

**IAG346-06-2013**  
**EXPERIENCIA DE RECICLADO EN MÉXICO:**  
**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO Y CALIDAD DE MEZCLA**  
**ASFÁLTICA RECICLADA CON TASA DEL 100% DE RAP**  
**EXPERIÊNCIA DE RECICLAGEM NO MÉXICO: AVALIAÇÃO**  
**COMPORTAMENTAL E QUALIDADE DE MISTURA COM UMA TAXA**  
**DE ASFALTO RECICLADO 100% RAP**

Ing. José Daniel Sánchez Rodríguez  
Asistente de Docencia. Departamento de Ingeniería Civil.  
Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey.  
Monterrey, México  
[A00566337@itesm.mx](mailto:A00566337@itesm.mx)  
[jdaniel.sanchez@hotmail.com](mailto:jdaniel.sanchez@hotmail.com)

Dr. Carlos Humberto Fonseca Rodríguez  
Director del Centro de Diseño y Construcción.  
Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey.  
Monterrey, México  
[carlos.fonseca@itesm.mx](mailto:carlos.fonseca@itesm.mx)

Ing. Rodolfo Villalobos Dávila  
Director General.  
PETROTEKNO, S.A. DE C.V.  
Monterrey, México  
[rvillalobosdavila@yahoo.com.mx](mailto:rvillalobosdavila@yahoo.com.mx)

## **Resumen**

En este trabajo se presentan resultados del estudio de control de calidad para determinar la variabilidad en las propiedades y comportamiento, así como la calidad de la mezcla asfáltica utilizada para pavimentación del tramo Km 0+000 a Km 6+100, libramiento de la Ciudad de Cadereyta, en el Estado de Nuevo León, México. Una característica importante de la mezcla asfáltica manufacturada para este tramo carretero, es el empleo de una carpeta asfáltica en caliente reciclada empleando el 100% de material reciclado, (RAP, por sus siglas en inglés, Reclaimed Asphalt Pavement), y manufacturada a temperaturas bajas cumpliendo con el criterio de mezclas tibias, (Warm Mix), y adicionando un agente rejuvenecedor mediante la tecnología de espumado, (Foamed Asphalt). El estudio consistió en obtener muestras en campo, del sitio de tendido, tomándolas de la pavimentadora (finisher), en un total de 20 muestras, una a cada 250 metros. A cada muestra se le registro temperaturas de fabricación (salida de planta), de tendido y de compactación. Esta última temperatura es de gran importancia para los trabajos de laboratorio ya que se replica para comparar propiedades mecánicas de la mezcla en laboratorio versus campo. Se fabricaron probetas empleando compactador Marshall y compactador Giratorio SuperPave, con variación de temperatura de compactación de acuerdo al patrón de +10°, +20°, -10°, y -20°C, respecto a la temperatura de compactación en campo. Mediante ensayos de laboratorio se evaluó la Resistencia a Tensión Indirecta, Estabilidad Marshall, Flujo Marshall, Rigidez Marshall, Deformación Permanente

con Rueda de Hamburgo y Módulo Resiliente. Los resultados obtenidos en las pruebas nos indican valores de propiedades y comportamiento de la mezcla asfáltica, dentro de los límites permisibles y en ciertos puntos con mejoría respecto a mezclas con materiales vírgenes. Estos resultados resultan muy alentadores de cara al uso de mezclas asfálticas recicladas, RAP.

## **Resumo**

Neste artigo apresentamos os resultados de estudo de controle de qualidade para determinar a variabilidade das propriedades e comportamento, bem como a qualidade do asfalto para a pavimentação do Km 0+000 a Km 6+100, mandado de Cadereyta City, no Estado de Nuevo León, no México. Uma característica importante da mistura de asfalto fabricada para este trecho da rodovia, é o uso de asfalto reciclado quente usando 100% de material reciclado (sigla RAP, regenerada, pavimentação asfáltica), e fabricado em baixas temperaturas cumprimento dos critérios de misturas quentes, Quente (Mix) e pela adição de um agente rejuvenecedor por espuma tecnologia, (espuma de asfalto). O estudo foi obter amostras no campo, o local de colocação, retirando-os da pavimentadora (finalizador), num total de 20 amostras, cada uma de 250 metros. Um registro de cada temperaturas de fabricação de amostras (piso saída), colocação e compactação. Esta última temperatura é de grande importância para o trabalho de laboratório como repetições para comparar as propriedades mecânicas da mistura em função do campo de laboratório. As amostras foram fabricadas usando compactador Marshall e compactador giratório Superpave com a variação da temperatura de compactação de acordo com o padrão de 10°, 20°, 10° e -20°C, a temperatura de compactação sobre o campo. Laboratório testa avaliou a resistência à tração indireta, Marshall Estabilidade Marshall fluxo, Marshall Stiff, Roda de deformação permanente e resiliente Modulus Hamburgo. Os resultados obtidos nos testes indicam os valores das propriedades e do comportamento do asfalto, dentro dos limites admissíveis ou em determinados pontos, com a melhoria das misturas de matérias-primas virgens. Estes resultados são muito encorajadores em face da utilização de misturas asfálticas recicladas, RAP.

## **Palabras Claves**

Evaluación. Comportamiento. Calidad. Pavimentos. RAP. Warm Mix. Cemento Asfáltico Espumado. Cemento Asfáltico. Agente Rejuvenecedor. Finisher. Método Marshall. Compactador Giratorio SuperPave.

## **INTRODUCCIÓN**

El estudio que se realiza es parte de un proyecto de rehabilitación de pavimento en el libramiento Alfonso Martínez Domínguez, en la Cd. de Cadereyta de Jiménez, N.L., tramo de 6.1 km de longitud del Km 0+000 al Km 6+100 en el cual la carpeta asfáltica es reciclada con una tasa de RAP al 100% (mismo que ha sido fresado y retirado del sitio rehabilitado), y para el cual se llevo a cabo un control estadístico del comportamiento de la carpeta en base a muestras tomadas a cada 250 metros aproximadamente, directamente del sitio de pavimentación en el punto de salida de la “finisher” con la finalidad de registrar el lugar exacto en el cual se tomo la muestra para ser procesada en laboratorio y en ese mismo lugar tomar posteriormente corazones del pavimento, a los cuales, y al igual que a las muestras obtenidas, se les realizan pruebas de comportamiento en laboratorio.

La necesidad de reciclar los materiales asfálticos en pro de la sustentabilidad en la construcción hoy en día se acentúa debido al fuerte impacto ambiental que hemos causado con la explotación de materiales vírgenes a lo largo de la historia. El arte de reciclar en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente se complica por sobre el 30% de RAP, según

diversos estudios exhaustivos que se han realizado en diferentes países, por diferentes instituciones y empresas preocupadas día a día por el deterioro ambiental de nuestro planeta. Las principales complicaciones que se presentan en el reciclaje de RAP son por el alto módulo de los asfaltos, por exceso de finos producidos al momento de fresar la carpeta existente, por requerir modificaciones en planta, por el uso de mezclas asfálticas especiales, por la variabilidad y por el costo del manejo del mismo RAP. Sin embargo podemos hablar basados en resultados obtenidos a la fecha con nuestros estudios que es posible reciclar hasta el 100% del material, con éxito en las propiedades finales de la carpeta obtenida.

¿Qué sustenta el uso del RAP?

- Reducción de costos
- Conservación de materiales y disminución de explotación de bancos que afectan la contaminación visual de nuestras ciudades y modifican ecosistemas.
- Falta de espacios para disposición de desperdicios de manera adecuada
- Las altas tasas de caminos con pavimentos asfálticos que hay en el mundo y las necesidades que tienen estos en cuanto a rehabilitación y conservación.
- Tema 100% ecológico y reciclable y que cumple con las 3R (Reducir, Reutilizar y Reciclar) y que a su vez protege la economía y el medio ambiente gracias a el ahorro en el uso de energía y materiales vírgenes.
- La buena imagen que se le da a la industria de los pavimentos flexibles que ya esta bastante deteriorada en la actualidad.
- Posibilidad de cero aumento en el nivel de Rasante.

¿Retos del uso de RAP?

- Lograr buen desempeño en la carpeta nueva obtenida.
- Lograr obtener una buena relación Costo/Desempeño.
- Impulsar una legislación que favorezca su uso.
- Adecuar procedimientos de construcción que logren explotar al máximo sus beneficios.
- Lograr el desarrollo de diseño de mezclas con RAP al 100% teniendo una correcta clasificación del mismo.

En el mundo existen países que tienen experiencia de mas de 30 años en el uso del RAP para fabricar carpeta asfáltica reciclada, sin embargo no se tienen datos de utilización del RAP en una tasa constante del 100% debido a la variabilidad que puede existir con este.

El punto medular del presente estudio es la reutilización del 100% del RAP en una mezcla para carpeta asfáltica en capa de rodadura, en base a la innovación de tecnología en planta y en adecuación de procesos, así como el adicionamiento de productos idóneos como rejuvenecedores para la reactivación del asfalto envejecido.

## **OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

El objetivo del estudio es conocer el comportamiento y prestaciones de la carpeta asfáltica para capa de rodadura, fabricada con material reciclado, (RAP), al 100% en su composición, empleada para la rehabilitacion del tramo comprendido del cadenamiento Km 0+000 al Km 6+100 del libramiento Alfonso Martínez Domínguez, en la Cd. de Cadereyta de Jiménez, N.L.

Las principales características que interesaba determinar fueron granulometría de la mezcla, contenido de asfalto, estabilidad y flujo marshall, resistencia a la tensión indirecta tanto en seco como húmedo a 25 °C y en frío a 5 °C, deformaciones plásticas permanentes (Rutting) y porcentaje de vacíos en mezcla. Además se realizó ensayo de deformaciones plásticas permanentes en núcleos extraídos de la carpeta asfáltica, días posteriores a su tendido para comparar comportamiento en campo con el de reproducción en laboratorio.

## **METODOLOGÍA**

El plan de trabajo experimental se desarrolló en dos fases. La primera fase consistió en la obtención de la mezcla por medio de muestreo directo en sitio de tendido, en esta fase se recopiló un total de 20 muestras con la finalidad de obtener, mediante pruebas de laboratorio, datos de comportamiento de la carpeta a lo largo de todo el tramo pavimentado, y evaluar con esto la variabilidad que existe en el desempeño de la mezcla reciclada con el 100% de RAP y además poder definir si las temperaturas de trabajo fueron óptimas en el tendido, ya que la mezcla cumple con el criterio de mezclas tibias, (Warm Mix); para esto último se le registró, a cada una de las muestras, temperaturas de fabricación (salida de planta), de tendido y de compactación, esta última temperatura es de gran importancia para los trabajos de laboratorio ya que se replica para comparar propiedades mecánicas de la mezcla en laboratorio versus campo.

La segunda fase consistió en evaluar todas las características antes mencionadas como puntos de interés del estudio en base ensayos a probetas fabricadas, tanto de 10.16 cms de diámetro con compactación Marshall, como de 15.24 cms de diámetro con compactador giratorio. Los trabajos de la segunda fase se realizaron bajo la siguiente secuencia metodológica:

- Disposición de la mezcla muestreada al laboratorio donde se clasifica para su manejo en fabricación de probetas tanto con Compactador Marshall como con Compactador Giratorio.
- Lavado de una cantidad representativa de material muestreado por métodos de “reflux” y “centrifugado” para obtención de contenido de Cemento Asfáltico en la mezcla y la granulometría de la misma.
- Fabricación de probetas en Compactador Marshall con variación en temperaturas de compactación con la finalidad de encontrar temperatura óptima, siguiendo un patrón de aumento en 10° y 20° y disminución en -10° y -20°, respecto a la temperatura que se está utilizando para compactar en campo, dicha temperatura de compactación en campo es de 130 ° C, por lo cual se fabricaron probetas a 110, 120, 130, 140 y 150 °C.
- Fabricación de probetas en Compactador Giratorio con variación en temperaturas de compactación con la finalidad de encontrar temperatura óptima, siguiendo un patrón de aumento en 10° y 20° y disminución en -10° y -20°, respecto a la temperatura que se está utilizando para compactar en campo, dicha temperatura de compactación en campo es de 130 ° C, por lo cual se fabricaron probetas a 110, 120, 130, 140 y 150 °C.
- Ensayo de las probetas fabricadas anteriormente con ambos compactadores para obtener comportamientos de la mezcla a tensión indirecta, estabilidad Marshall, Rigidez Marshall y Deformación Permanente con Rueda de Hamburgo.

## **RESULTADOS**

Partiendo de la propuesta de fabricación de probetas para los ensayos que dan testimonio del comportamiento de la mezcla asfáltica, para cada uno de los 20 muestreos realizados a lo largo del tramo, se tiene la relación de especímenes mostrada en la Tabla 1, donde ( $T^a$ ) es la temperatura de compactación y la cantidad de probetas corresponde para cada temperatura.

**Tabla 1. Relación de especímenes fabricados**

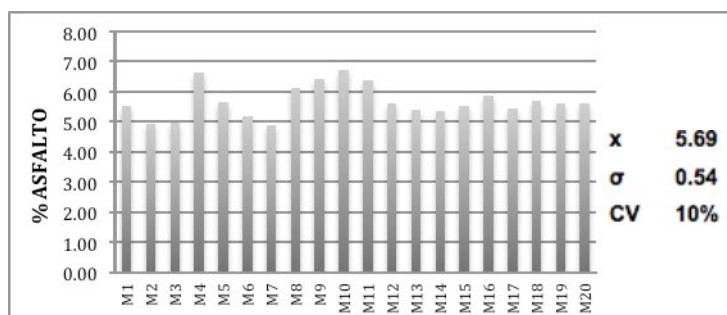
	Cant. Probetas	Ensayo	$T^a$				
			110°	120°	130°	140°	150°
Compactador Marshall	3	Estabilidad y flujo Marshall	110°	120°	130°	140°	150°
	3	Tensión indirecta (seco) 25 °C	110°	120°	130°	140°	150°
	3	Tensión indirecta (húmedo) 25 °C	110°	120°	130°	140°	150°
	3	Tensión indirecta (seco) 5 °C	110°	120°	130°	140°	150°
	3	Modulo resiliente	110°	120°	130°	140°	150°
Compactador giratorio	Cant. Probetas	Ensayo	$T^a$				
			110°	120°	130°	140°	150°
	2	Deformación permanente con rueda de Hamburgo	110°	120°	130°	140°	150°
	3	Tensión indirecta (seco) 25 °C	110°	120°	130°	140°	150°
	3	Tensión indirecta (húmedo) 25 °C	110°	120°	130°	140°	150°
	3	Tensión indirecta (seco) 5 °C	110°	120°	130°	140°	150°

Con el barrido de temperaturas de compactación se buscó definir si la temperatura de compactación en campo fue la correcta y si es posible lograr propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla asfáltica a menores temperaturas.

## Contenido de Asfalto

Se presenta en la Grafica 1 el contenido de asfalto mostrado en porcentaje en mezcla, el cuál fue obtenido por método de reflux atendiendo a la norma ASTM D2172/D2172M-11; esto fue realizado para cada una de las 20 muestras que se tienen, con la finalidad de conocer la variabilidad que hay a lo largo del tramo.

**Gráfica 1. Contenido de Asfalto**

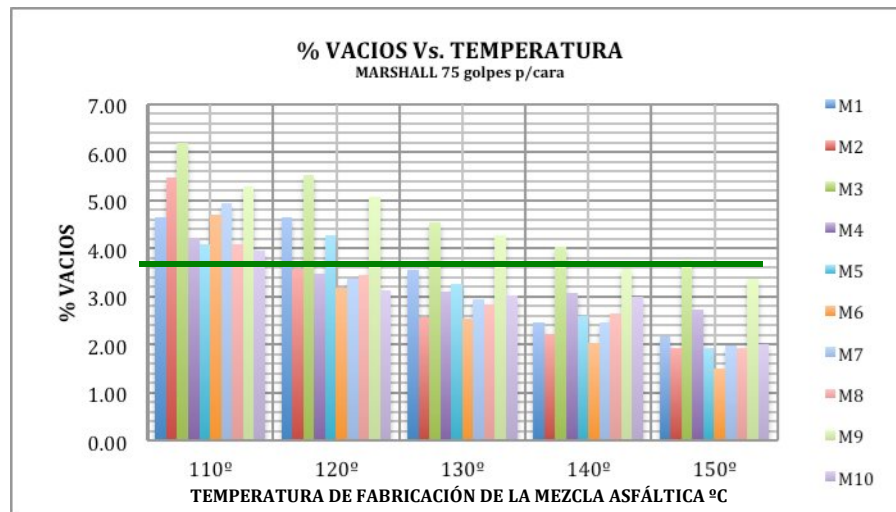


## Vacíos en Mezcla y Densidades

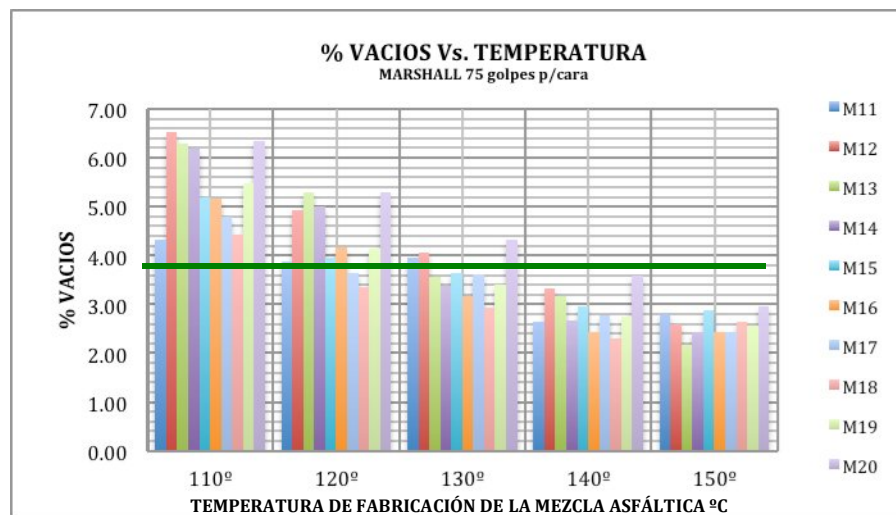
Las densidades y la relación de vacíos en mezcla, expresada en porcentaje y en función de la temperatura de compactación, se muestran en las siguientes Gráficas donde se busca la temperatura de compactación que cumpla de mejor manera los criterios de diseño para un 4 % de vacíos para una mezcla densa. Se presentan las Gráficas 2 y 3 para representar los vacíos en mezcla para probetas compactadas con compactador Marshall y la Gráfica 4 para

probetas compactadas con compactador giratorio. Las Densidades brutas ( $G_{mb}$ ), estan representadas en las Gráficas 5, 6 y 7, donde las primeras dos son para probetas compactadas en compactador marshall y la última para probetas compactadas en compactador giratorio.

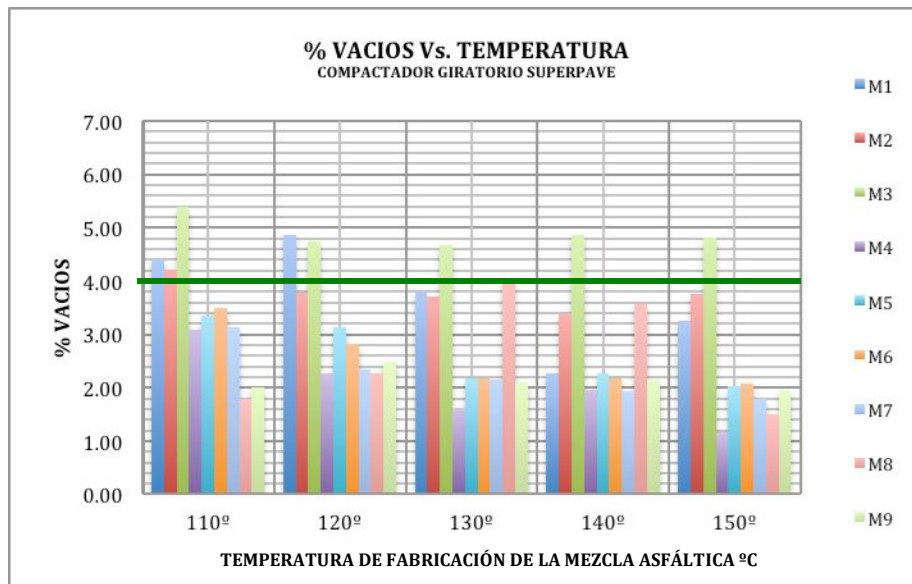
**Gráfica 2. Vacios en Mezcla (Compactador Marshall)**



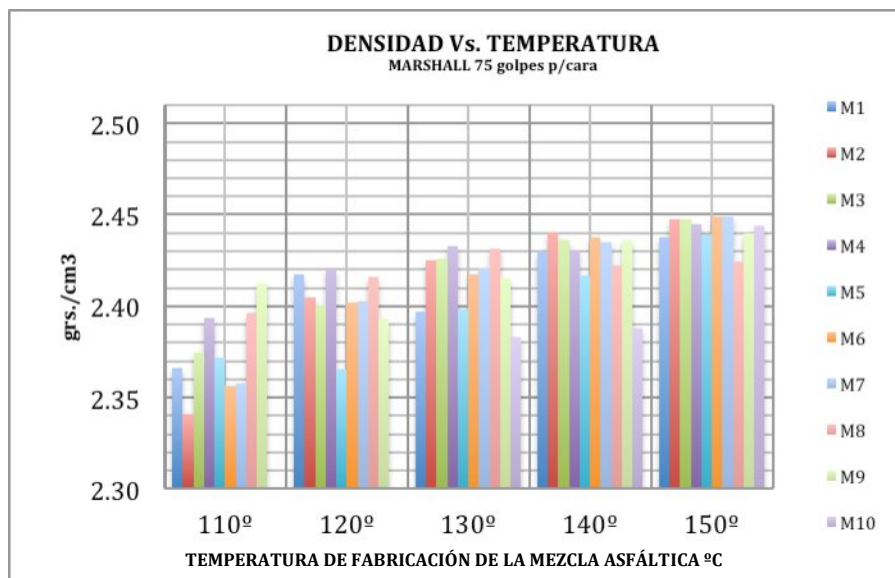
**Gráfica 3. Vacios en Mezcla (Compactador Marshall)**



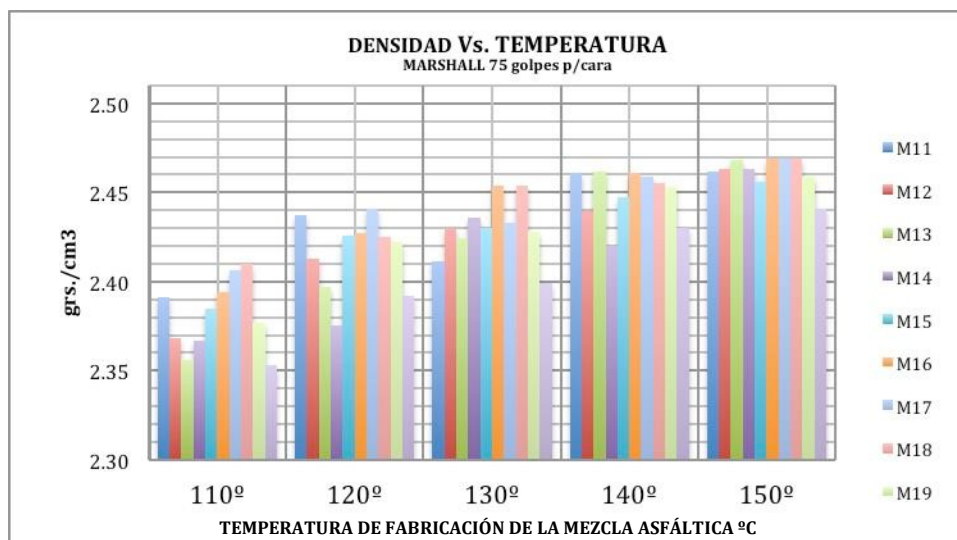
**Gráfica 4. Vacios en Mezcla (Compactador Giratorio)**



**Gráfica 5. Densidad bruta  $G_{mb}$  (Compactador Marshall)**

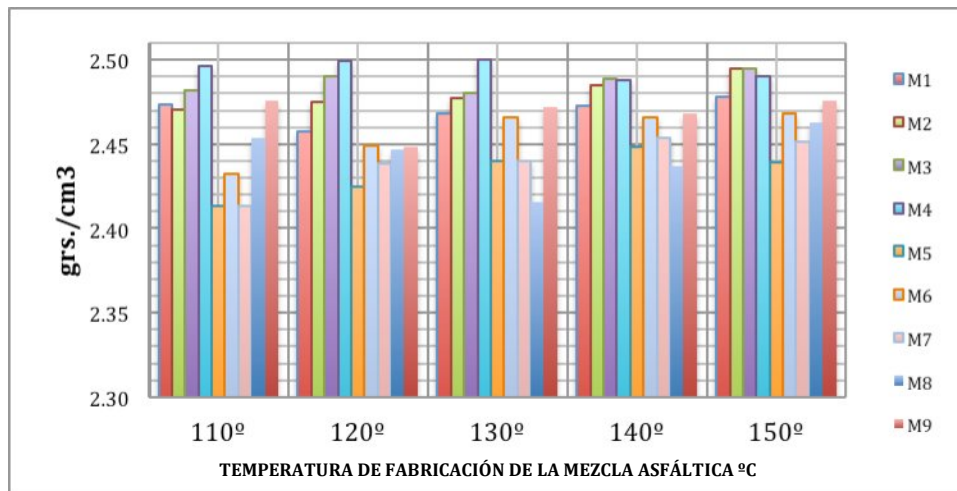


**Gráfica 6. Densidad bruta  $G_{mb}$  (Compactador Marshall)**





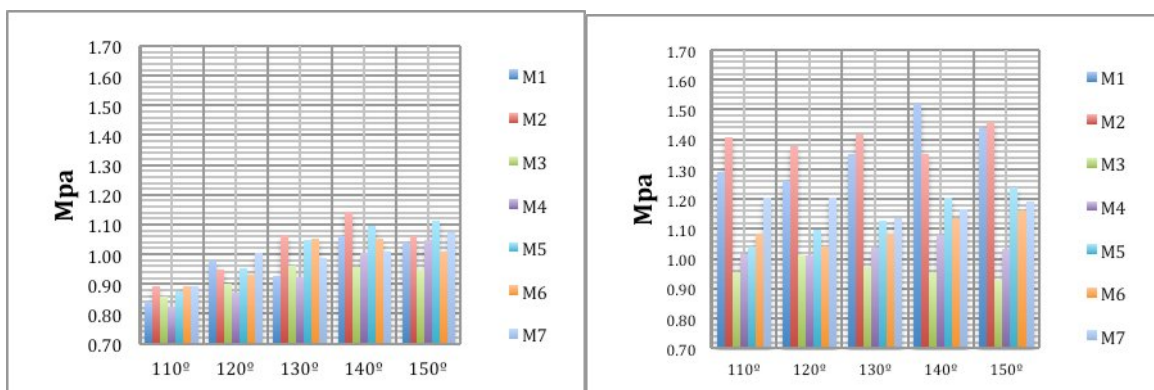
**Gráfica 7. Densidad bruta  $G_{mb}$  (Compactador Giratorio)**



## Tensión Indirecta

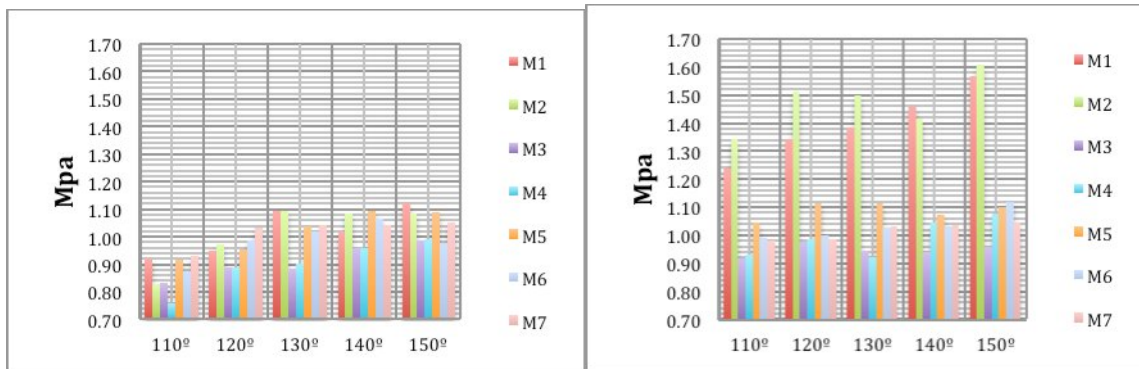
La resistencia a la tensión indirecta se obtuvo tanto en seco como en humedo para ensayos realizados a 25 °C, y se obtuvo de igual manera la resistencia en seco para ensayos a 5 °C, para los dos primeros ensayos mencionados se probaron probetas fabricadas tanto en compactador Marshall como en giratorio, sin embargo para el último solo se fabricaron con compactador Marshall. Se realizó este ensayo para cada uno de los 20 muestreos, de los cuales se muestran fragmentos de resultados en las Gráficas 8 y 9 para T.I.S.; Gráficas 10 y 11 para T.I.H y Gráfica 12 para comparativa entre tensión indirecta en seco para ensayos a 25°C contra 5°C.

**Gráfica 8 y 9. Resistencia a Tensión Indirecta en Seco a 25 °C, (la Gráfica de la izquierda es para probetas fabricadas con compactador Marshall y la de la derecha con giratorio).**

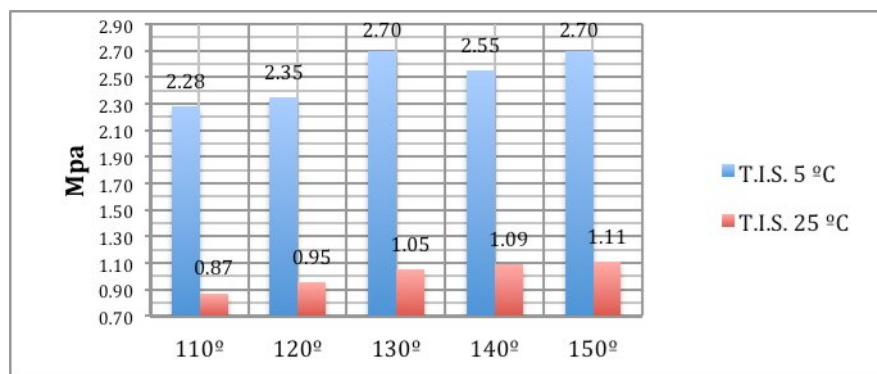


**Gráfica 10 y 11. Resistencia a Tensión Indirecta en Humedo a 25 °C, (la Gráfica de la izquierda es para probetas fabricadas con compactador Marshall y la de la derecha con giratorio).**





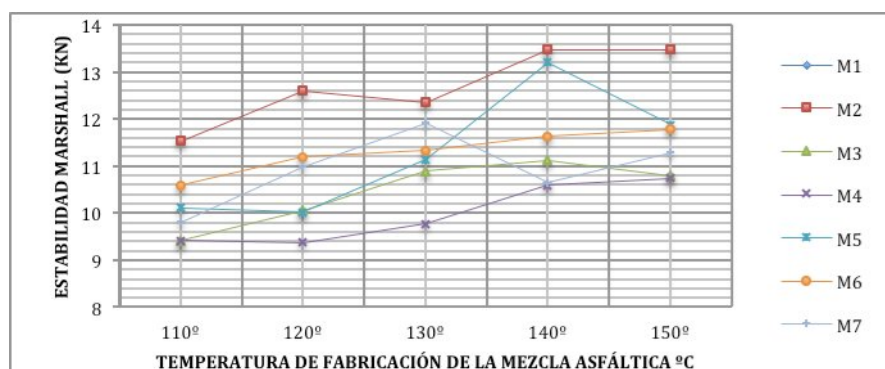
**Gráfica 10 y 11. Resistencia a Tensión Indirecta (Comparación de resistencia en seco para ensayos a 5°C y 25°C)**



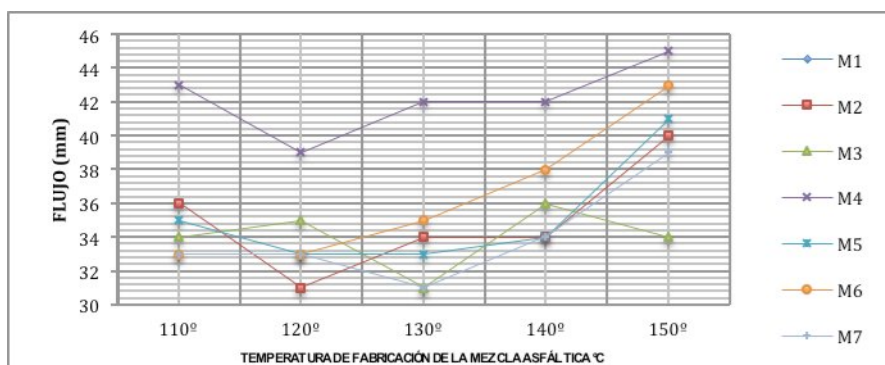
## Estabilidad y Flujo Marshall

La estabilidad Marshall, en kilonewtons, KN, está representada en la Gráfica 12, donde se observan valores parciales, 7 de los 20 muestreos, de estabilidad contra la temperatura a la cual fueron compactadas las probetas. Para los mismos muestreos, en la Gráfica 13 se muestran los valores de Flujo Marshall, expresados en milímetros, mm.

**Gráfica 12. Estabilidad Marshall Vs. Temperatura de Compactación**



**Gráfica 13. Flujo Marshall Vs. Temperatura de Compactación**



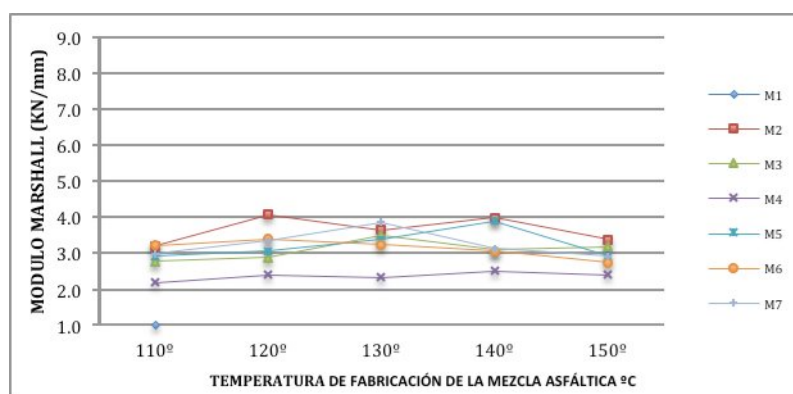
## Modulo Marshall

El modulo Marshall, definido como la relación entre estabilidad y flujo Marshall, se presenta en la Gráfica 14. Estos valores indican la baja rigidez de la carpeta asfáltica, aun cuando se cuenta con un alto contenido de RAP, ya que de todos los muestreos se obtuvieron valores muy por debajo de lo especificado por criterios españoles, los cuales establecen hasta 8 KN/mm. De igual forma se muestran resultados para los mismos 7 muestreos de los 20 totales.

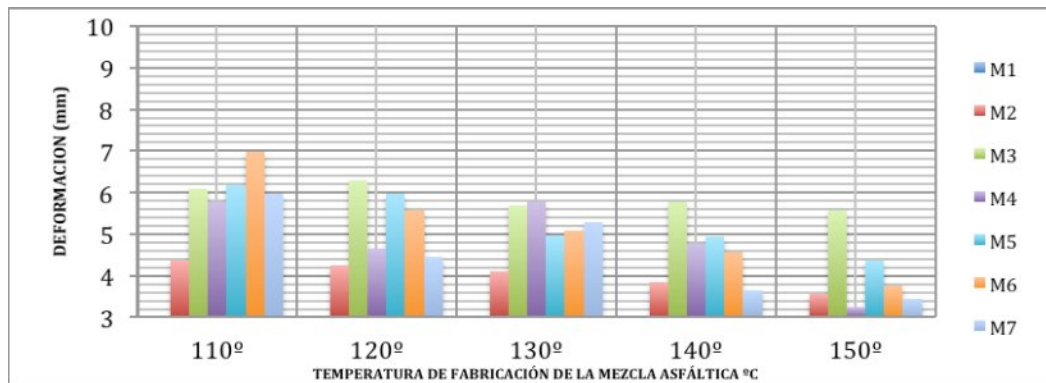
## Deformaciones Plásticas Permanentes (Rutting)

Las deformaciones plásticas permanentes se presentan en la Gráfica 15, este ensayo fue realizado bajo el procedimiento con la rueda de Hamburgo según el procedimiento de la norma AASHTO T-324. Se puede apreciar en el gráfico el alto desempeño de la carpeta al tener deformaciones bastante bajas, en relación a lo permisible. Cabe mencionar que todos los resultados, para los 7 muestreos de 20, cumplen con deformaciones plásticas permanentes menores de 7mm a los 20,000 ciclos.

Gráfica 14. Módulo Marshall



Gráfica 15. Deformaciones plásticas Permanentes Vs. Temperatura de compactación



## CONCLUSIONES

El uso de RAP en tasas del 100% para una mezcla asfáltica para capa de rodadura es una técnica viable cuando realizamos estudios previos del mismo y utilizamos agentes rejuvenecedores adecuados que reactivan las propiedades del cemento asfáltico. En el caso del presente proyecto se observan comportamientos que sugieren un gran desempeño de la mezcla asfáltica, con prestaciones superiores a las mezclas densas en caliente fabricadas con materiales vírgenes.

La resistencia a la deformación plástica permanente de la mezcla asfáltica, como era de esperarse, es bastante alta respecto a las obtenidas con estudios en mezclas con materiales vírgenes, mostrando resultados muy por debajo de los valores especificados para categoría de tráfico pesado; incluso a temperaturas por debajo de la temperatura de compactación en campo como lo son 110 °C y 120 °C se observan datos que están dentro de rangos especificados y del orden de entre 3 y 6 mm de deformación.

Las propiedades volumétricas para la mezcla asfáltica con altos contenidos de RAP se satisfacen para todas las muestras obtenidas incluso a bajas temperaturas de fabricación.

Los valores de resistencia a la tensión indirecta están dentro de los rangos típicos para una mezcla reciclada en temperaturas de ensayo de 25°C tanto en seco como húmedo, sin embargo a temperatura de ensayo de 5°C la resistencia sube a valores casi 3 veces mayor.

Los resultados expuestos en este proyecto son muy alentadores de cara a seguir utilizando el 100% de material reciclado, sin embargo podemos extender la investigación para fines de cerciorarse que no hay rigidez excesiva, que si bien el modulo Marshall nos indica que no lo es, se debe llegar a un segundo nivel como son Módulos Resilientes e incluso a Fatiga.

## REFERENCIAS

- Bolsan, Pablo E. "Reciclado de mezclas asfálticas en caliente ex-situ", Vialidad Nacional, República Argentina, Buenos Aires, 2011
- Reyes, O.J. [et al.]. El Proyecto FENIX en la UPC: mezclas semi-calientes. A: Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. "XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto". Lisboa: 2009, edición impresa, p. 803-812.
- Valdés V., Gonzalo A.; Martínez R., Adriana H.; Pérez-Jiménez, Félix E., "Estudio de Variabilidad en Mezclas Asfálticas en Caliente Fabricadas con Altas Tasas de Material Asfáltico Reciclable (RAP)", Revista de la Construcción, vol. 7, núm. 1, 2008, pp. 60-71 Pontificia Universidad Católica de Chile Chile, 2008.