

EVALUACIÓN DE PARÁMETROS MECÁNICOS Y VOLUMÉTRICOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CONFORMADAS CON ASFALTO MODIFICADO Y RAP

Leonardo M. Pérez Maturano¹, Emiliano Dottori², Oscar Moreno³,
Oscar V. Cordo⁴, Marcelo G. Bustos⁵

¹ Dirección Nacional de Vialidad, 13° Distrito Chubut, lperezmaturano@vialidad.gob.ar

² Dirección Nacional de Vialidad, 13° Distrito Chubut, edottori@vialidad.gob.ar

³ LABIEVI, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, morenoxt55@gmail.com

⁴ EICAM, Universidad Nacional de San Juan, ocordo@eicam.unsj.edu.ar

⁵ EICAM, Universidad Nacional de San Juan, mbustos@eicam.unsj.edu.ar

Resumen

Frente a las notables solicitaciones de tránsito actuales y la inclusión del concepto de carreteras sustentables, surge el desafío de diseñar mezclas asfálticas de alto desempeño que reduzcan al mínimo el impacto negativo sobre el medio ambiente. Una de las prácticas actuales se basa en la aplicación de nuevas tecnologías de materiales para el aprovechamiento del producto generado por fresado en tareas de mantenimiento. Por lo cual resulta factible beneficiarse al máximo de las propiedades de los asfaltos modificados a favor de la utilización de materiales envejecidos como el RAP.

A través de este trabajo se indagó la factibilidad en el uso de material recuperado de fresado en mezclas asfálticas en caliente conformadas con ligante modificado. Se dosificó una mezcla base a la que se le adicionó incrementos porcentuales de RAP y se evaluó el comportamiento de la composición final a raíz de sus propiedades mecánicas y volumétricas.

Como conclusión general, se destaca que el empleo de ligante modificado con polímeros sintéticos en reducidas proporciones permiten un aprovechamiento fructífero del RAP, al aminorar tanto el uso de áridos vírgenes como así también de material bituminoso.

Palabras Clave: RAP, asfalto modificado, material reciclado.

1 Introducción

El RAP (reclaimed asphalt pavement), es un material que día a día es más usado en mezclas asfálticas en frío, pero su manejo se ha hecho de forma empírica, teniendo en cuenta que no se conoce a ciencia cierta las propiedades de éste, ya que es un material muy variable y presenta diferentes características que dependen de diversos factores que influyen en su comportamiento y manejo para la obtención de una determinada mezcla asfáltica nueva.

Cabe destacar que dentro de las problemáticas que existen para el uso indiscriminado de este material, es que los diferentes acopios que existen no siempre provienen de una misma obra, y presentan grandes variaciones en lo que respecta a la calidad y cantidad de los materiales intervinientes como son el agregado pétreo y el tipo de ligante.

La experiencia nacional e internacional marca que la utilización en tareas de mantenimiento de mezclas asfálticas en frío en las que se incorpora RAP, no han mostrado un buen comportamiento a largo plazo en la mayoría de los casos, con resultados satisfactorios sólo en forma reducida en el tiempo, con reaparición de defectos en superficie. Por eso, una alternativa en este modo de operación, es la incorporación de asfaltos modificados con polímeros a mezclas con RAP (reclaimed asphalt pavement). Es sabido que los asfaltos modificados probados en mezclas asfálticas en caliente aportan cualidades que podrían mejorar susceptibilidad térmica, mejor respuesta a los esfuerzos de tracción, y optimización de las propiedades de adherencia [1].

Lo expuesto precedentemente llevó a plantear como objetivo de esta investigación en valorizar el RAP, para utilizarlo en la ejecución de componentes de la estructura o de capas asfálticas en pavimentos con niveles de tránsito elevados de forma tal que se reduzca la utilización de materiales vírgenes y por ende los costos de obra.

2 Metodología desarrollada

Para esta investigación, y en función de toda la recopilación bibliográfica, se desarrolló una metodología para evaluar la incorporación de RAP en una mezcla asfáltica en caliente. La metodología consta de los siguientes pasos, los que serán desarrollados a lo largo de este informe.

Etapa I: Caracterización de los materiales intervinientes, características físico-mecánicas de los áridos, como así también las características del asfalto modificado empleado.

Etapa II: Caracterización del RAP a reemplazar en mezcla patrón, determinación del contenido de asfalto, granulometría del RAP y del árido de recuperación.

Etapa III: Diseño de mezcla patrón, determinación de las características mecánicas y volumétricas para la selección del contenido óptimo de ligante.

Etapa IV: Evaluación volumétrica y mecánica por el método Marshall de mezclas con diferentes contenidos de RAP.

2.1 Caracterización de los materiales

Para la ejecución de la muestra patrón y luego la conformación de las mezclas con diferentes contenidos de RAP, se utilizaron áridos vírgenes (grava, arena y filler) provenientes de la cantera de la obra: "Autovía Trelew – Pto. Madryn sobre la RNN°3".

2.1.1 Áridos

Los áridos utilizados provienen de la trituración de gravas de tamaño superior a 150mm. Los agregados que se utilizaron fueron: grava de trituración 6-19, arena de trituración 0-6, arena zarandeada (no triturada) y carbonato de calcio (filler) (Figura 1).

Para el análisis de los materiales, se toma como referencia las exigencias del pliego de la dirección nacional de vialidad (edición 2017), correspondiente a las especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos. Como se plantea el diseño de mezclas con alto nivel de desempeño, los requisitos que se toman como referencia son los exigidos para una carpeta de rodamiento con un índice de tránsito T1 (alto nivel de sollicitación) [2].



Figura 1. Áridos vírgenes empleados (parte superior; grava triturada 6-19 fraccionada, parte inferior; arena triturada 0-6 fraccionada, arena de zaranda, carbonato de calcio)

El árido grueso empleado es producto de la trituración mediante cono de “piedra bola”, el mismo tiene una gradación entre 6mm y 19mm. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos ejecutados sobre el material pétreo.

Tabla 1. Resultados de ensayos sobre el árido grueso

| Determinación | Unidad | Resultado | Exigencia | Norma |
|--|-------------------|-----------|-----------|-------------|
| Elongación | % | 28,3 | - | IRAM 1687-2 |
| Índice de lajas | % | 24,4 | < 25% | IRAM 1687-1 |
| Coefficiente de desgaste "Los Ángeles" | % | 12,2 | < 25% | IRAM 1532 |
| Polvo adherido | % | 1,0 | < 1,2% | IRAM 1883 |
| Densidad relativa | g/cm ³ | 2,693 | - | IRAM 1533 |
| Densidad aparente | g/cm ³ | 2,657 | - | IRAM 1533 |
| Absorción | % | 0,5 | < 1,2% | IRAM 1533 |
| Caras de fractura | % | 100 | 100% | IRAM 1851 |

Como árido fino se seleccionaron dos arenas, una que es producto de la doble trituración y la otra que es de origen natural zarandeada. Cabe destacar que la elección de este segundo material (arena zarandeada) queda fuera de los límites exigidos por la DNV al requerirse un 100% de material triturado para carpetas de alto tránsito [2]. Sin embargo, en función de las experiencias previas y a raíz de la necesidad de un segundo material corrector que aporte un mayor porcentaje de finos, es que se opta por su utilización. A fin de lograr una granulometría óptima ajustada a los límites impuestos por la repartición.

En la Tabla 2 se pueden observar los resultados de los ensayos ejecutados sobre la arena de trituración.

Tabla 2. Resultados de ensayos sobre arena 0-6

| Determinación | Unidad | Resultado | Exigencia | Norma |
|--------------------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Equivalente de arena | % | 82 | > 50% | IRAM 1682 |
| Relación vía seca - vía húmeda | % | 71 | > 50% | VN E 7-65 |
| Densidad relativa | g/cm ³ | 2,686 | - | IRAM 1520 |
| Densidad aparente | g/cm ³ | 2,596 | - | IRAM 1520 |
| Absorción | % | 1,2 | < 1,2% | IRAM 1520 |

Las características de la arena no triturada (Arena Z.) se pueden resumir en la Tabla 3, en función de los ensayos realizados y las restricciones, se demuestra que la misma se encuentra apta para la utilización en mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 3. Resultados de ensayos sobre arena no triturada

| Determinación | Unidad | Resultado | Exigencia | Norma |
|--------------------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Equivalente de arena | % | 58 | > 50% | IRAM 1682 |
| Relación vía seca - vía húmeda | % | 72 | > 50% | VN E 7-65 |
| Densidad relativa | g/cm ³ | 2,678 | - | IRAM 1520 |
| Densidad aparente | g/cm ³ | 2,560 | - | IRAM 1520 |
| Absorción | % | 1,17 | < 1,2% | IRAM 1520 |

Al ser el RAP por lo general un material con elevado contenido de finos, se corre el riesgo que, al mezclarlo con materiales vírgenes, se genere un mástic (asfalto-filler) de comportamiento rígido y con altas probabilidades de fisuración a bajas temperaturas. En este sentido, y analizando la variada cantidad de fillers que se encuentran en el mercado, se descartan aquellos que colaboran con la rigidez de las mezclas asfálticas. Es por ello que se evita el uso de cal, optando por la implementación de carbonato de calcio, que sirve más como material inerte que de aporte de resistencia [3].

En la Tabla 4 se resumen los resultados de los ensayos ejecutados sobre el carbonato de calcio (polvo mineral).

Tabla 4. Resultados de ensayos sobre filler (carbonato de calcio)

| Determinación | Unidad | Resultado | Exigencia | Norma |
|----------------------------|-------------------|-----------|--|-----------|
| Densidad | g/cm ³ | 2,679 | 2,5g/cm ³ <X<2,8g/cm ³ | IRAM 1542 |
| Granulometría (pasa N°40) | % | 100 | 100% | IRAM 1501 |
| Granulometría (pasa N°100) | % | 100 | > 90% | IRAM 1501 |
| Granulometría (pasa N°200) | % | 99,3 | > 75 | IRAM 1501 |

2.1.2 Material bituminoso

Para la selección del ligante modificado, se tuvo en cuenta el objetivo de la mezcla que se pretende lograr, la cual tiene como prioridad tener un comportamiento para capas de alta prestación. Teniendo en cuenta lo antes mencionado se opta por la utilización de un asfalto del tipo AM3. En la Tabla 5, se presentan las especificaciones técnicas del material bituminoso empleado. Este asfalto surge de la incorporación de polímeros sintéticos de alta calidad.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del asfasol AM3-T

| Ensayos | Unidad | Mín. | Máx. | Norma |
|---|--------|------|------|-----------|
| Penetración 25°C/100g/5seg | 1/10mm | 50 | 80 | IRAM 6576 |
| Punto de ablandamiento | °C | 65 | - | IRAM 6841 |
| Recuperación elástica torsional | % | 70 | - | IRAM 6830 |
| Ensayos sobre residuo de película delgada (RTFOT) | | | | |
| Pérdidas por calentamiento | % | 0 | 0,8 | IRAM 6839 |
| Variación del punto de ablandamiento RTFOT | °C | -5 | 10 | IRAM 6841 |
| Ensayo de estabilidad | | | | |
| Variación del punto de ablandamiento por almacenaje | °C | - | 5 | IRAM 6841 |

2.1.3 RAP

En la provincia de Chubut existen diferentes acopios de RAP debido a las tareas de mantenimiento y rehabilitación de la red vial. El caso de deterioro que se presenta en la mayoría de las rutas nacionales de esta provincia, es de ahuellamiento sobre la calzada, debido al tráfico pesado y las variaciones climáticas. Los acopios seleccionados corresponden al fresado de diferentes secciones de la RN N°3, que fueron ejecutados por diferentes empresas en distintas épocas. Se seleccionaron tres depósitos de RAP y son los que se desarrollaran a lo largo de esta sección. Se eligieron basándose en la diversidad que se presentan a simple vista entre los mismos y por otro lado teniendo en cuenta las razones por las cuales se generaron.

En una primera instancia, se ejecutó una recolección de información de los diferentes acopios de RAP (Figura 2), como así también un análisis granulométrico de

cada uno de ellos. De este modo se pudo determinar el contenido de partículas mayores a 1" y el contenido de material fino adherido o contaminante de los respectivos depósitos de RAP.



Figura 2. Materiales de fresado (izquierda a derecha; RAP-00, RAP-01 y RAP-02)

En la Figura 3 se puede observar el análisis granulométrico de cada depósito de material de fresado.

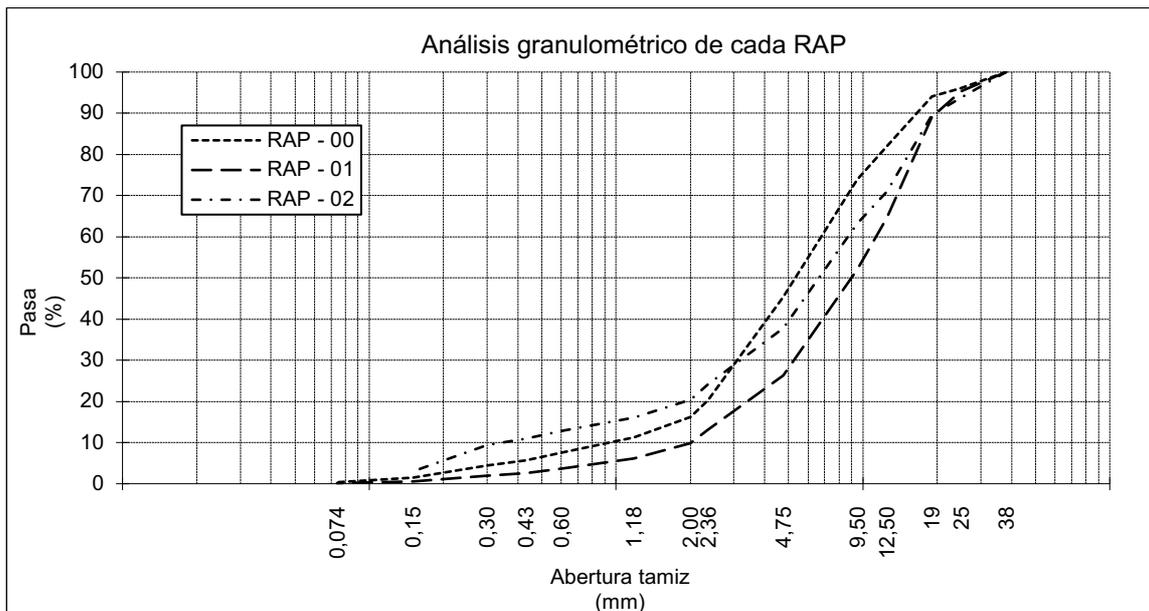


Figura 3. Granulometría de los diferentes materiales de fresado

En cuanto a la recopilación de información, todos los materiales tienen origen del doble fresado de carpeta, con una profundidad de 2cm en cada pasada. El primer caso (RAP – 00) tiene origen debido al ahuellamiento de la calzada, el otro (RAP – 01) se fresó en toda una zona que se encontraba con problemas de fricción debido a la exudación sobre la superficie de la calzada y en el último caso (RAP – 02), se ejecutó esta tarea de mantenimiento por causa de fisuración sobre la carpeta. Siendo esta última, la carpeta de rodamiento más antigua, ya finalizando su vida útil.

A cada una de las muestras de RAP, se las identificó en base a su granulometría y contenido de cemento asfáltico. En la Tabla 6 se presentan las características reológicas del ligante que compone cada muestra.

Tabla 6. Resultados de los ensayos ejecutados sobre los ligantes recuperados

| Denominación | C.A. (%) | Penetración (mm) | Retenido de penetración (%) | Viscosidad 60°C (Pas) | Viscosidad 135°C (cPas) |
|--------------|----------|------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| RAP - 00 | 4,70 | 3,20 | 45,7 | 20594,9 | 972,6 |
| RAP - 01 | 5,41 | 3,60 | 51,4 | 18020,0 | 851,0 |
| RAP - 02 | 5,63 | 3,00 | 42,8 | 21882,4 | 1033,4 |

En la Figura 4 se puede observar la granulometría de los áridos recuperados, correspondientes a cada material de fresado.

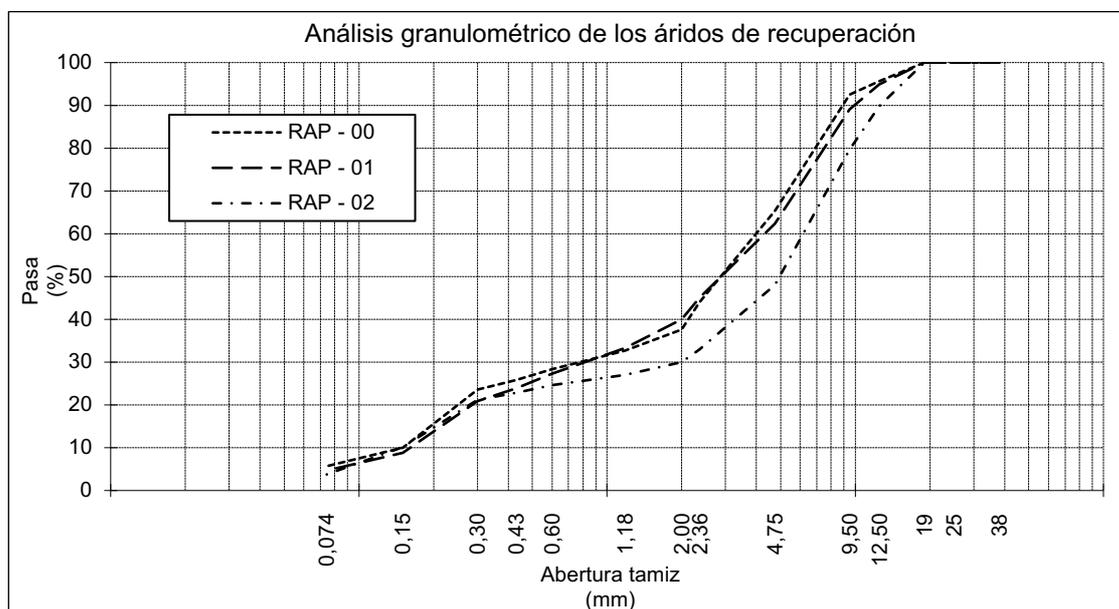


Figura 4. Granulometría de los diferentes materiales de fresado

2.2 Diseño de mezcla patrón

Para estudiar la influencia del porcentaje de asfalto y el efecto de la incorporación del RAP en el comportamiento mecánico, volumétrico y por desempeño en mezclas asfálticas en caliente, se realizó inicialmente el diseño de una mezcla del tipo densa en caliente con materiales vírgenes, para un alto índice de tráfico y de uso en carpeta de rodamiento, obteniendo el porcentaje óptimo de asfalto con el análisis de la

resistencia a la deformación plástica mediante el aparato de Marshall y las propiedades volumétricas. Se tuvo de este modo un punto de comparación para las mezclas asfálticas con adición de RAP.

Se ejecutó el diseño de mezcla para una gradación de agregados de acuerdo al pliego de especificaciones técnicas generales de la dirección nacional de vialidad para concretos asfálticos en caliente del tipo densos.

2.2.1 Diseño de curva mezcla

En función de los análisis granulométricos de los áridos (incluido el filler), que se presentaron en el apartado anterior, se procedió al diseño de la curva mezcla. Para ello se tomó como referencia la media de los usos granulométricos impartidos por la dirección nacional de vialidad. Mediante el uso de aproximaciones por diferencias cuadráticas, se generó la curva mezcla que se muestra en el Figura 5.

Para la confección de esta mezcla se tuvo especial cuidado en el porcentaje de arena no triturada, de forma tal que el contenido solo fuera para corregir la granulometría final y no tuviera una gran incidencia. En resumen, quedó una mezcla compuesta por: 49% de Triturado 6-19, 40% de arena de trituración 0-6, 8% de arena no triturada (arena z.) y un 3% de filler (carbonato de calcio).

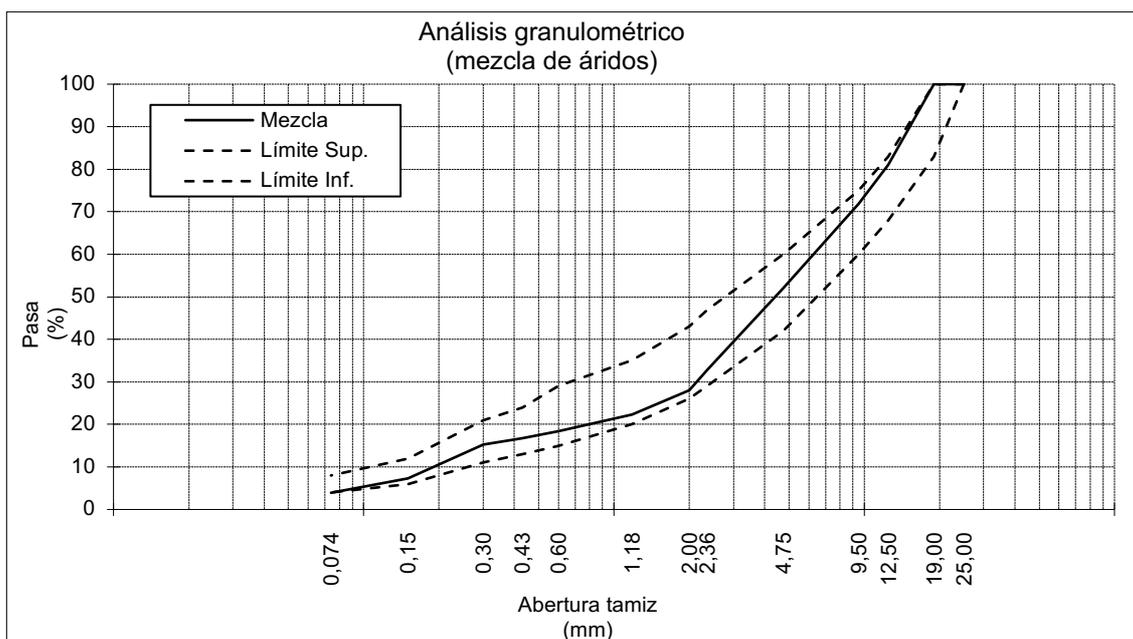


Figura 5. Granulometría final de la mezcla de áridos y husos granulométricos correspondientes a un tamaño máximo nominal de 19mm según el pliego de la DNV

2.2.2 Determinación de contenido de asfalto

En función de características volumétricas (densidad, vacíos de aire, relación betún - vacíos y vacíos del agregado mineral) y mecánicas (estabilidad, fluencia y la relación de estas dos), se adoptó un contenido de asfalto óptimo de 4,9%. En la Tabla 7 que se muestra a continuación se puede apreciar los valores obtenidos, los cuales sirven como punto de referencia para comparar la influencia del RAP en esta mezcla.

Tabla 7. Resultados del análisis volumétrico y mecánico de la muestra patrón con 4,9% de C.A.

| Determinación | Unidad | Resultado | Exigencia |
|---------------------------------|-------------------|-----------|-----------------|
| Estabilidad | kg | 1716,6 | > 1019,7 |
| Fluencia | 1/10mm | 39,5 | - |
| Relación estabilidad - fluencia | kg/cm | 4342,3 | 2549,3 - 4588,7 |
| Densidad | g/cm ³ | 2,353 | - |
| Vacios en la mezcla | % | 4,4 | 3,0 - 5,0 |
| Vacios del agregado mineral | % | 15,9 | > 14,0 |
| Relación betún-vacios | % | 72,4 | 65,0 - 75,0 |

2.3 Mezclas con incorporación de RAP

Para poder evaluar el comportamiento de la incorporación del RAP en una mezcla asfáltica virgen, es de suma importancia la determinación de los parámetros volumétricos y mecánicos como se menciona en diferentes métodos. En un principio depende de estos factores el comportamiento futuro de la carpeta de rodamiento a emplear.

Debido a que se trata de un material complejo, las fluctuaciones que se pueden generar en el material, no tienen un comportamiento que sigue los lineamientos de las mezclas convencionales en caliente. El proceso de diseño puede variar dependiendo especialmente del contenido de asfalto y el estado del mismo.

Para el diseño de la mezcla se tuvo en cuenta la metodología de dosificación por el método de Marshall, generando modificación en la confección de las probetas. De forma tal, que el calentamiento del ligante del material de fresado no sufra un mayor envejecimiento.

En función de los contenidos de asfalto determinados en el apartado anterior y el análisis bibliográfico se seleccionó uno de los RAP a incorporar. Como objetivo de esta tesis se tiene la incorporación progresiva de material de fresado para evaluar su influencia en la mezcla patrón ya ejecutada, es por ello que teniendo en cuenta el contenido óptimo de asfalto (4,9%) de dicha mezcla se selecciona un material que contenga un porcentaje de betún que sea lo más próximo a este. Con el fin de no modificar significativamente el porcentaje de ligante en las mezclas y de este modo poder evaluar el conjunto y la influencia de cada uno de los elementos intervinientes en la composición. Es por ello que se selecciona el RAP-00, como material a incorporar.

Teniendo en cuenta las experiencias de otros autores, los contenidos de asfalto de los materiales de reciclado restantes no resultan de aceptabilidad para la incorporación en una mezcla virgen, sino que en función de la granulometría se debe corregir mediante la implementación de árido virgen y satisfacer la demanda de asfalto. Todo esto escapa al objetivo de esta tesis, ya que de este modo solo se podría conseguir un solo contenido de RAP y no se podría estudiar mayores o menores incorporaciones.

Para el diseño de la mezcla se consideró la incorporación progresiva de RAP, con contenidos del 25%, 50% y 75%. Siendo los dos primeros aceptables de acuerdo al pliego de la DNV y el último escapando de dichos límites. Se descarta la evaluación de un 100% debido a que el análisis del comportamiento escapa de los objetivos de esta tesis, debido a que para el análisis del material seleccionado solo se necesita de la incorporación de asfalto como elemento rejuvenecedor.

2.3.1 Granulometría combinada

La incorporación del material de fresado genera diferentes modificaciones en la estructura de la muestra patrón que se tiene como referencia, una de ellas es el esqueleto granular que compone el conjunto. En la Figura 6 se puede observar cómo varía la granulometría en función del porcentaje incorporado.

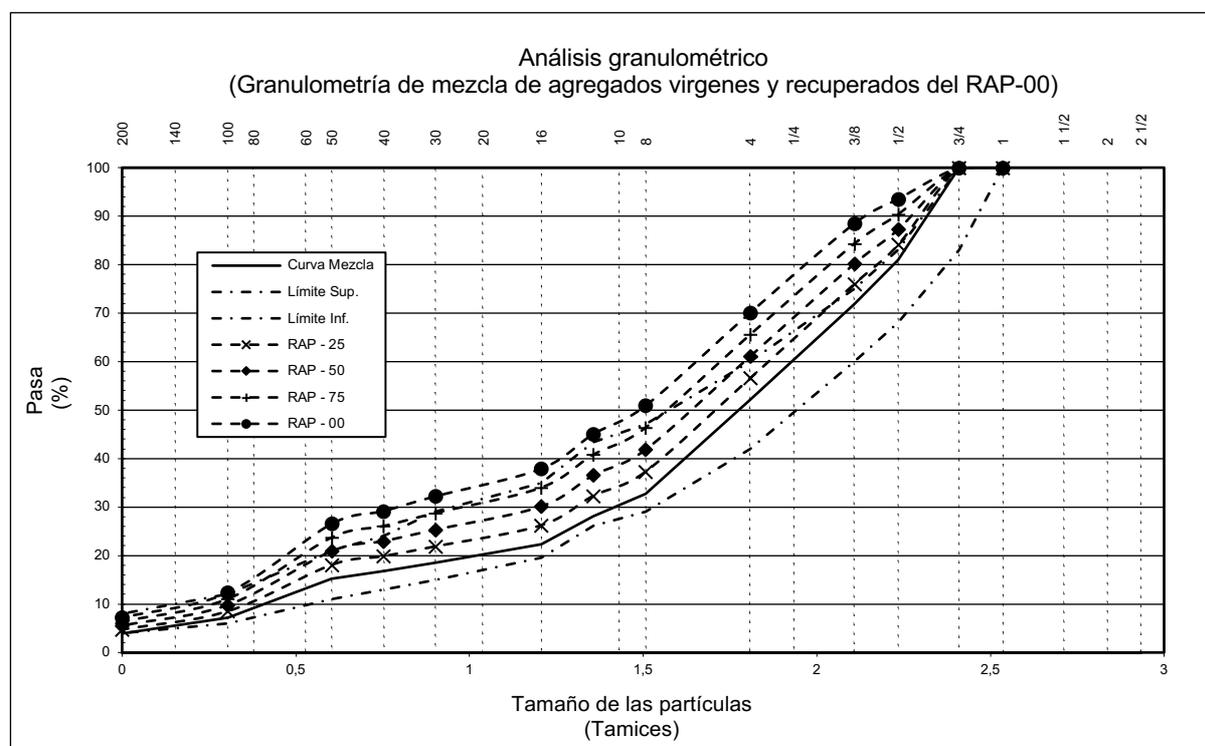


Figura 6. Granulometrías correspondientes a distintos contenidos de RAP - 00

En función del aumento del contenido de RAP, la curva de la muestra de referencia se vuelve más fina tendiendo hacia arriba. Se puede apreciar que contenidos superiores al 75%, escapan del límite superior de los husos granulométricos de la DNV y en ningún caso se encuentran por debajo del límite inferior. Por otro lado, se puede observar que de forma análoga, a mayor incorporación es menor la probabilidad de segregación del material pétreo en las mezclas asfálticas.

2.3.2 Reología combinada

La determinación de la calidad del asfalto va ligado al comportamiento reológico que tiene, por ende, esto tiene una gran influencia en las mezclas que se ejecuten, dentro de las características físico mecánicas como por desempeño. Es por eso que se

ejecutaron mezclas de los diferentes asfaltos correspondientes con el porcentaje de inferencia de cada uno de ellos (Figura 7).



Figura 7. Análisis reológico de la combinación de asfaltos (parte superior izquierda; ensayo de recuperación elástica torsional, derecha; ensayo de viscosidad Brookfield, parte inferior; muestras de asfaltos combinados)

Debido a que la mezcla está conformada por dos asfaltos totalmente distintos, en lo que compete a la reología, se determinó la influencia del ligante modificado sobre el rejuvenecimiento del betún envejecido mediante la determinación de la viscosidad Brookfield, y de este modo poder determinar las características reológicas del conjunto. Por otro lado, como la viscosidad no es una de las propiedades más influyentes en lo que respecta a los asfaltos modificados, se ejecutó el ensayo de recuperación elástica torsional, con el objetivo de evaluar la pérdida de elasticidad por la incorporación del ligante envejecido.

Las experiencias demuestran en la reología de la combinación, que los asfaltos modificados con elastómeros de estireno-butadieno tipo SBS incrementan el reforzamiento cuando se comparan frente al asfalto virgen. Particularmente, cuando se va incrementando la concentración de polímero, lo anterior se traduce en mayores módulos de corte reológico y menores valores de penetración.

El asfalto contenido en el RAP es un material envejecido que ha perdido en gran medida los componentes de la fracción aromática y se ha enriquecido de asfaltenos y resinas, esta última fracción posiblemente atribuida a la oxidación con el tiempo. Las combinaciones del asfalto presente en el RAP con el asfalto modificado hacen una sinergia conjunta que refuerza en mayor medida al asfalto resultante, y que es mucho

mayor que si se compara la combinación de solo uno de estos materiales en mezcla con el asfalto virgen convencional [4].

En la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos para cada uno de los ensayos ejecutados sobre las diferentes mezclas de ligantes.

Tabla 8. Resultados de los ensayos ejecutados sobre las diferentes combinaciones de ligantes (recuperado del RAP-00 y AM3-T)

| Características | Unidad | Combinación de asfaltos | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | Asf. env. | Asf. mod. | Asf. env. | Asf. mod. | Asf. env. | Asf. mod. | Asf. env. | Asf. mod. | Asf. env. | Asf. mod. |
| | | - | 100% | 25% | 75% | 50% | 50% | 75% | 25% | 100% | - |
| Viscosidad a 135°C | cPas | 308,0 | | 410,4 | | 550,8 | | 616,9 | | 972,6 | |
| Recuperación elástica torsional | % | 83,2 | | 62,4 | | 52,3 | | 21,2 | | - | |

3 Determinación y análisis de los parámetros volumétricos y mecánicos

3.1 Proceso de dosificación

Para el proceso de dosificación y confección de las probetas, se tuvo especial cuidado en la forma de manipular el RAP, de forma tal que no se sometiera a un sobre calentamiento y por otro lado que la incorporación del mismo respetara la granulometría antes analizada.

Se fraccionó el RAP en diferentes tamices respetando la granulometría del mismo, y se los colocó en diferentes recipientes, respetando el peso correspondiente para cada incorporación, en función del peso total de la mezcla.

Al igual que en el proceso convencional ejecutado en laboratorio según las normativas de la dirección nacional de vialidad, se confeccionaron los pastones con los áridos vírgenes y se los dejó durante un lapso de 24 horas a 110°C.

Previo a la mezcla de los componentes, se dejaron los pastones de RAP en estufa a 150°C durante una hora. Del mismo modo se llevó a temperatura el ligante modificado en otro horno.

En primer lugar, se combinaban a temperatura los componentes vírgenes hasta lograr una mezcla homogénea, luego se le incorporó el RAP a temperatura y se batió hasta lograr el pastón deseado, asegurando la correcta incorporación y disolución del ligante de este último en el conjunto.

La mezcla una vez que alcanzó el rango de temperatura deseado (155°C a 160°C) se colocó en un molde precalentado y se la compactó mediante 75 golpes de cada lado.

Luego de 24hs se desmoldó y se continuó con la determinación de pesos y la ejecución del ensayo de estabilidad y fluencia Marshall.

Todo el procedimiento desarrollado se ejecutó para la confección de doce probetas por cada contenido de RAP, las cuales se destinaron para la determinación de los diferentes parámetros.

3.2 Parámetros volumétricos

Se determinaron los parámetros volumétricos de todas las probetas con distintos porcentajes de incorporación de RAP. En la Tabla 9 se muestran los valores medios como resultado de los ensayos ejecutados.

Tabla 9. Parámetros volumétricos resultantes de la incorporación de RAP

| Determinación | Unidad | Muestra | | | Exigencia |
|-----------------------------|-------------------|----------|----------|----------|-------------|
| | | RAP - 25 | RAP - 50 | RAP - 75 | |
| Densidad | g/cm ³ | 2,332 | 2,376 | 2,371 | - |
| Vacíos en la mezcla | % | 5,2 | 3,4 | 3,6 | 3,0 - 5,0 |
| Vacíos del agregado mineral | % | 16,5 | 14,8 | 14,9 | > 14,0 |
| Relación betún-vacíos | % | 68,5 | 76,9 | 75,6 | 65,0 - 75,0 |
| Contenido de asfalto | % | 4,85 | 4,80 | 4,75 | - |

Como se puede apreciar los valores obtenidos en algunos casos escapan significativamente de las exigencias impartidas por el pliego de la DNV.

3.2.1 Análisis de resultados

Como se puede observar en la tabla antes expuestas, el comportamiento que presentan las mezclas con la incorporación de RAP, están totalmente vinculadas. En función del aumento en el contenido de RAP, se puede apreciar que tanto los vacíos de aire como los del agregado mineral disminuyen y de forma inversa la densidad como la relación betún vacíos.

Se podría decir que, en función de la granulometría, el aumento del contenido de RAP se vuelve más fina y por ende con un aumento en su contenido de vacíos, esto se puede observar mediante el análisis de la recta de Fuller (Figura 8). Donde se puede apreciar que el conjunto de rectas se encuentra en gran parte por encima de la recta patrón. Esto se puede traducir en que las partículas que ocupaban un cierto espacio, debido al aumento de RAP, dicho espacio fue ocupado por un conjunto de partículas más pequeñas, y de este modo aumentó el espacio entre ellas y dispersó el resto de partículas superiores.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado y que análogamente, el contenido de asfalto total en la muestra disminuye respecto al aumento de RAP, se puede estimar que el contenido de vacíos de aire y del agregado mineral aumenta. Pero en las gráficas correspondientes a los resultados obtenidos sucede de forma contraria, es por ello que la hipótesis anterior se descarta.

La posible explicación a este fenómeno, se lo puede adjudicar a la presencia de un alto contenido de filler en el mástic del RAP, de manera tal que el incremento del contenido de este último material, aumenta el contenido de filler en la mezcla. Por lo tanto se generaría una disminución en los espacios vacíos de la mezcla y de esta forma se vuelve más densa y por ende más cerrada. De este modo da lugar a una coherencia en los resultados obtenidos.

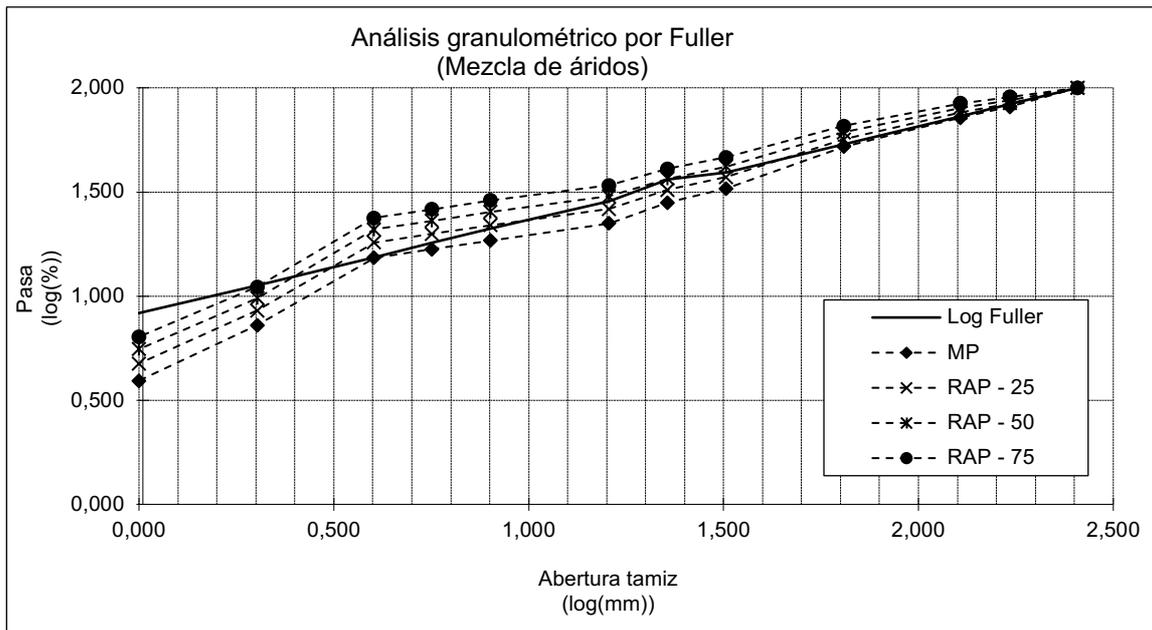


Figura 8. Análisis granulométrico por Fuller de las mezclas de áridos

3.3 Parámetros mecánicos

Un grupo de tres probetas de cada contenido de RAP se colocaron en un baño termostático a 60°C y luego se las sometieron al ensayo de estabilidad y fluencia Marshall.

Como resultado de los ensayos mecánicos ejecutados a continuación, se presentan las siguientes gráficas obtenidas (Figura 9, 10, 11), donde se puede observar cómo varían los valores de los correspondientes parámetros evaluados en función del contenido de RAP.

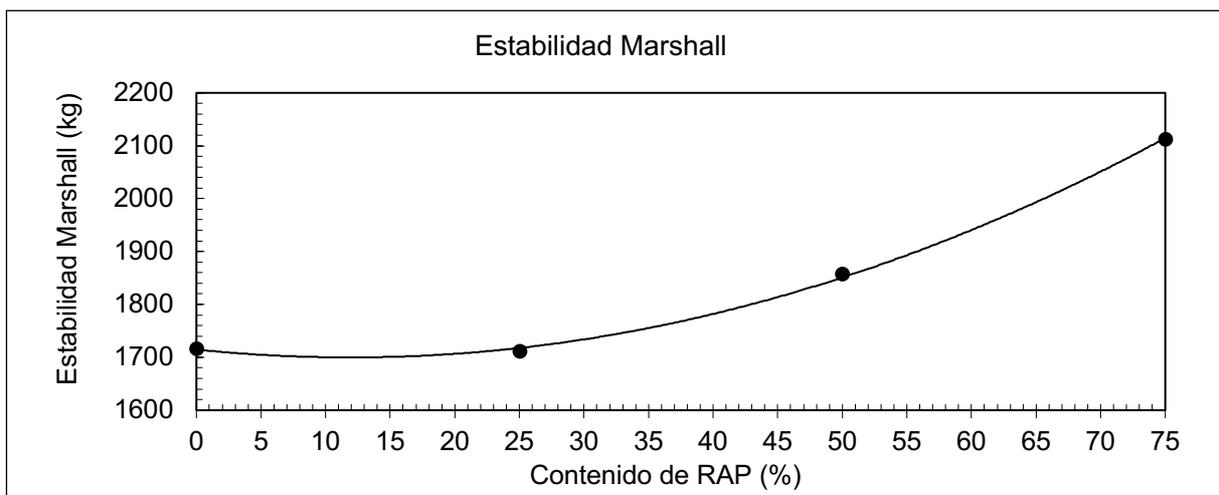


Figura 9. Estabilidad Marshall vs. contenido de RAP

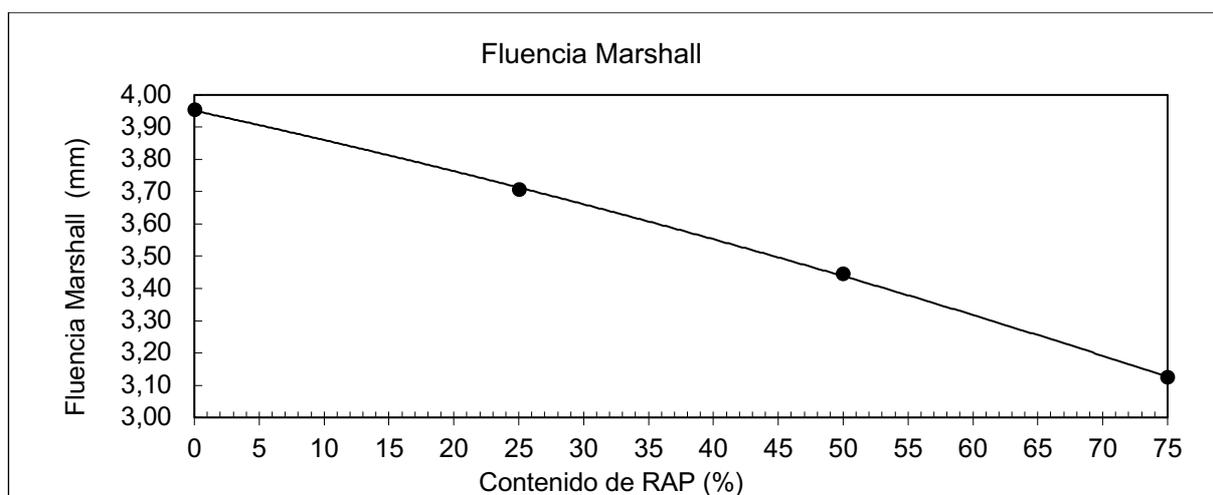


Figura 10. Fluencia Marshall vs. contenido de RAP

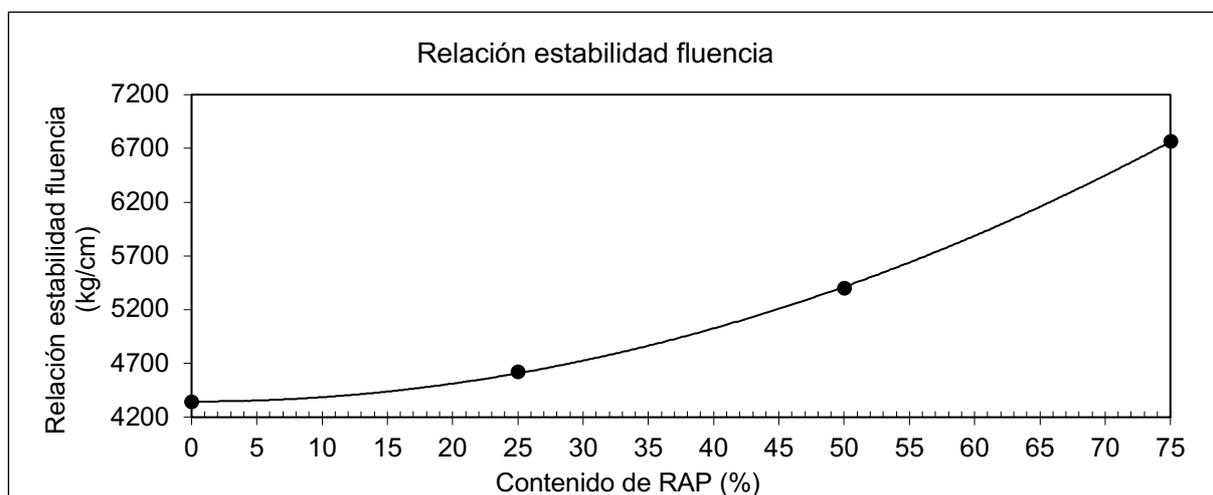


Figura 11. Relación estabilidad-fluencia vs. contenido de RAP

Los resultados de los ensayos de estabilidad y fluencia Marshall obtenidos se presentan en la Tabla 10. Se puede observar que existen valores que escapan significativamente de las exigencias impartidas por la normativa.

Tabla 10. Parámetros mecánicos resultantes de la incorporación de RAP

| Determinación | Unidad | Muestra | | | Exigencia |
|---------------------------------|--------|----------|----------|----------|-----------------|
| | | RAP - 25 | RAP - 50 | RAP - 75 | |
| Estabilidad | kg | 1711,7 | 1856,8 | 2112,3 | > 1019,7 |
| Fluencia | 1/10mm | 37,1 | 34,4 | 31,2 | - |
| Relación estabilidad - fluencia | kg/cm | 4622 | 5399,5 | 6765,9 | 2549,3 - 4588,7 |
| Contenido de asfalto | % | 4,85 | 4,80 | 4,75 | - |

3.3.1 Análisis de resultados

Para poder explicar el comportamiento que experimentan las mezclas con el aumento progresivo de RAP, primero nos vamos a remitir al comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas cerradas por el ensayo de estabilidad y fluencia.

Se puede definir a una mezcla asfáltica como un conjunto de partículas del agregado mineral hacinadas y recubiertas por películas del medio ligante constituido por la mezcla de filler – betún (máscic). El volumen de este debe ser siempre mayor al volumen de vacíos del filler, el que queda formando parte de las películas que recubren a los agregados gruesos y finos.

En el proceso de compactación por el método Marshall, los esfuerzos producidos por el cilindro y posteriormente por el tránsito determinan un deslizamiento de las partículas del agregado que conduce a un arreglo cerrado. En las zonas de contacto entre partículas, dichos esfuerzos producen el fluir del sistema ligante hacia los vacíos del agregado, con el consiguiente adelgazamiento de las partículas del ligante. Este ocupa así parte del volumen de los vacíos, el resto está ocupado con aire y constituye el vacío de la mezcla compactada.

En una mezcla correctamente proporcionada, el ligante queda formando un medio continuo en la estructura final. En los puntos y superficies de contacto entre las partículas del agregado, las películas pueden llegar a ser suficientemente delgadas, en el cual tienden a comportarse como un cemento rígido cohesivo, en la superficie interior de los vacíos las películas son de mayor espesor y su comportamiento bajo esfuerzos es esencialmente viscoso. Un exceso de fracciones intermedias cambia la estructura del esqueleto granular y las partículas del conjunto y las partículas de mayor tamaño quedan suspendidas en el interior de la estructura más fina. Este es el caso de las mezclas tipo “topeka” o “stone filled sheet – asphalt”.

El comportamiento de las mezclas asfálticas cerradas compactadas frente a los esfuerzos deformantes corresponde a los esfuerzos que representan los materiales en estado plástico. Se trata de un estado intermedio entre el sólido rígido y el líquido, se caracteriza porque el material con esfuerzos de corte suficientemente bajos sufre deformaciones pequeñas no permanentes, en cambio con esfuerzos superiores a cierto límite (fluencia) cambia de forma irreversiblemente sin rotura y puede llegar hasta la misma si el esfuerzo o el tiempo de aplicación es suficientemente elevado.

Para producir la deformación permanente del sistema, llamada fluencia plástica, es necesario que la componente tangencial o de corte, derivada del esfuerzo aplicado, venza en los planos de deslizamiento los esfuerzos de atracción o cohesivos que puedan existir entre las partículas y produzca luego un deslizamiento de unas respecto de otras, a lo que se opone la resistencia friccional en las zonas de contacto y la resistencia viscosa del fluido que ocupa el espacio libre de partículas y está adherido a las mismas.

En un sólido plástico la relación entre el volumen de las partículas y el del espacio libre entre ellas (razón de vacíos) determina el grado de entrecruzamiento o arreglo de las mismas, vale decir su geometría interna (Figura12).

El esqueleto granular de las mezclas asfálticas como todo sistema granular compactado confinado por el medio exterior o por un material cohesivo con partículas trabadas entre sí, particularmente cuando son de forma angular, resiste las cargas aplicadas hasta cierto límite movilizand o su fricción estática con pequeños movimientos y/o deformaciones reversibles de las partículas dentro de las posición de

equilibrio del conjunto, como si estuvieran unidas por bisagras que les permiten, pero a su vez, evitan el desplazamiento de una partícula con respecto a las otras. Superando cierto nivel de carga, la estructura granular se afloja por aumento del volumen (dilatancia) o bien por rotura de los puntos o superficies de contacto entre las partículas si la dureza del material lo permite [5].

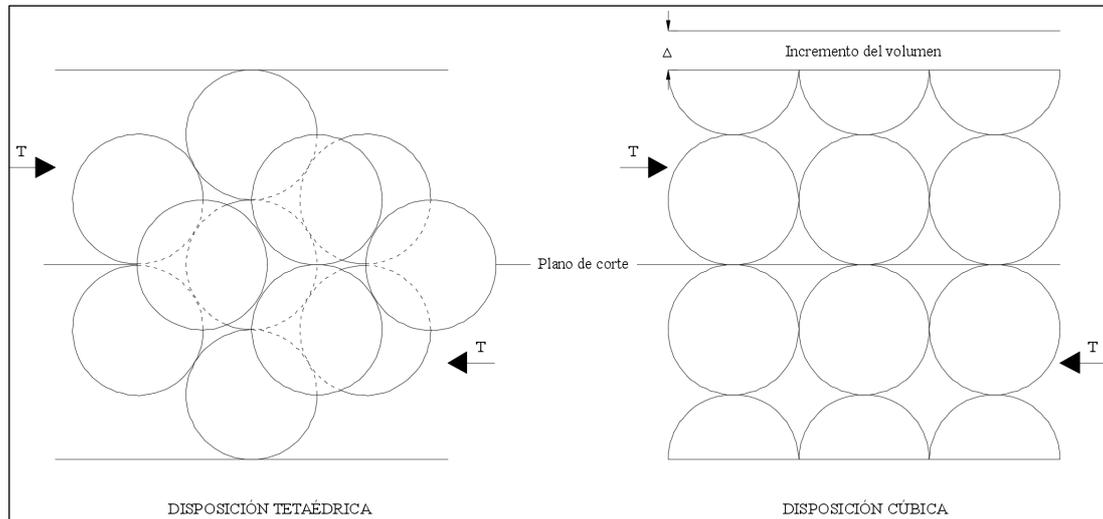


Figura 12. Estructura densa y suelta de un sistema de esferas iguales de cualquier diámetro. Fuente: adaptado de Celestino L. Ruíz [5]

En el estudio presente, se generan dos hipótesis teniendo en cuenta, por un lado, el comportamiento a las deformaciones debido a esfuerzos de corte generados por el esqueleto granular y por otro lado la influencia del asfalto modificado en la conjunción con el ligante envejecido.

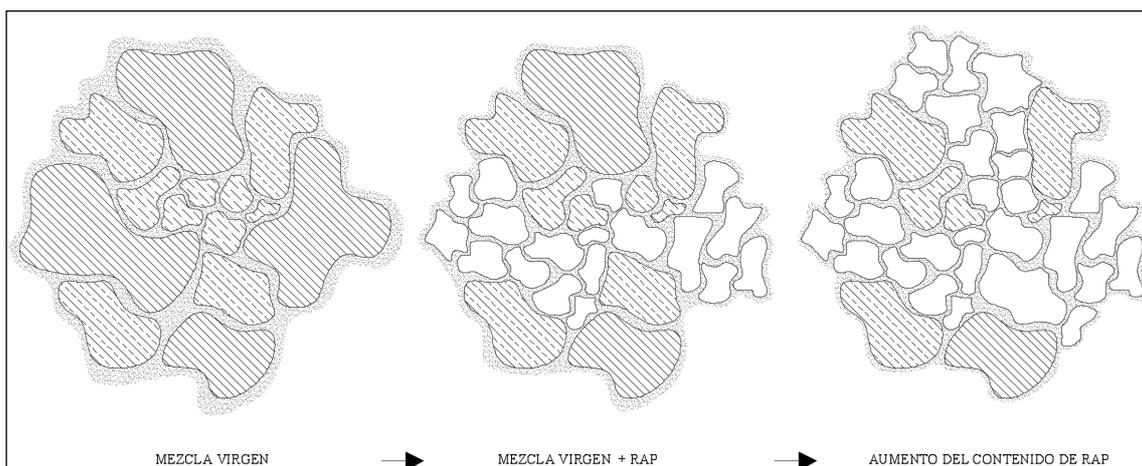


Figura 13. Representación esquemática de la reestructuración del esqueleto granular al agregarle RAP

En el caso de la estructura granular, el aumento en el contenido de material de fresado, se genera una estructura interna más fina compuesta por un conjunto de partículas que reducen los vacíos y de esta forma el esfuerzo cortante necesario para

llegar a la fluencia de la muestra, aumenta en consecuencia con la cantidad de RAP incorporada (Figura 13).

En otras palabras, el aumento de la estructura granular media-fina, se traduce en una estructura granular más cerrada y por ende en una mayor necesidad de esfuerzo cortante para romper dicha estructura, lo que conlleva a una menor capacidad de dilatación. Todo esto se puede observar en las gráficas obtenidas, donde a mayor proporción de RAP, mayores estabilidades se logran y de forma significativa disminuye la fluencia.

De forma esquemática se puede observar en la Figura 14, como las partículas de mayor tamaño se van dispersando y reemplazando por agregados de menor tamaño. Las imágenes corresponden a probetas de 150mm de diámetro confeccionadas mediante el uso del compactador giratorio.



Figura 14. Distribución granular en el seno de las muestras confeccionadas en laboratorio (izquierda a derecha; parte superior; mezcla patrón, mezcla con 25% de RAP, parte inferior; mezcla con 50% y 75% de RAP)

En forma conjunta, se puede apreciar el efecto del asfalto modificado sobre el aporte en la mejora reológica del ligante envejecido. Lo antes expresado se puede partir del hecho que la no presencia de un betún modificado, hubiera llevado a resultados desfavorables, en lo que respecta a la fluencia, donde el aumento en el contenido de RAP, este último valor hubiera aumentado. Esto se ve reflejado en el comportamiento elástico que le proporciona el ligante modificado al envejecido, logrando mayores estabilidades y menores fluencias.

Esto se puede adjudicar al aporte de elasticidad y resistencia por medio de la inclusión de polímeros en la película de ligante envejecida, de esta forma rejuvenece sus propiedades reológicas. Se considera que sucede la mezcla de ligantes, debido a que en la muestra patrón existe una película de betún no absorbida (asfalto efectivo) suficiente y necesaria para rejuvenecer el ligante envejecido que se encuentra por exceso en las partículas de RAP, suponiendo que los áridos que se encuentran en este último material tienen una absorción nula y colaboran con los esfuerzos de atracción y por ende con la cohesión de la mezcla final. De este modo quedan diferenciados dos grupos de partículas, uno conformado por partículas recubiertas por una película de ligante modificado y el otro por partículas recubiertas por ligante envejecido, dejando un medio continuo de la mezcla de estos últimos dos, variando en función de la incidencia de cada uno en el conjunto (Figura 15).

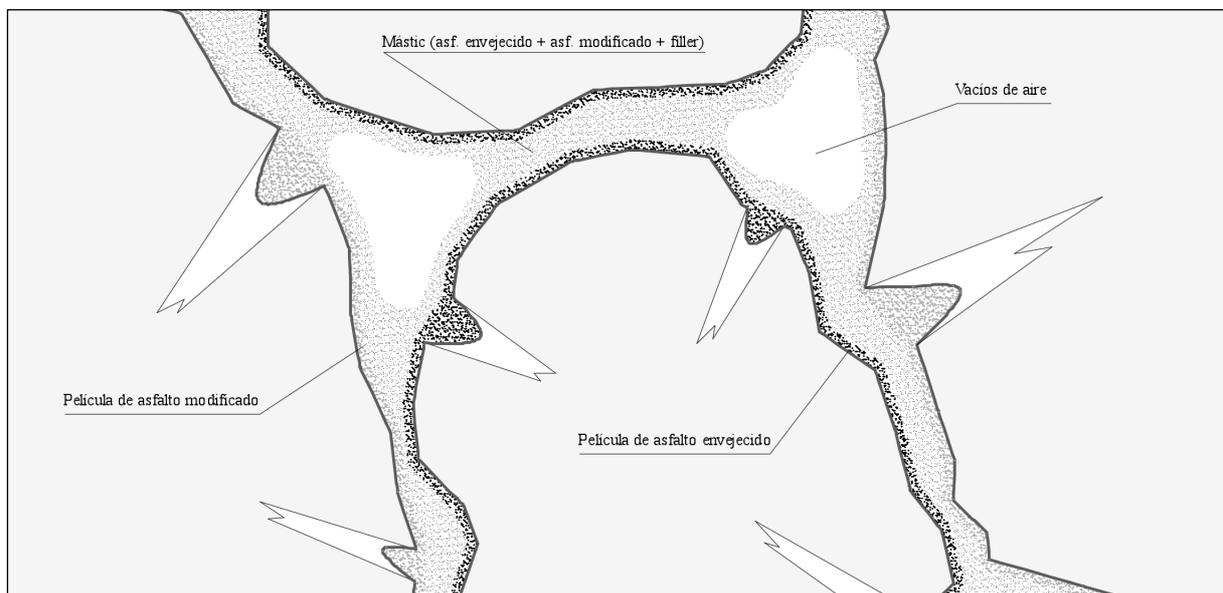


Figura 15. Representación esquemática de la estructura interna de las mezclas con incorporación de RAP

4 Conclusiones

El avance en la tecnología de materiales ha permitido el desarrollo de nuevas metodologías que se adapten a la evaluación del comportamiento de estos nuevos productos mediante la incorporación de los mismos en las estructuras civiles. Como es el caso de los asfaltos modificados, en la actualidad existe un gran avance en el estudio del comportamiento de los mismos frente a diferentes sollicitaciones y la inserción de estos en diferentes estructuras de una red vial, como es el uso del reforzamiento de una capa de rodamiento. Existen distintas formas de poder aprovechar el potencial de este tipo de material, entre ellas como se ha demostrado en esta investigación, existe un gran aporte del mismo sobre un material envejecido como es el caso del RAP, que muchas veces es considerado un material de rechazo.

En función de todo lo desarrollado a lo largo de esta investigación se concluyeron los siguientes aspectos principales:

El material de fresado es un elemento heterogéneo, que no puede considerarse como un compuesto de características uniformes, debido a que la reología del asfalto

envejecido se manifiesta de diferentes formas en función del betún o aditivo que se emplee para el rejuvenecimiento de este material. Todo lo antes mencionado se observó al comparar los resultados obtenidos frente a los que se presentan en otras investigaciones mencionadas en el desarrollo de esta tesis. En cuanto a la granulometría, presentan diferentes aspectos que dependen de la composición original y la metodología de fresado, por otro lado, se debe tener en cuenta el tiempo y forma de acopio, debido que influyen en la forma de aprovechamiento y la facilidad de manipulación del material de reciclaje.

La composición del esqueleto granular como así también el contenido y tipo de filler, tienen una gran incidencia dentro del comportamiento final de las mezclas finales, colaborando tanto en la corrección de las curvas granulométricas como en la resistencia frente a sollicitaciones de corte. Se puede observar que, si bien la granulometría puede escapar dentro de los márgenes de los husos granulométricos impuestos por la repartición, tienden a un resultado favorable en cuanto a la evaluación mecánica y volumétrica.

La inclusión de asfalto modificado, sirve como un rejuvenecedor de las propiedades reológicas del asfalto envejecido del material de fresado. Dependiendo de la incidencia del mismo en las mezclas, tiende a una mejora en la cohesión y a la resistencia al corte, dando como resultado una mezcla capaz de absorber sollicitaciones frente a deformaciones permanentes, de mejor manera que la que presentaría una mezcla rejuvenecida con asfalto convencional. Se presenta un aporte importante en la capacidad de recuperación elástica frente a sollicitaciones del tipo cíclicas.

Contenidos de RAP inferiores al 50%, no presentan inconvenientes en lo que respecta a la evaluación volumétrica y mecánica por el método Marshall, debido a que la inclusión de asfalto modificado y el tipo de esqueleto granular que surge de la combinación, colaboran de forma positiva en los resultados finales. Todo esto hace necesario un análisis por ensayos de desempeño.

5 Referencias

- [1] D. Rogers, P. Karan, I. Turner, G. Arnold, D. Alexander. Performance benefits of polymer modified bitumen binders for thin surfacing. NZ Transport Agency research. Nueva Zelanda, 2019.
- [2] Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente del tipo densos. Vialidad Nacional, 2017.
- [3] Ruiz, C. Concentración crítica de filler, su origen y significado en la dosificación de mezclas abiertas. Dirección de Vialidad Prov. de Buenos Aires, Argentina, 1960.
- [4] Hernández Z. G., López D. R., Barragan R. R. y Treviño T. J. Uso del reforzamiento flexible en asfaltos modificados para pavimentos. Congreso ibero latinoamericano del asfalto. México, 2019.
- [5] Ruiz, C. Estabilidad de las mezclas asfálticas. Asociación Argentina de Carreteras. Argentina, 1957.