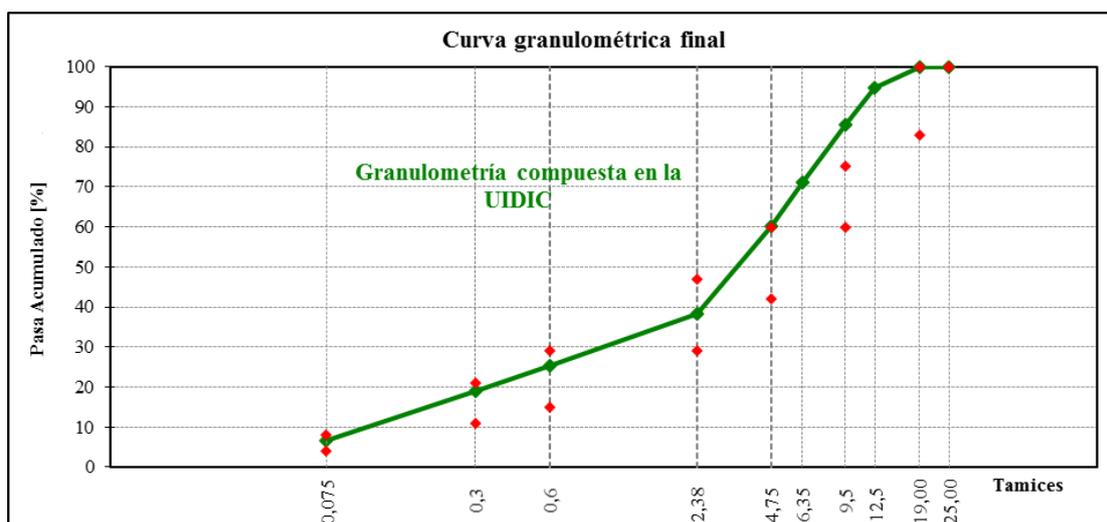


Figura 5. Granulometría de los áridos componentes del Tramo II

Con los porcentajes antes mencionados se moldearon probetas Marshall con 75 golpes por cara y temperaturas de elaboración y compactación de 167°C ± 2°C y 163°C ± 2°C respectivamente; los resultados promedio obtenidos son los que se detallan en la Tabla 14.

Los valores de la concentración crítica y volumétrica del pasa tamiz de 75 µm (N°200) se presentan en la Tabla 15.

Tabla 14. Parámetros Marshall Tramo II

| Parámetros Marshall | |
|--|-------|
| Densidad aparente (Da) [g/cm ³] | 2,288 |
| Rice (D _{Rice}) [g/cm ³] | 2,379 |
| Vacíos totales [%] | 3,8 |
| Vacíos del agregado mineral, VAM [%] | 18,3 |
| Vacíos ocupados por betún, VOB [%] | 79,0 |
| Estabilidad [kN] | 18,4 |
| Fluencia [mm] | 5,2 |
| Relación Estabilidad/Fluencia promedio [kN/mm] | 3,5 |

Tabla 15. Parámetros del pasa tamiz 75 μm (N°200) Tramo II

| Parámetro | Valor |
|---|-------|
| Pasa Tamiz 75 μm (N°200) de fórmula [%] | 6,7 |
| Peso específico del filler mix [g/cm ³] | 2,689 |
| Concentración crítica del filler mix: Cs | 0,29 |
| Asfalto fórmula [%] | 6,3 |
| Concentración volumétrica: Cv | 0,27 |
| Relación Cv/Cs | 0,92 |

Al igual que en el Tramo I, se presentan a continuación los valores de Módulo de Rigidez en la Tabla 16, que también son el promedio de seis determinaciones de tres probetas Marshall.

Tabla 16. Módulo de Rigidez, Tramo II

| Parámetro | Valor |
|---|-------|
| Espesor [cm] | 6,5 |
| Densidad Aparente Promedio [g/cm ³] | 2,287 |
| Módulo de Rigidez Promedio [MPa] | 3651 |

4 Resultados de Ensayos de compresión diametral en probetas Marshall: RTI y módulo dinámico

Presentada la fórmula de obra y sus parámetros, se exhiben a continuación, en primera instancia, los resultados de RTI y módulo dinámico; *a posteriori*, los valores obtenidos de ahuellamiento; finalmente, los resultados de fatiga.

Se analizarán los resultados por tramo y capa para luego hacer un análisis en conjunto de todos los resultados.

4.1 Ensayos sobre testigos de concreto asfáltico

Se reportan los ensayos efectuados sobre testigos de base y carpeta asfáltica, extraídos de los Tramos I y II de la obra. La Figura 6 muestra las densidades de los testigos de ambos tramos y la resistencia a tracción indirecta, y en la Figura 7 se correlaciona el módulo dinámico obtenido mediante la Norma 12697 – con las densidades de todos los testigos.

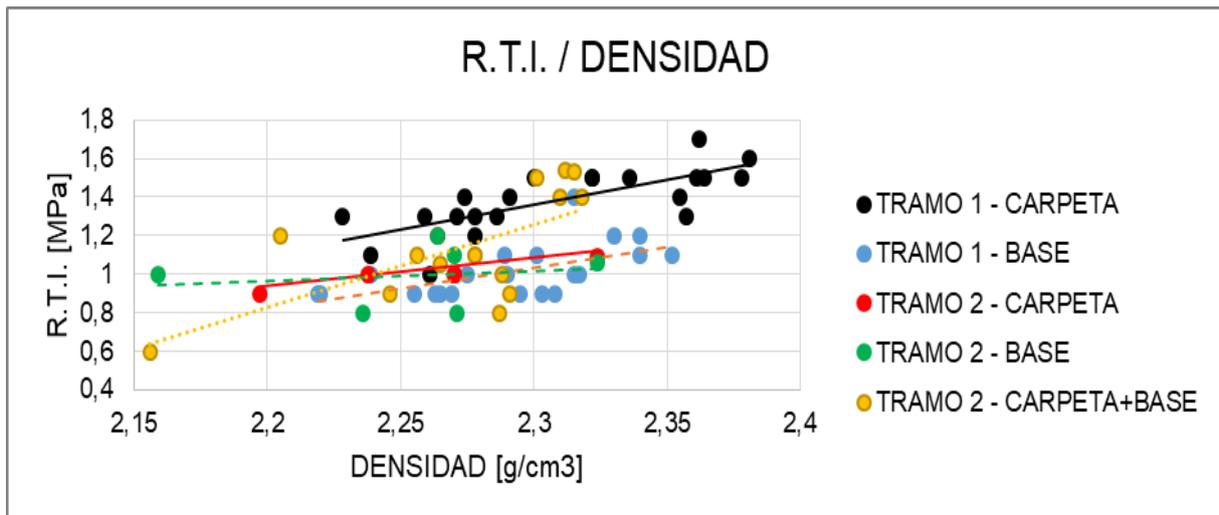


Figura 6. RTI vs densidad de testigos de mezcla asfáltica de los Tramos I y II

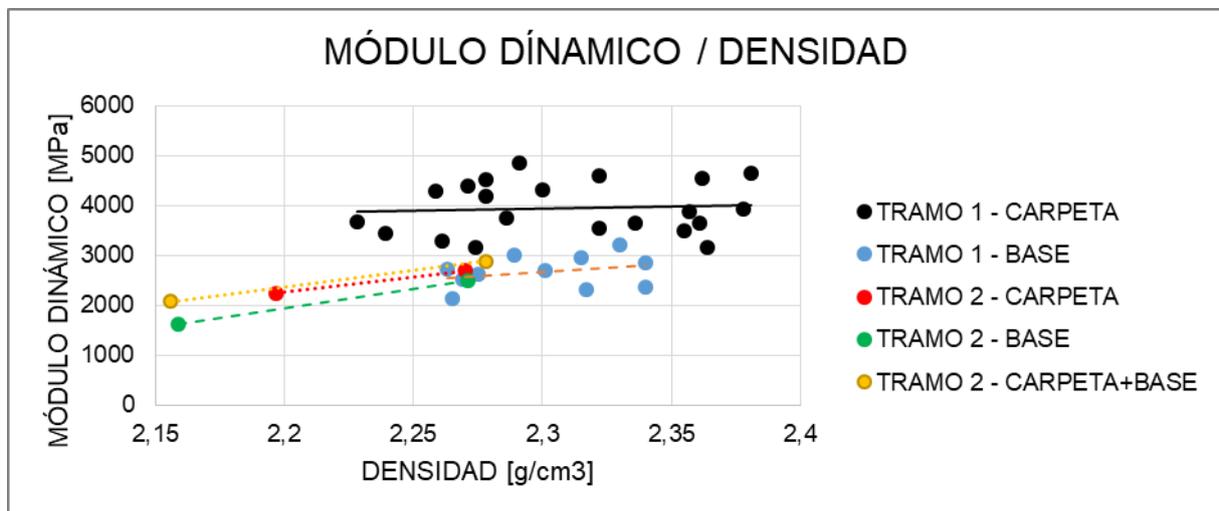


Figura 7. Módulos dinámicos vs densidad de testigos de los Tramos I y II

4.1.1 Tramo I

Testigos de carpeta de rodamiento

Densidades aparentes: se consignan valores muy disímiles, con un máximo de $2,378 \text{ g/cm}^3$ y un mínimo de $2,228 \text{ g/cm}^3$.

Resistencia a tracción indirecta: las RTI varían entre 1,0 MPa y 1,7 MPa.

Módulo de Rigidez: el módulo de los testigos de carpeta fluctúa entre 3161 MPa y 4862 MPa.

En la mayoría de los casos, los sectores con testigos con mayor densidad muestran una tendencia hacia RTI mayores, aunque sin ser valores que se puedan correlacionar fácilmente de forma biunívoca. Utilizando herramientas estadísticas simples, puede descubrirse que el promedio de RTI de los testigos con densidades menores a $2,3 \text{ g/cm}^3$ es de 1,25 MPa; en tanto que los promedios de los testigos con densidades mayores o igual a $2,3 \text{ g/cm}^3$ es de 1,50 MPa.

Los módulos también presentan valores disímiles y dificultosamente relacionables con las densidades o las RTI.

Testigos de base asfáltica

Densidades aparentes: del mismo modo que en la carpeta, se registran valores con marcadas diferencias, con un máximo de 2,352 g/cm³ y un mínimo de 2,219 g/cm³.

Resistencia a tracción indirecta: las RTI varían entre 0,9 MPa y 1,4 MPa.

Módulo de Rigidez: en la generalidad de los casos, el módulo de los testigos de base fue menor que el de la carpeta, fluctuando entre 2132 MPa y 3213 MPa.

Si bien los testigos con mayor densidad arrojaron valores de RTI y de módulos con tendencia a ser superiores, no existe prácticamente una correlación formal entre estos parámetros.

4.1.2 Tramo II

En este tramo se analizaron los testigos de carpeta y de base, y algunos de ellos no fueron separados y se ensayaron en conjunto.

Testigos de "carpeta+base"

Dado que se trata de la misma mezcla de la carpeta y de la base, se considera procedente analizar aquellos testigos que no fueron separados.

Densidades aparentes: se consignan valores muy disímiles, con un máximo de 2,318 g/cm³ y un mínimo de 2,156 g/cm³. Cabe destacar que, en las progresivas en las cuales se ensayaron tanto testigos con ambas capas como testigos con las capas diferenciadas, las densidades guardan razonables similitudes; es decir, las densidades discriminadas de carpeta y de base no difieren sustancialmente entre sí y tampoco con las de los testigos cercanos que abarcan a ambas capas.

Resistencia a tracción indirecta: las RTI varían entre 0,6 MPa y 1,54 MPa. En este tramo, a diferencia del Tramo I, se observa una clara correspondencia entre densidades y RTI de los testigos.

Módulo de Rigidez: el módulo promedio de los dos testigos de carpeta+base ensayados es de 2484 MPa. Ambos valores individuales de ensayos son relacionables con sus densidades.

Testigos de carpeta de rodamiento

Densidades aparentes: se consignan valores muy disímiles, con un mínimo de 2,197 g/cm³ y un máximo de 2,324 g/cm³.

Resistencia a tracción indirecta: las RTI varían entre 0,9 MPa y 1,2 MPa, con una moderada pero sistemática correlación entre densidades aparentes y valores de RTI.

Módulo dinámico: los dos módulos de los testigos de carpeta ensayados arrojaron valores de 2250 MPa y 2700 MPa; cada uno de estos resultados pueden correlacionarse con sus densidades aparentes.

Testigos de base asfáltica

Densidades aparentes: se registran tres valores, con un máximo de 2,271 g/cm³ y un mínimo de 2,159 g/cm³. Tales resultados son congruentes con los obtenidos en los testigos de carpeta+base y de carpeta sola en las mismas ubicaciones.

Resistencia a tracción indirecta: las RTI varían entre 0,8 MPa y 1,2 MPa. En los resultados registrados no existe una correlación manifiesta con las densidades.

Módulo dinámico: en dos testigos de base se ensayaron módulos, obteniéndose valores de 2500 MPa y 1633 MPa; tales resultados guardan correlación con sus densidades aparentes.

Los valores de Módulo de Rigidez de los testigos en todos los casos son inferiores a los valores obtenidos en la dosificación, no ocurre esto en el tramo I donde en la carpeta sí se superan los valores del módulo de la dosificación.

4.2 Ensayos con muestras de placas de pavimento. Hamburgo Test

Los cuatro panes de pavimento asfáltico fueron obtenidos de calicatas practicadas en el pavimento ejecutado. Las muestras se identifican para el presente trabajo como PPT1H1y PPT1H2 para el Tramo I y PPT2H1y PPT2H2 para el Tramo II.

Como se mencionó anteriormente, los ensayos se ejecutaron a 50 °C.

4.2.1 Tramo I

En la PPT1H1, cuya densidad aparente es de 2,276 g/cm³, se registra a 15000 ciclos una Profundidad de Deformación (PMD) de aproximadamente 9 mm; en tanto que para 20000 ciclos, la PMD arroja un valor de 12,45 mm, muy cercano al mínimo exigible. No se registra “punto de quiebre” y por ende tampoco pendiente de zona de peladura, lo cual denota una buena respuesta frente al daño por humedad. La pendiente de zona de creep (PZC) es de 0,00059, valor considerado como aceptable. Se presentan en el Figura 8 los resultados correspondientes a esta muestra.

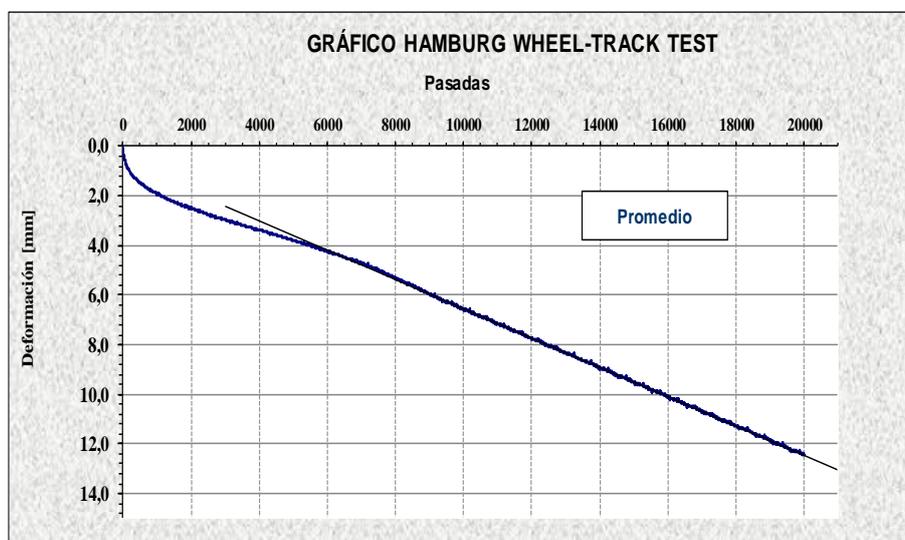


Figura 8. Hamburgo WTT, placa de pavimento PPT1H1

En la PPT1H2, con densidad aparente es de 2,271 g/cm³, se reporta a 15000 ciclos una PMD de aproximadamente 4,2 mm, con una deformación máxima al final del ensayo, en el ciclo 19990, de 6,39 mm. El “punto de quiebre” se registra a 17426 ciclos. La pendiente de zona de peladura fue de 0,00072, en tanto que la pendiente de zona de creep (PZC) fue de 0,00018, valor considerado como aceptable.

4.2.2 Tramo II

En la PPT2H1, cuya densidad aparente es de 2,320 g/cm³, se registra a 15000 ciclos una PMD de aproximadamente 14 mm. Cabe destacar que, a 19966 ciclos, la PMD es de 23,13 mm. El “punto de quiebre” se encuentra a 8820 ciclos, con una profundidad de deformación PQ de 4,58 mm. La pendiente de zona de creep (PZC) es de 0,00032. La pendiente de zona de peladura fue de 0,0017.

En la PPT2H2, cuya densidad aparente es de 2,282 g/cm³, el ensayo se ejecutó hasta el ciclo 9948 debido a que la profundidad de deformación a esa cantidad de

ciclos ya es de 50 mm, que es el espesor total de la muestra. El “punto de quiebre” se registra a 6732 ciclos, con una PQ de 3,67 mm. La pendiente de zona de peladura fue de 0,00061, en tanto que la pendiente de zona de creep (PZC) fue de 0,00027. Se presentan en la Figura 9 los resultados correspondientes a la placa de pavimento (calicata) identificada como B PPT2H2.

El incumplimiento de los parámetros debería atribuirse mayormente a un mal comportamiento frente al daño por humedad, puesto que los valores de profundidad de deformación al momento del punto de quiebre son aceptables.

Para el tramo II es evidente la incidencia del grado de densificación en relación a la respuesta de la mezcla. Si bien ninguna de las dos muestras cumple el mínimo exigido para el punto de quiebre, la de menor densificación lo hace a 6732 ciclos, mientras la más densa lo registra a 8820 ciclos.

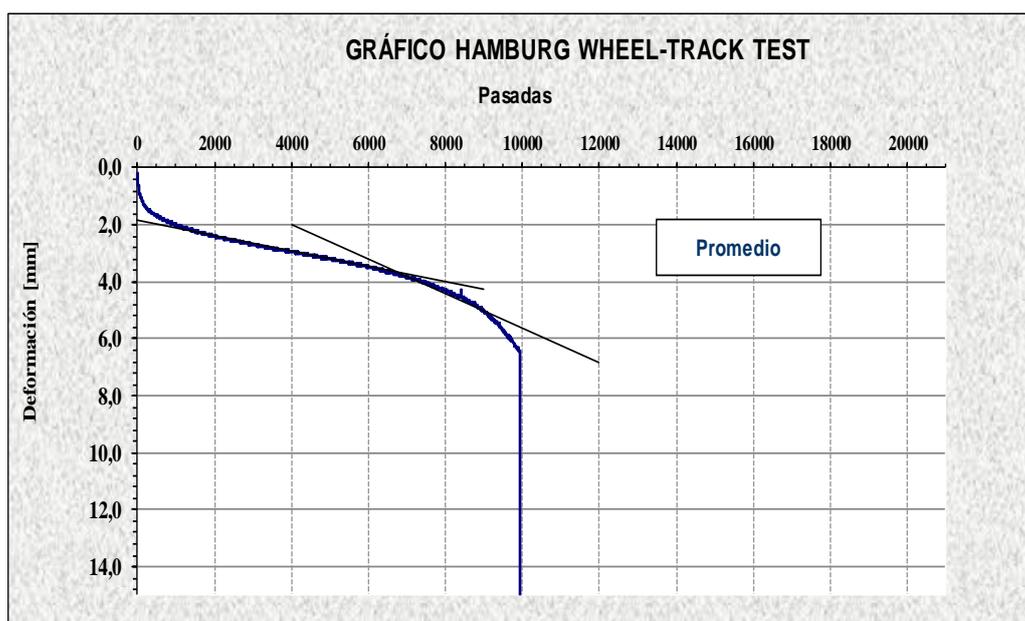


Figura 9. Hamburgo WTT, placa de pavimento PPT2H2

4.3 Fatiga

La muestra consiste en una probeta prismática simplemente apoyada, con cargas en los tercios, dentro de una cámara ambientada a 20°C y un sistema que permite un esfuerzo sinusoidal repetido, que en el caso de estos ensayos fue de una frecuencia de 10 Hz. Al aplicar deformación controlada, la falla queda definida en su forma clásica cuando la carga decrece de modo tal que el Módulo se reduce a un 50% de su valor inicial. Las muestras fueron moldeadas con la dosificación lograda en la fórmula de obra de cada tramo con un equipo de *roller compactor* [13]; dichos especímenes se aserraron para conseguir las vigas prismáticas que preceptúa la norma de referencia, que fueron ensayadas a fatiga en la modalidad de 4 puntos. De los panes del pavimento realizados en el Tramo I, por sus dimensiones, se pudieron obtener, además de las muestras para Hamburgo, probetas para hacer el ensayo de fatiga, por tal motivo solo en este tramo se informa este ítem.

4.3.1 Tramo I

4.3.1.1 Ensayos de Fatiga sobre probeta moldeada en laboratorio

Para la evaluación de la mezcla de este Tramo I se utilizó el ensayo de “Flexión en viga de 4 puntos” (AASHTO T321; UNE-EN 12697-24).

Se aplicaron deformaciones controladas de 230, 300 y 400 $\mu\epsilon$. El número de ciclos en el ensayo con deformación controlada a 300 $\mu\epsilon$ fue de 610.700, y si se toma la curva de tendencia, cuyo coeficiente de correlación fue de 99,7%, sería de poco más de 500.000 ciclos. Se observa que para obtener una vida útil mayor a 10^6 ciclos de carga se debe asegurar una deformación de la fibra inferior de las capas del pavimento que no supere 273,4 $\mu\epsilon$. En la Figura 10 se presenta la Curva de Fatiga con su correspondiente tendencia.

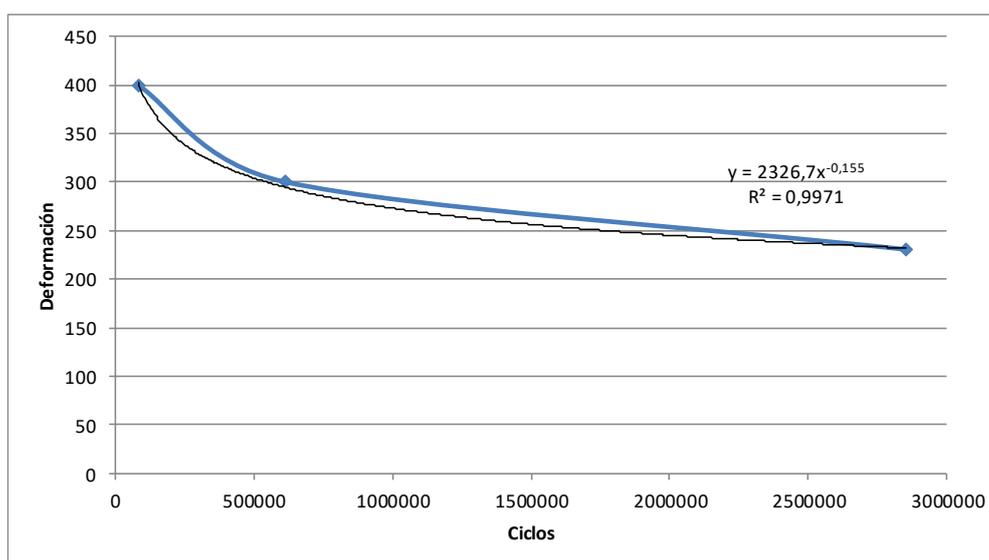


Figura 10. Curva de Fatiga, Tramo I

4.2.1.1 Ensayos de Fatiga sobre muestras de campo

El ensayo de fatiga sobre una probeta prismática obtenida de una muestra del pavimento ofrece resultados razonablemente similares a los obtenidos con probeta fabricada en laboratorio con la mezcla de diseño. Se aplicaron las mismas deformaciones controladas (230, 300 y 400 $\mu\epsilon$). En este caso, el número de ciclos en el ensayo con deformación controlada a 300 $\mu\epsilon$ fue de 454.762, y si se toma la curva de tendencia, cuyo coeficiente de correlación fue de 99,4%, sería de aproximadamente 400.000 ciclos; en tanto que una vida de fatiga de 10^6 ciclos se lograría con una deformación controlada en la fibra inferior de 250,8 $\mu\epsilon$.

Comparando con la probeta fabricada en laboratorio, estos valores de fatiga son razonablemente similares, máxime teniendo en cuenta que el pavimento de la obra ya experimentó un tiempo de servicio. A partir de los ensayos de fatiga efectuados, los resultados logrados denotan una aceptable condición, tanto de la mezcla de diseño como de la realmente ejecutada en el pavimento.

4.2.2 Tramo II

Para las muestras de este tramo se aplicaron deformaciones controladas de 250, 320 y 420 $\mu\epsilon$. De la curva se tiene que el número de ciclos en el ensayo con deformación controlada a 300 $\mu\epsilon$ fue de aproximadamente 1.100.000, y si se toma la curva de tendencia, cuyo coeficiente de correlación fue de 98,27%, sería de unos 800.000 ciclos. Con una deformación controlada en la fibra inferior de 292,1 $\mu\epsilon$ se

logra una vida en fatiga de 10^6 ciclos. La vida de servicio del pavimento del Tramo II es mayor que en el otro Tramo. Las razones deberían atribuirse a que la mezcla está equilibrada, hecho visible en cuanto a su granulometría, a sus parámetros Marshall volumétrico-mecánicos y al módulo resiliente obtenido. En la Figura 11 se presenta la Curva de Fatiga con su correspondiente tendencia del Tramo II.

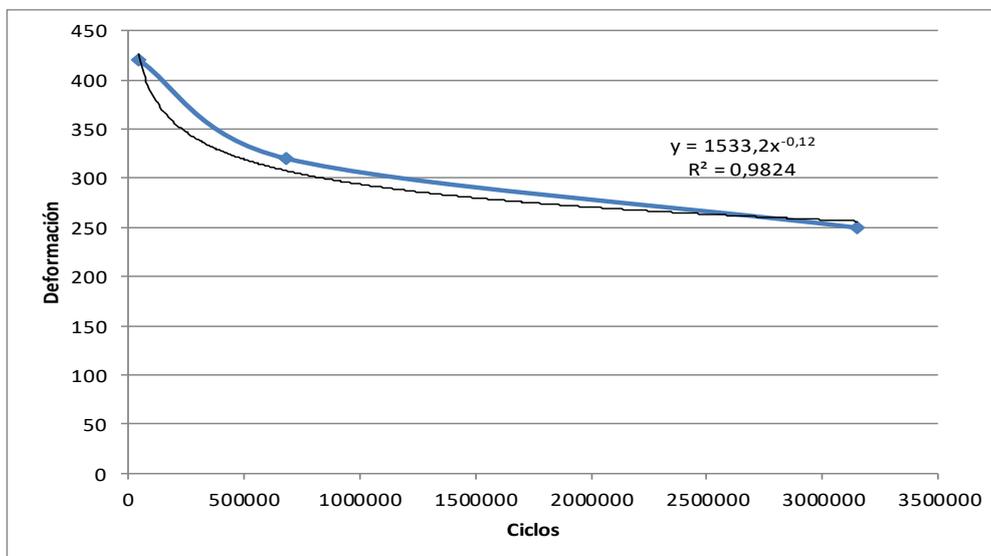


Figura 11. Curva de Fatiga Tramo II.

5 Conclusiones

Se estudiaron dos dosificaciones de mezcla asfáltica para pavimento en la región del altiplano boliviano, con distintos tipos de agregados y un mismo ligante asfáltico; si bien ambas cumplen en general por lo exigido en el pliego de especificaciones siguiendo los criterios de dosificación Marshall, se decidió complementar el estudio mediante la realización de ensayos de desempeño que permitieran tener un mayor conocimiento de las mismas.

La dosificación de la mezcla utilizada en el Tramo I no posee fíller adicionado (de hecho, el material pulverulento pasante del tamiz de $75 \mu\text{m}$ (N°200) es del 3%, que está en correspondencia con el mínimo exigido por el Pliego de Especificaciones Técnicas). Tiene 6.5% de ligante y una granulometría que, en el tamiz de 12mm ($1/2''$), denota un déficit de material grueso y a partir del tamiz 2,38 mm (N° 8) muestra un déficit de finos, según el huso prescripto. Cabe destacar que los agregados presentan alta absorción y que el grueso arrojaba una cantidad de polvo adherido muy superior al que se exige en Argentina, aunque el pliego de especificaciones técnicas de la obra no preceptuaba un valor máximo.

En el Tramo II la dosificación tiene algunas similitudes con el Tramo I, con la salvedad que el pasa tamiz $75 \mu\text{m}$ es superior debido a la adición de un material pulverulento y además la curva granulométrica es más fina. La absorción del agregado grueso es inferior. El tenor de asfalto de la dosificación es de 6,3%.

En el Tramo I, las resistencias a tracción indirecta a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ presentan dispersión y escasa correlación con las densidades. En el Tramo II, mejora tal correlación solamente para los testigos de carpeta+base y de carpeta.

Respecto de los valores de la RTI, si se toman otros pliegos como referencia [14] éstos indican que el valor de la RTI a 15 °C en testigos para mezclas asfálticas densas recicladas en caliente debe ser como mínimo de 1,7 MPa para su aceptación y 1,4 MPa con penalidad. Por otra parte, investigaciones llevadas adelante por la Universidad de Cataluña [15] proponen unas resistencias mínimas a 5 °C para las mezclas de granulometría densa de 2,45 MPa; cabe consignar que con esta temperatura se obtienen, según los mismos autores, buenas correlaciones. La mayoría de los valores de RTI de los testigos ensayados en este trabajo parecerían aceptables si se tiene en cuenta que la temperatura de ensayo fue de 25°C.

Se realizará un análisis solamente de los módulos del tramo I dado que el tramo II la población es muy baja para sacar conclusiones. El módulo dinámico promedio de la dosificación fue de 3403 MPa, valor intermedio a los promedios de los módulos de los testigos de base y carpeta (2676 MPa y 3950 MPa, respectivamente). La diferencia de valores dentro de una misma capa podría obedecer a la ubicación de los testigos respecto del sector de tránsito (huella o entrehuella).

En referencia al ensayo de ahuellamiento en la modalidad HWTT, el pliego no establece exigencias. Para hacer un análisis, se consideran los tres escenarios posibles planteados por el Departamento de Texas (Tabla 1).

Los ensayos realizados sobre las muestras de panes de pavimento para el Tramo I presentan densidades similares en torno a 2,27 g/cm³. Para la primera de ellas, se registran valores aceptables para los tres niveles de exigencia de la Tabla. No se registra “punto de quiebre” y por ende tampoco pendiente de zona de peladura, lo cual denota una aceptable respuesta frente al daño por humedad. En la segunda muestra se cumple con el ahuellamiento, incluso de mejor manera que en la muestra anterior y aunque presenta un “punto de quiebre” a 17426 ciclos, aun así cumple la prescripción para un PG 64 y también para un PG 70.

En el Tramo II las densidades son disimiles entre ambos panes de pavimento (2,320 g/cm³ y 2,282 g/cm³). Para la primera de ellas se registra a 15000 ciclos una PMD (Profundidad de Deformación) de aproximadamente 14 mm, incumpléndose con el requisito recomendado (debería ser < a 12,5 mm). Cabe destacar que, a 19966 ciclos, la PMD es de 23,13 mm. El “punto de quiebre” se encuentra a 8820 ciclos, con una profundidad de deformación PQ de 4,58 mm, no respetando los 10000 ciclos generalmente establecidos como mínimos para un buen comportamiento de la mezcla frente al daño por humedad para el mínimo grado de desempeño exigido (PG 64). En la segunda muestra, de menor densidad, el ensayo se ejecutó hasta el ciclo 9948 debido a que la profundidad de deformación ya es de 50 mm, que es el espesor total de la muestra. El “punto de quiebre” se registra a 6732 ciclos, insuficiente para un buen comportamiento de la mezcla. No cumpliría ninguno de los requerimientos mínimos según la Tabla 1.

Los ensayos de fatiga presentan curvas de tendencias con una buena correlación.

En el Tramo I, muestra de laboratorio, el número de ciclos en el ensayo con deformación controlada a 300 µε fue de 610.700 y para la muestra de campo fue de 454.762; para el Tramo II, recordando que en este caso sólo es muestra de laboratorio, fue de aproximadamente 1.100.000 ciclos. Si se toman las curvas de tendencia, los ciclos serían aproximadamente 500.000, 400.000 y 800.000, respectivamente. En tanto que una vida de fatiga de 10⁶ ciclos se lograría con una deformación controlada en la fibra inferior de 273,4 µε. para muestra de laboratorio y de 250,8 µε para la muestra del pan de pavimento en el Tramo I, y para el Tramo II

dicha deformación controlada sería de 292,1 $\mu\epsilon$. Las diferencias de resultados del Tramo I entre la obra y el laboratorio son del orden del 25% y 34% en relación al número de ciclos. Si se toma la deformación en la fibra inferior, la diferencia es del orden del 9%. El mejor comportamiento a fatiga lo presenta la mezcla del Tramo II.

Como consideración final, a modo de recomendación, debería incluirse en los pliegos ensayos de desempeño para la aprobación de la dosificación, a modo de complemento del método Marshall, y evaluar al menos dos curvas granulométricas distintas para poder optar por la de mejor respuesta predictiva en laboratorio de su comportamiento en servicio.

Referencias

- [1] Control de calidad de mezclas bituminosas mediante el ensayo de tracción indirecta. Un ejemplo de aplicación (Martínez, A, Bianchetto, H.; Nosetti, R.A.; Daguerra, L.).XXIX Reunión del Asfalto, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina, 2000.
- [2] Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak (Elizondo, F.; Ulloa, A.; Badilla, G.). Infraestructura Vial, Vol. 10 Núm. 19 Revista 19, Costa Rica, 2008.
- [3] Norma UNE 12697-23. Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 23. Determinación de Resistencia a Tracción Indirecta de probetas bituminosas, 2004.
- [4] Norma UNE 12697-26. Mezclas Bituminosas. Métodos de Ensayo. Parte 26: Rigidez. 2019.
- [5] Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga (Morea, F.). Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, UNLP, Argentina, 2011.
- [6] ASHTO T 324 - Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). Washington DC, EEUU, 2011
- [7] Test Procedure for Hamburg Wheel-Tracking Test, TxDOT Test Procedure Designation: Tex-242-F, Texas Department of Transportation, Austin, EEUU, 2009
- [8] Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas (Flores, M.; Delgado A.; Garnica, P.; Garcia, E.). Instituto Mexicano del Transporte, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México, 2013.
- [9] Norma UNE 12697-24. Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 24: Resistencia a fatiga. 2007.
- [10] Estudio de los coeficientes de fatiga obtenidos según norma UNE-EN 12697-24 Anexo D (Marrón Fernández, J.; García Carretero, J.; Jiménez Sáez, R.). CEDEX, Madrid, España, 2017.
- [11] Sobre las propiedades mecánicas del sistema filler-betún (Ruiz, C.). Segunda Reunión Anual de la CPA, Argentina, pp. 25-52, 1947.
- [12] Criterios de diseño de mezclas bituminosas para pavimentos tendentes a optimizar su resistencia al envejecimiento. Influencia del tipo de ligante y del relleno mineral (Bianchetto, H.). Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [13] Pliego de Especificaciones Técnicas Generales. Dirección Nacional de Vialidad, Argentina, 2017.
- [14] Norma UNE 12697-33. Mezclas Bituminosas. Métodos de Ensayo. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa. 2007.
- [15] Orden Circular 40/2017 sobre Reciclado de Firmes y Pavimentos Bituminosos. Ministerio de Fomento, España, 2017.
- [16] Empleo del ensayo de tracción indirecta para el control de calidad de la ejecución de mezclas bituminosas (Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A.). X Congreso Iberoamericano del Asfalto, Sevilla, España, 1999.