



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**“DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS IN SITU MODIFICADAS CON HULE  
PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO ACTIVADO Y  
REACCIONADO”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE  
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

**PRESENTA :**

**ING. EDGAR NOEL ESPINOZA AVALOS**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. JORGE ALARCÓN IBARRA**



**MORELIA MICHOACÁN, AGOSTO 2023.**



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS  
DE HIDALGO**

Maestría en Infraestructura  
del Transporte  
en la Rama de las Vías Terrestres

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE  
LAS VÍAS TERRESTRES**

**“DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS IN SITU MODIFICADAS CON HULE  
PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO ACTIVADO Y REACCIONADO”**

**TRABAJO ESCRITO**

**OPCIÓN DE TITULACIÓN:**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

**PRESENTA:**

**ING. EDGAR NOEL ESPINOZA AVALOS**

**DIRIGIDO POR:**

**DR. JORGE ALARCÓN IBARRA**



**MORELIA MICHOACÁN, AGOSTO 2023.**

## I. AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a dios, por haberme dado la oportunidad y la dicha de haber llegado a este momento tan importante de mi vida; sé que la vida profesional requiere de una preparación continua y de una dedicación constante, pero confié que con su favor es posible salir siempre adelante.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento económico para el curso de mis estudios de maestría.

A mis padres Ramiro Espinoza Partida y Claudia Avalos Ureña, por brindarme su total confianza y su apoyo incondicional en todo momento; a ustedes les debo todo lo que soy hoy, no hay manera en que pueda pagarles todo lo que han hecho por mí. Gracias por siempre papás.

A mis hermanos Missael Espinoza y Ulises Espinoza, por su compañerismo, apoyo, comprensión y por mantenernos siempre unidos, ante todo.

A mi novia y compañera de vida Josefina Gómez Rojas, gracias por estar siempre a mi lado en los momentos más felices y más difíciles, gracias por tu apoyo incondicional.

A mis amigos y futuros compañeros Maestrandos, Luis Fernando Trejo Arámbula y Eliceth Lljaira Roa Hernández, gracias por su amistad, compañerismo y apoyo en esos momentos difíciles que juntos pasamos.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al posgrado de La Maestría de Infraestructura del Transporte en el Área de Vías Terrestres, por haberme dado la oportunidad de llevar a cabo mis estudios.

A mis profesores, quienes se encargaron de compartir sus conocimientos, experiencias, enseñanzas y consejos.

A las empresas que me apoyaron a lo largo de esta investigación: Autopistas de Michoacán, Neotech Asphalt y Pruebas, Ensayos y Proyectos (PEPSA), en especial a Hugo Bandala Vázquez, director de Neotech y a Dantón Mendoza Cervantes, director general de PEPSA; es bien sabido que toda investigación requiere de recursos humanos, financieros, materiales y equipos, en este caso no fue la excepción, infinitas gracias por brindarme todo lo que estuvo en sus manos para solventar y poder llevar a cabo este proyecto, sin su vital colaboración no hubiese sido posible.

Finalmente agradezco enormemente a mi profesor y asesor en este trabajo, el Dr. Jorge Alarcón Ibarra, por su atención, dedicación, enseñanzas, consejos, apoyos y sobre todo por la confianza brindada a mi persona en la realización de este trabajo de tesis, gracias.

## II. RESUMEN

Habitualmente se conocen dos técnicas para incorporar hule de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) a una mezcla asfáltica. La primera es por vía húmeda, donde el hule actúa como modificador del asfalto, y el segundo es por vía seca, donde el hule actúa como reemplazo de un porcentaje del agregado. El estado del arte muestra que ambas metodologías han logrado buenos resultados en términos de fatiga y deformación permanente en mezclas con adición de hule en condiciones controladas de laboratorio; sin embargo, en la producción a mayor escala han tenido inconvenientes como la necesidad de equipos especiales y altas temperaturas de mezclado y mayores tiempos de digestión del hule. Ante dicho panorama se desarrolló la metodología denominada Reacted and Activated Rubber (RAR).

El RAR (comercialmente conocido y registrado por la patente: “RARX”) debe su denominación a que el caucho de NFU ha sufrido una digestión y tratamiento previo, esto permite que, al momento de introducirlo en el proceso de elaboración de mezclas asfálticas, se realice como si fuera un agregado más, sin necesidad de otro procedimiento adicional, lo que supone solucionar gran parte de las dificultades de los procesos mencionados, sin perder los beneficios de la adición de caucho en las mezclas asfálticas.

En el presente trabajo se evalúa el desempeño de pavimentos construidos con mezclas asfálticas de granulometría densa y de granulometría discontinua (tipo Gap Graded y SMA), modificadas con hule proveniente de neumáticos fuera de uso activado y reaccionado (NFU), bajo diferentes condiciones reales de tráfico.

Se presentan los resultados obtenidos en varios tramos carreteros en términos de índices de desempeño del pavimento, tales como: índice de rugosidad internacional, roderas, fricción, macrotextura y agrietamiento, y con base a ellos se establece una comparación de pavimentos construidos con mezclas asfálticas modificadas con RAR frente a pavimentos construidos con mezclas asfálticas convencionales para comprobar si su desempeño es equivalente o superior.

**Palabras Clave:** Hule reaccionado y activado, asfalto modificado con hule de NFU, índices de desempeño de un pavimento.

### III. ABSTRACT

Two techniques are currently known for incorporating End of Use Tire (NFU) rubber into an asphalt mixture. The first is by the wet method, where the rubber acts as an asphalt modifier, and the second is by the dry method, where the rubber acts as a replacement for a percentage of the aggregate. The state of the art shows that both methodologies have achieved good results in terms of fatigue and permanent deformation in mixtures with the addition of rubber under controlled laboratory conditions; however, in larger-scale production they have had drawbacks such as the need for special equipment and high mixing temperatures and longer rubber digestion times. Given this scenario, the methodology called Reacted and Activated Rubber (RAR) was developed.

The RAR (commercially known and registered by the patent: "RARX") owes its name to the fact that the NFU rubber has undergone digestion and prior treatment, this allows it to be carried out as if it were an added more, without the need for another additional procedure, which means solving a large part of the difficulties of the aforementioned processes, without losing the benefits of adding rubber to asphalt mixtures.

In the present work, the performance of pavements built with asphalt mixtures of dense granulometry and discontinuous granulometry (type Gap Graded and SMA), modified with rubber from end-of-use tires activated and reacted, under different real traffic conditions, is evaluated.

The results obtained in several road sections are presented in terms of pavement performance indices, such as: international roughness index, ruts, friction, macro texture and cracking, and based on them a comparison of pavements built with modified asphalt mixtures is established with RAR compared to pavements built with conventional asphalt mixtures to check if their performance is equivalent or superior.

**Keywords:** reacted and activated rubber, modified asphalt with NFU rubber, pavement performance indices.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

|       |                                                                                |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| I.    | AGRADECIMIENTOS.....                                                           | III |
| II.   | RESUMEN .....                                                                  | IV  |
| III.  | ABSTRACT .....                                                                 | V   |
| 1.    | INTRODUCCIÓN .....                                                             | 8   |
| 1.1   | ANTECEDENTES .....                                                             | 8   |
| 1.2   | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                               | 9   |
| 1.3   | JUSTIFICACIÓN.....                                                             | 10  |
| 1.4   | HIPÓTESIS.....                                                                 | 12  |
| 1.5   | PROPUESTA DE SOLUCIÓN .....                                                    | 12  |
| 1.6   | CONTRIBUCIONES ESPERADAS.....                                                  | 12  |
| 2.    | OBJETIVOS .....                                                                | 13  |
| 2.1   | OBJETIVO GENERAL.....                                                          | 13  |
| 2.1.1 | Objetivos particulares .....                                                   | 13  |
| 3.    | MARCO TEÓRICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....                                   | 14  |
| 3.1   | GENERALIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS .....                                  | 14  |
| 3.1.1 | Componentes de la mezcla asfáltica .....                                       | 14  |
| 3.1.2 | Tipos de mezclas asfálticas.....                                               | 19  |
| 3.1.3 | Métodos de diseño de mezclas asfálticas .....                                  | 22  |
| 3.2   | HULE RECICLADO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU) EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS..... | 35  |
| 3.2.1 | Neumáticos fuera de vida útil .....                                            | 35  |
| 3.2.2 | Obtención del Polvo de Caucho (hule de neumático).....                         | 35  |
| 3.2.3 | Fabricación de mezclas asfálticas con hule proveniente de NFU. ....            | 36  |
| 3.2.4 | Normativas Asociadas en México .....                                           | 39  |
| 3.3   | DETERIOROS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS .....                                         | 40  |
| 3.3.1 | Deformación permanente.....                                                    | 40  |
| 3.3.2 | Agrietamiento por fatiga .....                                                 | 42  |
| 3.3.3 | Desprendimiento de agregados .....                                             | 42  |
| 3.3.4 | Fisuración por baja temperatura .....                                          | 43  |
| 3.4   | AUSCULTACIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS.....                                    | 44  |
| 3.4.1 | Índice de Rugosidad Internacional (IRI) .....                                  | 44  |
| 3.4.2 | Profundidad de la Rodera .....                                                 | 44  |

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4.3 Resistencia a la Fricción.....                                                                                                                            | 45  |
| 3.4.4 Determinación de la Macrotextura .....                                                                                                                    | 45  |
| 3.4.5 Porcentaje de agrietamiento .....                                                                                                                         | 46  |
| 4. ESTADO DEL ARTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON HULE PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO .....                                                  | 47  |
| 4.1 DE ACUERDO A LOS MÉTODOS DE ADICIÓN DEL HULE. ....                                                                                                          | 47  |
| 4.2 DE ACUERDO AL TAMAÑO Y LA FORMA DE LA PARTÍCULA DE CAUCHO.....                                                                                              | 51  |
| 4.3 TABLA RESUMEN .....                                                                                                                                         | 52  |
| 5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....                                                                                                                         | 54  |
| 5.1 DOCUMENTACIÓN Y ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....                                                                                                            | 55  |
| 5.2 CARACTERIZACIÓN DE INSUMOS Y MEZCLAS DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO .....                                                                                         | 55  |
| 5.2.1 Autopista Pirámides-Tulancingo .....                                                                                                                      | 56  |
| 5.2.2 Tramo carretero del periférico de la ciudad de Morelia.....                                                                                               | 59  |
| 5.2.3 Autopista Pátzcuaro-Uruapan .....                                                                                                                         | 67  |
| 5.3 DESARROLLO DE PRUEBAS .....                                                                                                                                 | 73  |
| 5.3.1 Pruebas realizadas en el tramo: Autopista Pirámides-Tulancingo.....                                                                                       | 76  |
| 5.3.2 Pruebas realizadas en el tramo: periférico de la ciudad de Morelia .....                                                                                  | 76  |
| 5.3.3 Pruebas realizadas en el tramo: Autopista Pátzcuaro-Uruapan .....                                                                                         | 78  |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....                                                                                                                                  | 79  |
| 6.1 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS EVALUADAS .....                                                                                      | 79  |
| 6.2 RESULTADOS DE DESEMPEÑO DEL TRAMO CARRETERO DEL PERIFÉRICO DE LA CIUDAD DE MORELIA.....                                                                     | 80  |
| 6.3 RESULTADOS DE DESEMPEÑO DEL TRAMO: AUTOPISTA PÁTZCUARO-URUAPAN .....                                                                                        | 85  |
| 7. CONCLUSIONES .....                                                                                                                                           | 89  |
| 8. REFERENCIAS.....                                                                                                                                             | 92  |
| ANEXOS .....                                                                                                                                                    | 96  |
| ANEXO A. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE CONSENSO Y ORIGEN .....                                                                                            | 96  |
| ANEXO B. SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO PARA UN PROYECTO SEGÚN SU GRADO DE DESEMPEÑO (PG) .....                                                                | 100 |
| ANEXO C. RECOMENDACIONES PARA LA FABRICACIÓN, TENDIDO COMPACTACIÓN Y ASESEGURAMIENTO DE CALIDAD DE UNA MEZCLA MODIFICADA CON CAUCHO REACCIONADO Y ACTIVADO..... | 102 |

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

La infraestructura carretera es uno de los factores principales que propicia el desarrollo social, económico y cultural de los habitantes de una nación. Además, sustenta el proceso productivo de un país, de manera que mientras más robusta y optimada sea su red carretera, se espera que sea mayor su capacidad productiva.

El sistema carretero ha sido señalado como un agente de crecimiento económico. El aumento o disminución de las redes de transporte afecta, a las actividades sociales y económicas que una región puede admitir; sin embargo, la dinámica de cómo se produce ese crecimiento es una de las áreas menos comprendidas en el transporte, la geografía, la economía urbana, y la ciencia regional (Lei & Levinson, 2007).

En lo que respecta al contexto de México, el sistema vial representa un pilar esencial para la vida productiva y económica del país. A través de ellas se moviliza el 96.9% de los pasajeros y el 56.2% de la carga en el país (SCT, 2019). El sistema nacional de caminos en México se conforma por un total de 750,691 km, de los cuales 172,809 km son carreteras pavimentadas (IMT y SCT, actualización al mes de septiembre de 2019). De esta cantidad de kilómetros pavimentados alrededor del 96 % corresponden a pavimentos asfálticos, de acuerdo a datos publicados por European Asphalt Pavement Association (EAPA) y la National Asphalt Pavement Association (NAPA) (2011), lo cual nos deja de manifiesto que el asfalto es el principal material usado en el país.

Aproximadamente un 63% de la red carretera tiene más de 30 años en operación, lo que sugiere que fueron diseñadas para una realidad diferente a la actual, además, los pesos de las cargas autorizados de los vehículos han crecido sustancialmente (SCT, 2018). De acuerdo con el levantamiento de deterioros de la superficie de rodamiento que realiza anualmente la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), a finales del año 2017 la red carretera se encontraba en un 76% de su longitud en estado bueno y satisfactorio, mientras que el restante 24% en no satisfactorio.

Hasta 2017, los presupuestos, que se han venido reduciendo, se han destinado en su mayoría a la conservación rutinaria y periódica, con objeto de incrementar el porcentaje de la red en estado bueno y satisfactorio. De acuerdo al Presupuesto de Egresos de la Federación (PEF) para el ejercicio del año 2020, la SCT, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes dispuso de un presupuesto total de 54,374.0 millones de pesos, del cual, 34,191.3 millones de pesos se destinaron al área de infraestructura carretera; de éste sector, la conservación y mantenimiento de la red carretera nacional, resultó ser el rubro de acción con mayor presupuesto destinado, con un monto de total 15,414.4 millones de pesos, es decir, el 45.08 % del presupuesto carretero total.

Dado el escenario descrito, las investigaciones, metodologías de diseño e innovaciones tecnológicas, promovidas por las secretarías y asociaciones han sido encaminadas a mejorar el comportamiento de los pavimentos e incrementar así la duración de su vida útil, mejorando con ello las condiciones de transporte sin ocasionar mayores incrementos en los recursos financieros destinados al mantenimiento y conservación de la red vial.

Una de las técnicas de mejora aplicada a los pavimentos flexibles, es la relacionada con la modificación de las mezclas asfálticas mediante el uso de caucho reciclado, proveniente de neumáticos fuera de vida útil (NFVU). Estudios iniciales en la década de los cincuenta involucraron la adición de caucho natural con el objeto de aprovechar su flexibilidad y lograr una superficie de pavimento duradera, obteniendo resultados con pequeños o nulos beneficios en el pavimento asfáltico, además de un costo elevado y una vida de servicio más corta comparada a la de un convencional (Ocampo & Caisedo, 2015). De acuerdo con Ocampo (2015), es hasta la década de los sesenta cuando se encontraron las primeras formulaciones satisfactorias al realizar estudios con caucho sintético.

En concordancia con la investigación de Ocampo & Caisedo (2015), George B. Way (2012) establece que desde mediados 1960, el estado de Arizona en los Estados Unidos ha utilizado un aglutinante de asfalto llamado asfalto ahulado, que consta de aproximadamente un 20 por ciento de caucho molido, proveniente de llantas de desecho y un 80 por ciento de asfalto. Su uso ha contribuido a reducir principalmente el agrietamiento por reflexión, el agrietamiento térmico y el agrietamiento por fatiga. En este sentido, aunado a las mejoras en las propiedades termo-mecánicas de las mezclas asfálticas con caucho, su uso podría sumar a mitigar problemas medioambientales derivados de la acumulación de llantas fuera de uso.

Ante dicho contexto, resulta entonces necesario obtener un mayor sustento a cerca de los beneficios que se obtienen en un pavimento, derivado de la modificación de la mezcla asfáltica con hule de llantas fuera de uso. En atención a esta idea, la presente investigación está dirigida a dar seguimiento a tramos de prueba contruidos en México, con mezclas asfálticas modificadas con caucho de neumático fuera de vida útil, para evaluar su comportamiento en diferentes condiciones de trabajo y hacer una comparativa con tramos adyacentes contruidos con mezclas asfálticas convencionales; así como desarrollar una guía de recomendaciones para la fabricación y colocación de una mezcla modificada con caucho reaccionado y activado (RAR).

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desmesurado crecimiento de la población a nivel mundial en las últimas décadas, ha conllevado inevitablemente a un mayor consumo de recursos y un consecuente aumento en la producción de residuos sólidos (Fernández & Sánchez, 2007). En este sentido las llantas son uno de los artículos que más se consumen y desechan en el mundo, dado el papel

determinante que representan en la industria del transporte y movilidad; además no son biodegradables (es decir que no pueden descomponerse). Las dificultades que se han presentado al gestionar el destino de las llantas, ha contribuido considerablemente en los problemas del medio ambiente en los últimos años.

El desecho a nivel mundial de llantas anualmente es muy elevado generando un alto impacto negativo en el medio ambiente. Para el caso de México se estima que anualmente se desechan unos 25 millones de llantas con un peso aproximado de 25 000 toneladas (Rondón, 2011). Ante este escenario, la idea de ser transformadas y reincorporadas a nuevos procesos productivos por medio del reciclaje, ha adquirido mayor relevancia en tiempos actuales.

Una de las reincorporaciones que se les ha dado a los neumáticos fuera de uso, es la aplicación de caucho molido de llanta, como agente modificador de mezclas asfálticas. Esto ha incluido beneficios en diferentes frentes como el impacto ambiental mediante el uso de millones de llantas de desecho (Bahia *et al.*, 2012), además de promover en los pavimentos mejoras a la deformación permanente, a la fatiga, y a la resistencia al fisuramiento por bajas temperaturas (Ocampo *et al.*, 2015).

Sin embargo, su aplicación ha presentado dificultades de estabilización en la mezcla, relacionadas con el tiempo de almacenamiento del asfalto modificado (Stroup-Gardiner *et al.*, 1993; Abdelrahman, 2006). Esto se produce debido a la diferencia de densidades entre el asfalto y el hule, provocando una separación de fases como lo afirman Biro y Fazekas (2012), lo que caracteriza la sedimentación del caucho residual en los ligantes a través del tiempo (Kudrna y Dašek, 2012) y un fallo prematuro en el producto por la pérdida de adhesión y envejecimiento de la mezcla (Stroup-Gardiner *et al.*, 1993), lo cual ha originado que su manejo y aplicación en la mayoría de los proyectos desarrollados en México, resulte no factible.

Aunado a las ideas expuestas se tiene la situación de la red nacional de carreteras en México, que como ya se ha expresado, un 63% de la red carretera tiene más de 30 años en operación, lo que nos sugiere que fueron diseñadas para una realidad diferente a la actual, en donde los pesos de las cargas de impuestas por los vehículos han crecido sustancialmente. En este sentido, una de las principales fallas asociadas a los pavimentos flexibles del país, son debidos a la fatiga que se presenta dado que las repeticiones de carga superan a las cargas con las cuales fueron diseñados. Esto se traduce sin duda alguna en altos sobrecostos de mantenimiento y operación.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

El manejo de llantas de desecho en el mundo tiene principalmente tres formas de abordar el problema de acumulación de neumáticos de desecho en el medio ambiente; como relleno sanitario, mediante la quema y a través del reciclaje. La quema de llantas

desechadas produce emisiones nocivas en el entorno. El almacenamiento conlleva ocupación de espacios considerables y proliferación plagas como roedores e insectos que constituyen un problema de salud añadido. El reciclaje de neumáticos es factible, dado están compuestos por elementos como el caucho, el hierro y la fibra textil, los cuales son susceptibles a ser transformados y reincorporados a nuevos procesos productivos.

Desde la década de los sesentas, una manera de reincorporar y aprovechar estos residuos ha sido mediante el uso de caucho reciclado, proveniente de neumáticos fuera de vida útil (NFVU), en la modificación de las mezclas asfálticas. De manera particular en los Estados Unidos, Australia, Sudáfrica y se están superando barreras para su introducción y uso en España, Italia y Nueva Zelanda, en estos países se intenta afrontar los problemas de desempeño de los pavimentos y abordar al mismo tiempo la cuestión de contaminación provocada por los vertederos de llantas que han llegado al fin de su vida útil.

El caucho de llantas reciclado aplicado al pavimento puede ser la mejor manera de reducir las llantas de desecho en grandes cantidades y, al mismo tiempo, mejorar algunas propiedades de ingeniería de las mezclas de asfalto (Weidong Cao, 2006).

Con el paso de los años, la industria logró superar los problemas que representa la incorporación de hule de llanta en asfaltos (Abdelrahman, 2006), llevando a cabo la interacción de los materiales por la despolimerización temprana del caucho a altas temperaturas (terminal blend), pero la complejidad de este procedimiento recae, según Sousa *et al.* (2013) en que se eleva el costo por unidad de mezcla.

Ante los altos costos de producción de las mezclas asfálticas modificadas con GCR, Sousa *et al.* (2013) expone un nuevo método de adición llamado “caucho activado y reaccionado” (RAR), es una mezcla en caliente conformada por cemento asfáltico convencional, GCR y un cemento asfáltico estabilizador mineral activado. Esta mezcla permite su producción en plantas convencionales.

Además de las mejoras en los procesos de producción de las mezclas asfálticas modificadas se realizaron ensayos de Fatiga (ASSHTO T321) y de Deformación permanente a temperaturas altas (alrededor de 60°C para ver el comportamiento similar en climas muy cálidos) y establecer también las mejoras mecánicas que este tiene en las mezclas asfálticas.

Por lo anterior y de acuerdo con el análisis de costos realizado por Cheng *et al.* (2012) y Shatnawi (2012), es indispensable demostrar que el incremento de la vida útil de una mezcla asfáltica modificada con caucho, en condiciones reales de trabajo y con reducción en la inversión inicial, es posible mediante el método RAR y la mejor forma de demostrarlo es mediante la valuación de índices de desempeño que permitan cuantificar el posible incremento en la vida útil de los pavimentos.

## 1.4 HIPÓTESIS

Los pavimentos contruidos con mezclas asfálticas de granulometría discontinua (Gap Graded y SMA) y de granulometría densa modificadas con hule proveniente de neumáticos fuera de uso activado y reaccionado, tienen un mejor desempeño que los pavimentos contruidos con mezclas asfálticas convencionales, lo que hace que sea más rentable la construcción de los primeros.

## 1.5 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Para la evaluación del desempeño de pavimentos contruidos con mezclas asfálticas de granulometría discontinua (tipo Gap Graded y SMA) y de granulometría densa, modificadas con hule proveniente de neumáticos fuera de uso activado y reaccionado; se propone determinar el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), profundidad de la rodera, resistencia a la fricción, Profundidad media de la Textura (PMT) y porcentaje de agrietamiento, en tramos de prueba y en tramos aledaños contruidos con mezclas asfálticas convencionales, bajo las mismas condiciones de tráfico. Una vez que se tengan los resultados se podrá hacer una comparativa de los mismos para comprobar si pueden ser equivalentes o mostrar superioridad en su desempeño.

Los tramos de estudio son lo que se enlistan a continuación:

- Autopista Pirámides-Tulancingo en el estado de México e Hidalgo (Tramo contruido con mezcla asfáltica tipo Gap Graded).
- Libramiento Oriente de la ciudad de Morelia (Rehabilitación de tramos aislados del circuito periférico de Morelia con Mezcla densa nivel II del protocolo AMAAC y con mezcla tipo SMA-RAR)
- Autopista Pátzcuaro – Uruapan (Tramo contruido con mezcla asfáltica tipo SMA-RAR).

La mayor parte de los tramos de prueba se encuentran en carreteras concesionadas, en las cuales, semestralmente se efectúan campañas de auscultación por parte de la SCT, donde se obtienen los parámetros ya mencionados. Dicha información estará disponible, lo que sin duda facilitará el alcance de la presente investigación.

## 1.6 CONTRIBUCIONES ESPERADAS

Al finalizar el presente proyecto de investigación se espera tener las siguientes contribuciones:

- ❖ Demostración de que pavimentos contruidos con mezclas asfálticas de granulometría discontinua y de granulometría densa modificadas con hule proveniente de NFU activado y reaccionado tienen un mejor desempeño que los pavimentos contruidos con mezclas asfálticas convencionales.

- ❖ Establecer un sustento técnico en México, referente a la viabilidad de la aplicación de mezclas asfálticas modificadas con hule proveniente de NFU activado y reaccionado.
- ❖ Desarrollo de una guía práctica de recomendaciones para la fabricación, tendido y compactación de una mezcla modificada hule proveniente de NFU activado y reaccionado
- ❖ A largo plazo, reducción del impacto ambiental asociado a los NFU

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

- El presente estudio tiene como objetivo general: evaluar el desempeño de pavimentos construidos con mezclas asfálticas de granulometría discontinua (tipo Gap Graded y SMA) y de granulometría densa, modificadas con hule proveniente de neumáticos fuera de uso activado y reaccionado (RAR), bajo diferentes condiciones reales de tráfico; así como desarrollar una guía de recomendaciones para la fabricación y colocación de una mezcla modificada con caucho reaccionado y activado.

#### 2.1.1 Objetivos particulares

Los objetivos específicos que contribuirán a cumplir el objetivo general de este trabajo de investigación son:

- ✓ **Analizar y comparar** las metodologías de modificación de mezclas asfálticas con hule de neumáticos para establecer las ventajas y desventajas que presentan cada una de ellas.
- ✓ **Realizar** un seguimiento y monitoreo de los tramos de estudio.
- ✓ **Medir** en cada uno de los tramos de estudio los índices de desempeño de un pavimento, tales como: rugosidad, deformación permanente, fricción, macrotextura y agrietamiento.
- ✓ **Comparar** los resultados obtenidos en pavimentos construidos con mezclas asfálticas modificadas con RAR frente a pavimentos construidos con mezclas asfálticas convencionales para comprobar si su desempeño es equivalente o superior.
- ✓ **Elaborar** recomendaciones para el proceso de producción, transporte, tendido y compactación de una mezcla modificada con RAR-X.

### 3. MARCO TEÓRICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

#### 3.1 GENERALIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los pavimentos flexibles son ampliamente utilizados en la mayoría de los países a nivel global y México no es la excepción. En el país, la capa de rodadura de las calles, carreteras, autopistas y pistas de aterrizaje, están construidas en mayor porcentaje con mezclas asfálticas; asimismo, estas últimas asumen un papel fundamental en los pavimentos flexibles no sólo por los volúmenes requeridos en su construcción, sino porque constituyen la parte más costosa de los mismos: la “fachada” que los usuarios observan cotidianamente (Cepeda, 2002).

##### 3.1.1 Componentes de la mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Cepeda (2002) explica que las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el comportamiento funcional de la misma como pavimento.

##### 3.1.1.1 Agregados pétreos

Los agregados minerales o pétreos, son materiales naturales cien (100) por ciento producto de trituración, cribados y en su caso lavados, que aglutinados con un material asfáltico se emplean en la elaboración de mezclas asfálticas (SCT, 2017).

Los agregados se dividen de acuerdo con su tamaño en varias familias: gravas, arenas y finos, según la clasificación de fragmentos de roca y suelo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), por lo que los diámetros de dichos grupos están normalizados.

Algunas propiedades de especial interés en los agregados son el tamaño de la partícula, su limpieza, su dureza, su forma, su textura superficial, su capacidad de adsorción, su afinidad al asfalto y su granulometría. Esta última se refiere a la distribución de tamaño de las partículas de grava, arena y finos de un agregado.

De acuerdo al tipo de mezcla, se combinan las diferentes clases de partículas minerales en proporciones definidas, lo cual conforma su esqueleto granular; de manera que puede formarse una curva granulométrica continua o discontinua (se puede prescindir de una o más fracciones granulares). Dicha estructura dependerá de los esfuerzos y de la intensidad del tráfico (bajo, medio, alto) que se esperan en un proyecto.

Respecto a la forma y textura, los agregados de configuración rugosa, equidimensionales, producen mayor resistencia que los redondeados y de superficie lisa. Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna que una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una masa más compacta de material (Garnica, Delgado, & Gómez, 2004).

El desgaste está asociado a la dureza de las partículas. Se utiliza como un indicador de la tenacidad del material para resistir el impacto de las cargas durante la fabricación, tendido y compactación de la mezcla (Ayala del Toro, Delgado, Cuellar, & Salazar, 2019). Entonces las propiedades mecánicas del agregado mineral se determinan mediante las pruebas que evalúan este parámetro; ejemplos de estas son: degradación del agregado por abrasión e impacto en la Máquina de los Ángeles y degradación por abrasión en la máquina Micro-Deval.

Finalmente es importante destacar que, de acuerdo con lo señalado en la literatura, los agregados pétreos constituyen del 88 al 96 % del peso de la mezcla asfáltica y algo más del 75 % del volumen de la misma, por lo que influyen significativamente en sus propiedades mecánicas. Esta idea nos deja de manifiesto que las propiedades de los agregados deben estar completamente evaluadas.

#### *3.1.1.2 Cemento asfáltico*

El Instituto de Asfalto define al asfalto o cemento asfáltico como “un cementante de color marrón oscuro a negro en el que sus componentes predominantes son los asfáltenos que pueden ser naturales u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo” (Asphalt Institute, 1993).

El asfalto posee propiedades físicas, químicas y de reología físico-mecánicas, mismas que le proveen todas sus particularidades y bondades que hacen de éste, el producto esencial que es hoy en la industria de la construcción de carreteras. Estas propiedades se describen en los párrafos siguientes.

#### **Propiedades físicas:**

El asfalto es un material visco-elasto-plástico, lo que quiere decir que su comportamiento tiene que ver directamente con la temperatura y la frecuencia con la que se le apliquen las cargas, con deformaciones recuperables (elásticas) y no recuperables (plásticas). Para una misma carga y un mismo asfalto, los diferentes tiempos de aplicación de la carga implicarán diferentes propiedades (Garnica, Delgado, & Gómez, 2004).

Su color es plomo (gris oscuro), de consistencia sólida, semisólida o líquida, esto dependiendo de la temperatura a la que es expuesto (Angulo & Duarte, 2005). En otras palabras, este material se comportará como un sólido elástico cuando se encuentre a temperaturas bajas y a medida que aumente la temperatura el comportamiento del material pasará a ser viscoso.

#### **Propiedades Químicas:**

De acuerdo con Angulo y Duarte (2005), este cementante contiene tres importantes propiedades químicas que sobresalen: consistencia, polaridad y pureza, donde la primera se debe a su habilidad para fluir a diferentes temperaturas, esto en razón a que el asfalto es un material termoplástico, es decir, se fluidifica a temperaturas elevadas. La segunda precisa el comportamiento de afinidad química con las diferentes cargas eléctricas. La tercera define la composición química del asfalto. Esta última, al igual que el petróleo crudo,

es una mezcla de varios hidrocarburos, los cuales se clasifican como lo establece Roberts (1996) en cuatro amplias fracciones cada vez más polares para su análisis individual, estas son: saturados, aromáticos, maltenos (resinas y aceites) y asfaltenos.

En el libro de texto “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction” (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 1996), se definen cada uno de los componentes del asfalto como sigue: Los saturados son líquidos incoloros a temperatura ambiente y apenas cambian con el tiempo. Los hidrocarburos saturados actúan como antioxidantes e impermeabilizantes; tienen una contribución contraria a la susceptibilidad a la temperatura del asfalto.

Los aromáticos de nafteno son líquidos de color amarillo o rojo a temperatura ambiente y se consideran el componente suavizante del asfalto. También son la parte que determina la fracción de envejecimiento de cómo cambian las propiedades del asfalto con el tiempo en condiciones de servicio. Los aromáticos polares son sólidos o semisólidos a temperatura ambiente y están relacionados con la ductilidad (cómo se puede estirar el asfalto antes de la fractura) del asfalto. También son uno de los componentes que definen las fracciones de envejecimiento.

Los maltenos son solubles y están compuestos de resinas y aceites. Las resinas son de tonalidad oscura y semisólido; son fluidos cuando se calientan y se vuelven frágiles cuando están fríos. Los maltenos trabajan como agentes que dispersan los asfaltenos a través de los aceites para proporcionar un líquido homogéneo. Los aceites son generalmente líquidos incoloros o blancos. Son solubles en la mayoría de los solventes.

Finalmente, los asfaltenos son las moléculas asociadas con la polaridad más alta. Son sólidos amorfos negros o marrones que contienen carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno y metales pesados como vanadio, níquel y hierro. Estas moléculas representan un papel importante dándole la viscosidad a los cementos asfálticos.

### **Propiedades reológicas:**

Asimismo, el asfalto posee las siguientes propiedades de reología físico-mecánicas, mismas que son determinantes para evaluar la capacidad de flujo de un asfalto bajo condiciones ambientales específicas:

- 1) Viscosidad: Propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos de viscosidad elevada tienen mayor resistencia a fluir en comparación a un fluido con viscosidad baja que fluye con facilidad.
- 2) Elasticidad: Propiedad que tienen los materiales para recuperar su forma al finalizar o disminuir la carga aplicada causante de la deformación.
- 3) Rigidez: relación entre el esfuerzo y la deformación en función de la temperatura y la frecuencia de carga.
- 4) Resistencia de corte: se refiere a la velocidad de cambio de viscosidad de un asfalto sometido a corte.

- 5) Ductilidad: habilidad del asfalto a estirarse sin romperse dentro de su rango plástico. Permite normalmente tener mejores propiedades aglomerantes.
- 6) Envejecimiento: se caracteriza principalmente por un endurecimiento del asfalto. Es uno de los fenómenos que contribuyen en mayor medida al deterioro de las mezclas asfálticas con el tiempo, por lo que resulta de gran interés su estudio. En este sentido se expone con mayor detalle en las siguientes líneas.

El fenómeno del envejecimiento en los asfaltos produce un cambio en su comportamiento reológico y en su composición ( Asphalt Institute, 1983). Éste se caracteriza principalmente por un endurecimiento del asfalto, lo que se traduce en un aumento en los valores de rigidez o reducción de la flexibilidad del firme. Aunque el incremento de la rigidez hace que el material envejecido muestre menores deformaciones permanentes (rutting) bajo cargas de tráfico, la pérdida de ductilidad de la mezcla la vuelve más propensa a daños por fatiga y pérdida de su potencial de recuperación (López & Miró, 2015).

De acuerdo con López y Miró (2015), el envejecimiento es principalmente asociado con la pérdida de componentes volátiles y la oxidación del asfalto durante la construcción de la mezcla asfáltica, y con la oxidación progresiva del material durante su vida de servicio.

Petersen (1984) indicó que hay tres factores fundamentales, los cuales tienden a ser universalmente aceptados, que gobiernan los cambios que podrían causar el endurecimiento de los asfaltos:

- 1) Pérdida de volátiles: pérdida de los componentes oleosos del betún por volatilidad o por absorción por áridos porosos (exudación);
- 2) Oxidación: cambios en la composición química de las moléculas de betún por la reacción con el oxígeno del aire; y
- 3) Efectos tixotrópicos (endurecimiento estérico o steric hardening): estructuración molecular que produce efectos tixotrópicos

Es aceptado a nivel mundial que, desde el punto de vista temporal, el envejecimiento ocurre en dos etapas (Mirza & Witczak, 1995): envejecimiento a corto plazo y envejecimiento a largo plazo. La primera, el envejecimiento a corto plazo (Short Term Aging, STA), se caracteriza por que la mezcla experimenta la volatilización y una parte de la oxidación de una manera muy rápida (el proceso es llevado a cabo en cuestión de horas); mientras que, en la segunda etapa, correspondiente al envejecimiento a largo plazo (Long Term Aging, LTA), el proceso es lento y sus efectos se detectan con el paso de los años. El envejecimiento a largo plazo se asocia exclusivamente con la degradación producida por el medio ambiente durante la vida útil o de servicio de las mezclas.

### 3.1.1.3 Asfalto modificado

Los asfaltos modificados consisten en la incorporación de un agente externo al cemento asfáltico o ligante, el cual permite promover mejoras en sus propiedades físicas y reológicas, tal que su aplicación sea más eficaz bajo diferentes condiciones de servicio, respecto a un ligante convencional.

El asfalto es susceptible a la temperatura. Por ser un material viscoelástico, presenta cambios continuos en sus características, según el rango de temperaturas de operación: es rígido a bajas temperaturas y fluido cuando estas son altas. El principal objetivo al utilizar agentes modificadores en el cemento asfáltico, es lograr propiedades reológicas no obtenidas en los asfaltos producidos con técnicas convencionales de refinación, principalmente las que se relacionan con la sensibilidad térmica (Delgadillo, 2014).

Aunque puede existir la idea de considerar como desventajas el incremento del costo inicial que representa el uso de modificadores, un posible envejecimiento prematuro por las altas temperaturas de mezclado (>180 °C) o problemas de construcción como la trabajabilidad de un asfalto modificado y en ocasiones la separación de fases; la literatura concuerda en que un asfalto modificado adquiere mejoras tales como: menor rigidez ante bajas temperaturas, mayor resistencia a la deformación bajo una temperatura elevada, mayor adherencia y elasticidad, lo que en conjunto le confiere a una mezcla asfáltica un incremento en su vida útil. Lo anterior se refleja en una reducción de los costes de mantenimiento, produciendo con ello rentabilidad económica a mediano y largo plazo.

Los agentes modificadores que existen en el mercado actual son diversos, no obstante, los más comunes son los que producen en base a polímeros. Un material polimérico es aquel que contiene múltiples partes enlazadas químicamente y que están unidas entre sí para formar un sólido (Smith, Hashemi, Cázares, & González, 2006).

De manera general los polímeros se pueden clasificar en dos grupos: los Termo-endurecibles (poseen alta resistencia, rigidez y baja ductilidad), y los Termo-Plásticos (presentan deformaciones plásticas con poca elasticidad). Estos últimos se dividen en plastómeros y elastómeros (Delgadillo, 2014).

En México la SCT establece en la norma N·CMT·4·05·002/06, que los principales modificadores utilizados en materiales asfálticos, se clasifican en: **polímeros tipo I** (elastómeros cuya función principal es disminuir la susceptibilidad a altas y bajas temperaturas), **polímeros tipo II** (ideales para bajas temperaturas), **polímeros tipo III** (plastómeros que promueven mayor resistencia a la deformación en altas temperaturas) y **hule molido de neumáticos**, estableciendo los requisitos de calidad para los cementos asfálticos modificados con dichos materiales.

Entre los polímeros tipo I más comunes se encuentran: caucho natural, estireno-butadieno (SB) y estireno-butadieno-estireno (SBS).

Los polímeros tipo II mejoran el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Son fabricados con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex.

En cuanto a los polímeros tipo III, presentan una alta rigidez temprana, sin embargo, la resistencia inicial suele ir acompañada de una menor tolerancia a la deformación. Los plastómeros son fabricados mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras.

Finalmente, la norma describe al hule molido de neumático como un modificador de asfalto que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión en las mezclas asfálticas, al reducir la aparición de grietas por fatiga y por cambios de temperatura. Es fabricado a partir del producto de la molienda de neumáticos fuera de uso. Cabe señalar que este modificador es el que será analizado en este proyecto, por lo que el capítulo 3.2 está dedicado a la temática de los materiales asfálticos modificados a partir de la incorporación de hule molido de llantas.

### 3.1.2 Tipos de mezclas asfálticas

Garnica et al. (2005), menciona que existen varias clasificaciones de mezclas asfálticas, de acuerdo con el parámetro considerado para establecer las diferencias. Así, conforme las fracciones de agregado pétreo empleado en la elaboración de la mezcla, éstas se dividen en mástico asfáltico; mortero asfáltico; macadam asfáltico; y concreto asfáltico. Si la temperatura es considerada, se dividen en mezclas en frío y mezclas en caliente. Si el parámetro considerado es el porcentaje de vacíos de aire, las mezclas pueden ser densas o cerradas; semidensas o semicerradas; abiertas y porosas, dependiendo de si tienen menos del 6%, entre el 6 y el 12% de vacíos de aire, entre el 12 y el 18% o más del 20%, respectivamente.

Los tipos de mezclas asfálticas en caliente se definen por la granulometría de su agregado mineral y son tres los más comúnmente utilizados. Estos tipos ilustrados en la figura 1, son: i) mezcla asfáltica de granulometría densa, ii) stone matrix asphalt (SMA) o gap graded y iii) mezcla de granulometría abierta conocida como open graded (Bocanegra, 2019). De esta clasificación se desprenden los tipos de mezclas a los que está orientado el presente trabajo, dado este hecho, en los siguientes párrafos se da una descripción más detallada de las mismas.

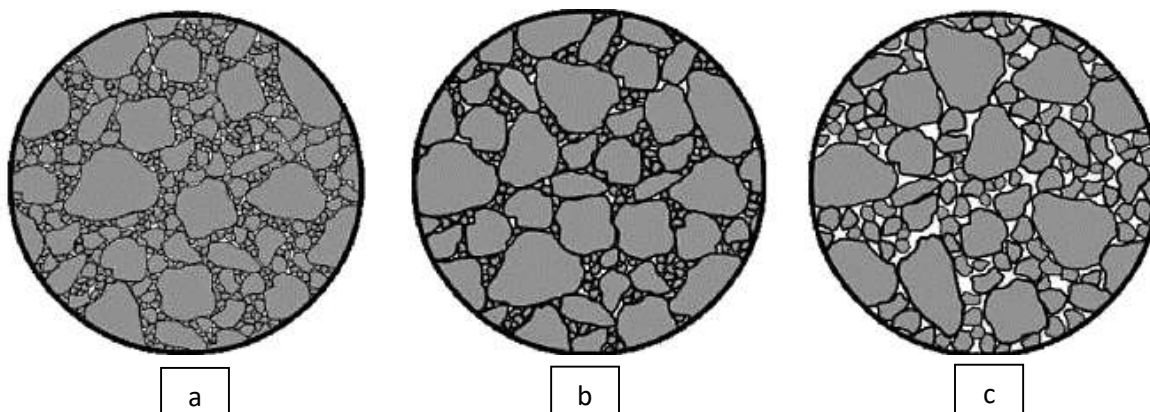


Figura 1. Tipos de mezclas asfálticas: a) Densa, b) SMA, c) Abierta. Fuente: [pavementengineering.blogspot.com](http://pavementengineering.blogspot.com)

- **Mezcla asfáltica de granulometría densa**

Consiste en una distribución uniforme de tamaños de agregado, del más pequeño al más grande (bien graduado), aglutinados con cemento asfáltico en cantidad suficiente para obtener un volumen de vacíos de aire en la mezcla de 4 por ciento. Esta idea queda ilustrada en la figura 1-a.

Para la producción en México y de acuerdo con la norma N-CMT-4-04/17 de la SCT, el material pétreo bien graduado debe tener un tamaño nominal entre 37.5 (1 ½ in) y 9.5 milímetros (3/8 in), que satisfaga los requisitos de calidad establecidos en la misma norma. Los cementos asfálticos que se usen en la fabricación de estas mezclas deberán cumplir con lo establecido en la Norma N-CMT-4-05-004/18, correspondiente a la “Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)”.

Este tipo de mezcla es apta para cualquier condición de tráfico. Los requisitos de calidad de la mezcla dependerán justamente del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de ocho punto dos toneladas (8.2 ton), acumulados durante un periodo de servicio en el carril de diseño no menor de 10 años ( $\Sigma L$ ), valor obtenido con el método del Instituto de la UNAM.

Se consideran cuatro niveles de tránsito, los cuales se indican en la Tabla 1 de esta sección.

Tabla 1. Niveles de tránsito esperados en términos de número de ejes equivalentes. Fuente: IMT, Publicación técnica No. 602. 2020.

| Nivel de diseño | Numero de ejes equivalentes de diseño         | Condición de Tránsito |
|-----------------|-----------------------------------------------|-----------------------|
| Nivel 1         | $\Sigma L \leq 1 \times 10^6$                 | Bajo                  |
| Nivel 2         | $1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 1 \times 10^7$ | Intermedio            |
| Nivel 3         | $1 \times 10^7 < \Sigma L \leq 2 \times 10^7$ | Alto                  |
| Nivel 4         | $\Sigma L \leq 2 \times 10^7$                 | Muy alto              |

Para los niveles de tránsito bajo e intermedio, los requisitos de calidad de la mezcla corresponderán a los establecidos en la metodología de diseño Marshall; mientras que la condición de tránsito alto y muy alto, la mezcla deberá cumplir con los requerimientos establecidos en la metodología de diseño Superpave. Ambas metodologías se describen en la sección 8.1.3 de este capítulo.

Normalmente la mezcla densa se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o incluso en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes (SCT, 2008).

- **Mezcla asfáltica gap graded**

Las mezclas de granulometría gap graded (discontinua) utilizan una gradación de agregados con partículas que varían de gruesas a finas con ausencia de algunos tamaños intermedios o que están presentes en pequeñas cantidades. Su curva granulométrica puede tener una región "plana" que indica la ausencia de un tamaño de partícula o bien, una pendiente pronunciada que indica pequeñas cantidades de estos tamaños intermedios de agregados. Estas mezclas también se caracterizan por el contacto piedra con piedra y pueden ser más permeables que las mezclas de granulometría densa o altamente impermeables, como en el caso de la mezcla denominada "Stone Matrix Asphalt" (SMA).

La función de las mezclas gap-graded es similar a las mezclas de gradación densa porque estas también proporcionan capas densas impermeables cuando la compactación es apropiada. El rango de los agregados va desde gruesos hasta finos, con poca presencia de tamaños intermedios (Minaya & Ordoñez, 2014).

- **Stone matrix asphalt (SMA)**

La mezcla asfáltica Stone-Mastic Asphalt o en ocasiones llamada "gap graded", tiene origen en un diseño alemán concebido para resistir el ahuellamiento y abrasión provocados por los neumáticos de vehículos que llevan elementos antideslizantes contra la nieve adheridos (cadenas, clavos, etc.), y hoy en día asegura pavimentos durables.

Su elevada estabilidad reside en dos componentes: una fuerte estructura granular que se basa en el contacto de piedra sobre piedra para proveer mayor resistencia, así como, un mortero altamente cohesivo producto de un elevado contenido de ligante y filler (material que pasa el tamiz N° 200) más la adición de fibras celulósicas (Werner, 2005).

Derivado de las propiedades de una mezcla SMA se han registrado ventajas con respecto a otras tipologías de mezclas, tales como: mejoras en la resistencia al ahuellamiento (NCAT, 1997), mayor resistencia al agrietamiento que una mezcla de granulometría densa, debido probablemente al relativamente alto contenido de asfalto. Otras de las bondades son la reducción del ruido producido por el contacto de los neumáticos con la superficie del pavimento, la mejora de la resistencia a la fricción y una mejor visibilidad, que tiene que ver con la textura rugosa de la superficie del SMA, la cual permite que se pueda tener más agua

entre la estructura de la mezcla SMA que sobre la superficie. esto promueve la reducción del deslumbramiento nocturno por la reflexión de la luz de los vehículos que vienen en sentido contrario, un incremento en la visibilidad del señalamiento horizontal y una reducción en la salpicadura y pulverización del agua (National Asphalt Pavement Association , 2002).

En México la norma N-CMT-4-04/17 de la SCT, establece que una mezcla SMA debe tener una granulometría discontinua, con tamaño nominal entre 19.0 y 9.5 milímetros que satisfagan los requisitos de calidad de la misma normativa, y que además tengan un mínimo de cuatro por ciento de vacíos en la mezcla asfáltica.

Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito.

### 3.1.3 Métodos de diseño de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas han sido típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento (IMT, 2005). En México, el método de diseño Marshall es el más usado, mientras que el más reciente y que recién comienza a tener auge en el país, es la metodología de diseño Superpave, adaptada en lo que se conoce como **Protocolo AMAC**. A continuación, se describen los aspectos más relevantes de ambas metodologías.

#### 3.1.3.1 Método Marshall

El método Marshall para el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. Partiendo de esta primera idea, el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un propio criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5"), y está pensado para diseño en laboratorio (Determinación optima de asfalto para una combinación específica de agregados) y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa.

En el diseño Marshall se utilizan especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto- agregado (ASTM D1559). Los principios en los que se centra la metodología Marshall son: la determinación de la densidad y análisis de vacíos de la mezcla compacta, así como el ensayo denominado "estabilidad y flujo" de los

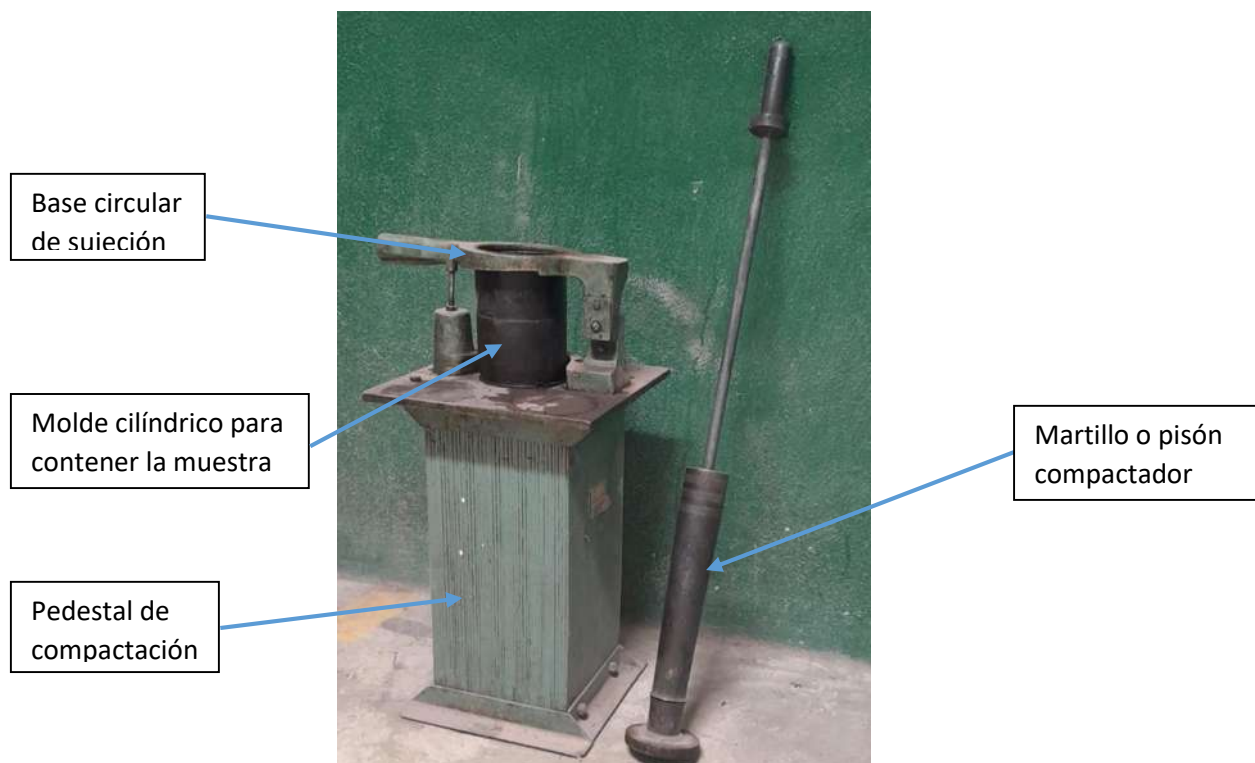
especímenes compactados; un aspecto que es importante destacar es que en este proceso de diseño no tiene especificado pruebas de calidad para agregados pétreos ni para cementos asfálticos. En los párrafos subsecuentes se abordan los principios fundamentales de este método.

- **Granulometría de diseño**

La metodología Marshall utiliza una gráfica semi logarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentra el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica (Garnica, Delgado, & Gómez, 2004).

- **Compactación de los especímenes de prueba**

La compactación de las probetas se basa en los impactos que se les confieren, por medio de un dispositivo de acero conocido como martillo Marshall, mismo que consta de una base plana y circular de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro y un pistón de 4.536 g (10 lb), montado de forma que se pueda conseguir una caída libre del mismo sobre la base desde una altura de 457.2 mm (18"). Tiene además un pedestal de compactación, que consiste en una pieza prismática de madera de 200 x 200 x 460 mm (8 x 8 x 18 ") con un plato de acero de 305 x 305 x 25 mm (12 x 12 x 1 "). En la figura 2 se ilustran los componentes de este aparato.



*Figura 2. Equipo de compactación Marshall. Fuente: Imagen capturada por el autor.*

- **Determinación de la gravedad específica**

Consiste en determinar el peso específico de cada una de las probetas de diseño. Puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se desarrolla de acuerdo con la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas empleando parafina, cuando se tienen especímenes con absorción mayor al 2 por ciento; o ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando superficies saturadas de especímenes seco, cuando se trata de especímenes no absorbentes (Absorción menor al 2 %).

- **Estabilidad y flujo**

La estabilidad y flujo corresponden a un ensayo dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. El valor de estabilidad es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente; mientras que la deformación bajo la carga a la cual ocurre la falla en la mezcla compacta, está asociada al termino de flujo.

La prueba inicia con un acondicionamiento de las probetas, que consiste en sumergir los especímenes en un baño María a  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

El paso siguiente es colocar los especímenes (uno a la vez) en el dispositivo conocido como prensa Marshall; consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y de unas herramientas de medición de carga y deformación.

La carga es aplicada a una deformación constante de 51mm (5") por minuto, hasta que ocurra la falla del espécimen.

La cantidad de carga (Newtons) requerida para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall. En este mismo instante se prestará atención a la lectura del medidor de fluencia, misma que se registra como la fluencia de la muestra.

- **Análisis de densidad y vacíos**

Después de que se han llevado a cabo las pruebas de estabilidad y flujo, se procede a hacer el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. El objeto de este ensayo es determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compacta, es decir, cuantificar las pequeñas oquedades con aire que se encuentran entre las partículas de agregado recubiertas con asfalto. este porcentaje se obtiene a partir del peso total de cada probeta compacta y del peso específico teórico de la mezcla de diseño (sin vacíos). Este último puede ser calculado en base al peso específico del asfalto y de los agregados de la mezcla, teniendo en consideración un margen apropiado para tener contemplado el valor de asfalto que es absorbido por el agregado; otro método que se puede usar para el mismo fin es el ensayo normalizado AASHTO T 209, efectuado sobre la muestra de la mezcla de diseño sin compactar.

Con los valores ya mencionados es posible calcular el porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

- **Especificaciones generales del método**

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos

de aire, el cual es de 4%. Todas las propiedades medidas y calculadas con este contenido de asfalto deberán ser evaluadas, comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas, mismas que se especifican en las tablas 2 y 3.

*Tabla 2. Criterio de diseño de mezclas Marshall. Fuente: IMT, Publicación técnica No. 255. 2004.*

| <b>Método Marshall</b>                                               | Tráfico ligero |      | Tráfico medio  |      | Tráfico pesado |      |
|----------------------------------------------------------------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
|                                                                      | Carpeta y base |      | Carpeta y base |      | Carpeta y base |      |
| <b>Criterio de la mezcla</b>                                         | Mín.           | Máx. | Mín.           | Máx. | Mín.           | Máx. |
| <b>Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes</b> | 35             |      | 50             |      | 75             |      |
| <b>Estabilidad, (N) (lb)</b>                                         | 3336           | -    | 5338           | -    | 8006           | -    |
|                                                                      | 750            | -    | 1200           | -    | 1800           | -    |
| <b>Flujo, (0.25 mm) (0.01 in)</b>                                    | 8              | 18   | 8              | 16   | 8              | 14   |
| <b>Porcentaje de vacíos</b>                                          | 3              | 5    | 3              | 5    | 3              | 5    |
| <b>Porcentaje de vacíos en los agregados minerales (VMA)</b>         | Ver Tabla 3    |      |                |      |                |      |
| <b>Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)</b>                | 70             | 80   | 65             | 78   | 65             | 75   |

*Tabla 3. Porcentaje mínimo de vacíos de agregado mineral (VMA). Fuente: IMT, Publicación técnica No. 255. 2004.*

| <b>Máximo tamaño nominal de partícula</b> |        | <b>Porcentaje mínimo VMA</b>     |      |      |
|-------------------------------------------|--------|----------------------------------|------|------|
|                                           |        | Porcentaje diseño vacíos de aire |      |      |
| mm                                        | in     | 3.0                              | 4.0  | 5.0  |
| 1.18                                      | No. 16 | 21.5                             | 22.5 | 23.5 |
| 2.36                                      | No. 8  | 19.0                             | 20.0 | 21.0 |
| 4.75                                      | No. 6  | 16.0                             | 17.0 | 18.0 |
| 9.5                                       | 3/8    | 14.0                             | 15.0 | 16.0 |
| 12.5                                      | 1/2    | 13.0                             | 14.0 | 15.0 |
| 19                                        | 3/4    | 12.0                             | 13.0 | 14.0 |
| 25                                        | 1.0    | 11.0                             | 12.0 | 13.0 |
| 37.5                                      | 1.5    | 10.0                             | 11.0 | 12.0 |

### 3.1.3.2 Método Superpave

En 1987, el SHRP (Strategic Highway Research Program) comenzó formular el desarrollo de un nuevo sistema para diseñar mezclas para pavimentos asfálticos. Como producto concluyente de esta investigación surgió la metodología de diseño conocida como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). Esencialmente, se puede visualizar como un procedimiento de mayor alcance y más apegado a las condiciones reales de trabajo, ya que, los diseños de mezclas asfálticas parten desde las especificaciones de las propiedades del cemento asfáltico y agregado pétreo; el análisis volumétrico de las mezclas y la predicción de su desempeño en el pavimento, son también parte de este sistema que

incluye además métodos de prueba pertinentes, equipos de ensayo y criterios de aceptación o rechazo.

Con lo expuesto anteriormente se puede establecer que a diferencia del método Marshall, esta metodología evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfaltos) y su interacción cuando están mezclados. En lo sucesivo se hace una descripción de los fundamentos del método Superpave.

- **Agregado Mineral**

Las propiedades del agregado pétreo mineral son en gran parte responsables del desempeño de las mezclas asfálticas en caliente. Por lo que en el sistema Superpave se evalúan y especifican dos tipos de propiedades de los agregados: propiedades de consenso y propiedades de origen.

Las propiedades de consenso se entienden como aquellas que son consideradas por los investigadores de SHRP como críticas para alcanzar un alto desempeño de la mezcla. Deben cumplir con valores que a su vez se ven influenciados por el nivel de tránsito y la posición de la capa granular en la estructura del pavimento. Las propiedades de consenso son: Angularidad del agregado fino, Partículas alargadas y lajeadas, así como el Contenido de arcilla o equivalente de arena.

De acuerdo al SHRP, la angularidad de los agregados promueve una mezcla asfáltica con alto grado de fricción interna y con ello, una considerable resistencia al corte y ahuellamiento; al reducir el número de partículas alargadas y lajeadas se obtienen mezclas con agregados gruesos menos susceptibles a fractura en el proceso de fabricación, tendido, compactación y bajo condiciones de tránsito. Al limitar la cantidad de arcilla en los agregados, se favorece y mejora la unión de estos últimos con el cemento asfáltico.

En cuanto a las propiedades de origen, puede considerarse que deben su designación a que han sido utilizadas frecuentemente por los centros de investigación para evaluar las fuentes locales de agregados. Acorde con las investigaciones de la SHRP, el cumplimiento de estas propiedades es importante, pero no se especifican valores críticos ya que son muy específicas de la fuente de obtención de los áridos; por lo que deben ser especificadas de acuerdo a la experiencia de zona donde se desarrolle el proyecto. Las propiedades de origen son: Tenacidad o dureza, Durabilidad y Materiales deletéreos.

La dureza se mide con la prueba de abrasión por impacto en la máquina de los ángeles. La durabilidad se infiere por medio del ensayo de Intemperismo acelerado de los agregados, por acción de una solución de sulfato de sodio o magnesio. Finalmente, la presencia de materiales deletéreos se mide con el ensayo determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales.

En el anexo A de este documento, se presenta la descripción de los ensayos para la determinación de las propiedades de consenso y origen, así como ensayos

complementarios en materiales pétreos para su uso en mezclas asfálticas, establecidos por la SCT.

- **Granulometría de los agregados**

Los investigadores del SHRP refinaron las especificaciones de graduación existente y desarrollaron cartillas de granulometría basadas en la ecuación de Fuller. Dicha ecuación representa las curvas de máxima densidad (y mínimo VMA) para cada tamaño de áridos.

El resultado del uso de la ecuación de Fuller, es que se obtienen mezclas de fácil compactación, pero que tienden a ser muy frágiles y a poseer pocos vacíos en el agregado, en atención a esto el sistema Superpave utiliza cartillas en las cuales se incluyen puntos de control y una zona restrictiva. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

La zona restrictiva se propuso en SHRP para evitar mezclas con gran proporción de arenas finas, con el propósito de eludir granulometrías con tendencia a la línea de máxima densidad, ya que esto normalmente conduce a una carente cantidad de vacíos del agregado mineral (VAM).

Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción, satisface los requerimientos granulométricos de Superpave, con lo que se asegura una mezcla con un fuerte esqueleto granular y un adecuado volumen de vacíos, condiciones que en conjunto propician una mayor resistencia a la deformación permanente y una mayor vida útil de la mezcla.

En estas cartillas, las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abscisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45, por lo que la curva de máxima densidad queda representada por una recta, la cual va desde el origen hasta el tamiz por el cual pasa el 100% de los agregados (tamaño máximo). La Figura 3 es un ejemplo de lo anterior, donde se muestra un esquema para un tamaño máximo de agregado de 25 mm.

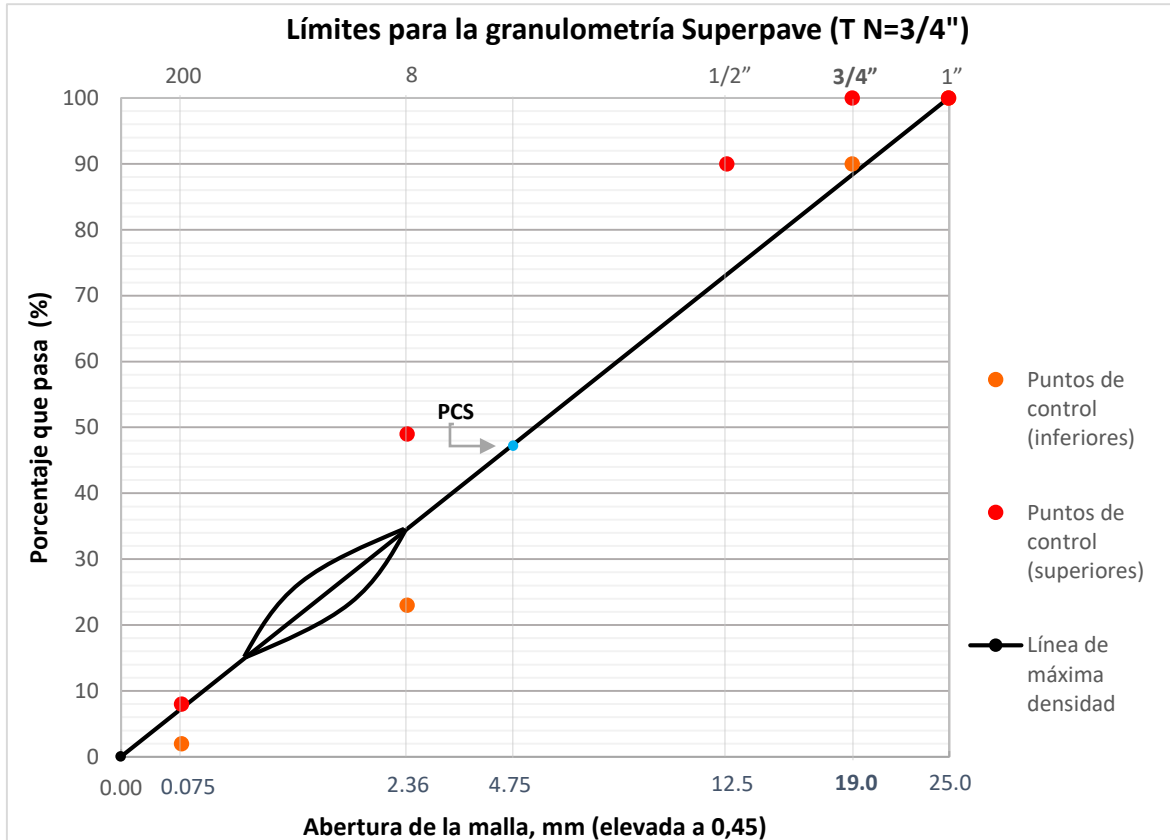


Figura 3. Límites de la granulometría Superpave para un tamaño nominal de 19 mm (3/4''). Fuente: En base a AASHTO M323, elaboración propia.

- **Caracterización del cemento asfáltico**

Las especificaciones del sistema Superpave se enfocan en simular por medio de ensayos normados de laboratorio, las 3 etapas críticas a las cuales se ve sometido el asfalto durante su periodo de vida útil. Estas tres condiciones se describen a continuación.

El primer estado corresponde al asfalto original, los ensayos ejecutados en esta primera etapa, representan las condiciones que se dan durante el transporte, almacenamiento y manejo del ligante asfáltico.

Un segundo estado equivale al envejecimiento del ligante, producido luego de la fabricación, tendido y compactación de la mezcla asfáltica en campo. Es simulado mediante un proceso de envejecimiento del asfalto, empleando para ello un equipo denominado como: Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO, por sus siglas en inglés Rolling Thin Film Oven). Este procedimiento expone una película delgada de asfalto a una fuente de calor y circulación de aire para aproximar el envejecimiento que sufre el asfalto en esta segunda etapa.

Finalmente, el tercer estado es el envejecimiento del ligante de la mezcla asfáltica a partir del proceso finalizado de compactación en campo, hasta cuando ha permanecido en servicio por un periodo para el cual fue diseñada. Esta etapa se simula mediante el uso del equipo conocido como: vasija de envejecimiento a presión (PAV, por sus siglas en inglés Pressure Aging Vessel), a través un periodo de exposición de muestras de asfalto a calor y presión, para representar el envejecimiento del pavimento a lo largo de los años de servicio.

Es así como en el sistema Superpave se evalúan las propiedades físicas y reológicas del asfalto original (como sale de la refinería) y envejecido en laboratorio; simulando así las condiciones reales, presentes en la vida útil del pavimento asfáltico.

De esta evaluación se desprende el sistema de clasificación PG (por sus siglas en inglés: Performance Grade), en el que se determinan las temperaturas bajo las cuales el asfalto presenta un desempeño adecuado, es decir, esta clasificación establece las especificaciones que deberá tener el ligante asfáltico a temperaturas propias a las que se verá sometido el pavimento, aunado al volumen y velocidad del tránsito en este último. De acuerdo con este sistema, el cumplimiento de estas especificaciones asegura un desempeño adecuado para resistir deformaciones, agrietamientos por temperaturas bajas y agrietamiento por fatiga.

La nomenclatura utilizada para definir el grado de comportamiento de los asfaltos es: PG XX -YY, donde:

PG = Iniciales de la clasificación por grado de desempeño (Performance Grade),

XX = Temperatura Máxima a la cual el asfalto tendrá un desempeño satisfactorio,

-YY = Temperatura Mínima a la cual el asfalto tendrá un desempeño satisfactorio.

En México la norma N-CMT-4-05-004/18, establece los requisitos de calidad de los cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG), para ser utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas o para la fabricación de emulsiones asfálticas, que se utilicen en la construcción de carpetas o capas de rodadura, ya sea como cementos asfálticos convencionales o modificados.

De acuerdo a esta normativa mexicana, en lo que respecta a la nomenclatura, al valor de la temperatura máxima se le adiciona una letra mayúscula que corresponde a un ajuste que tiene que ver con la intensidad del tránsito esperada y la velocidad de operación de la carretera, atendiendo lo anterior, dicha letra puede ser: “S” para un ajuste normal, “H” si el ajuste es alto, “V” para un muy alto y “E” para un ajuste extremadamente alto. De este modo las denominaciones de asfaltos grado PG en México quedan expresadas en la tabla 4 de esta sección.

Tabla 4. Clasificaciones del cemento asfáltico por grado PG en México. Fuente: SCT, Norma N·CMT·4·05·004/18, elaboración propia.

| Clasificación | Temperatura Máxima (°C) | Nivel de ajuste | Temperatura Mínima (°C) | Denominación |
|---------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|--------------|
| PG            | 64                      | S               | -16                     | PG 64S -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 64S -22   |
|               |                         | H               | -16                     | PG 64H -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 64H -22   |
|               |                         | V               | -16                     | PG 64V -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 64V -22   |
|               |                         | E               | -16                     | PG 64E -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 64E -22   |
| PG            | 70                      | S               | -16                     | PG 70S -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 70S -22   |
|               |                         | H               | -16                     | PG 70H -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 70H -22   |
|               |                         | V               | -16                     | PG 70V -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 70V -22   |
|               |                         | E               | -16                     | PG 70E -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 70E -22   |
| PG            | 76                      | S               | -16                     | PG 76S -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 76S -22   |
|               |                         | H               | -16                     | PG 76H -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 76H -22   |
|               |                         | V               | -16                     | PG 76V -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 76V -22   |
|               |                         | E               | -16                     | PG 76E -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 76E -22   |
| PG            | 82                      | S               | -16                     | PG 82S -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 82S -22   |
|               |                         | H               | -16                     | PG 82H -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 82H -22   |
|               |                         | V               | -16                     | PG 82V -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 82V -22   |
|               |                         | E               | -16                     | PG 82E -16   |
|               |                         |                 | -22                     | PG 82E -22   |

La selección del cemento asfáltico para un proyecto según su grado de desempeño (PG), considerará las temperaturas máxima y mínima de la zona donde se ubicará la obra, realizando un ajuste debido a la intensidad del tránsito y a la velocidad de operación de la carretera; la descripción detallada de este proceso se presenta en el anexo B de esta investigación.

En cuanto a los requisitos de calidad, la norma mexicana establece que los cementos asfálticos con los grados de desempeño (PG), seleccionados como se indica en el anexo C, antes y después de envejecidos en el laboratorio, deberán cumplir con lo establecido en la tabla 5.

Tabla 5. Requisitos de calidad del asfalto por grado PG en México. Fuente: SCT, Norma N-CMT-4-05-004/18, elaboración propia.

| GRADO DE DESEMPEÑO (PG)                                                                                       | PG 64 |      | PG 70 |      | PG 76 |      | PG 82 |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|                                                                                                               | -16   | -22  | -16   | -22  | -16   | -22  | -16   | -22  |
| Temperatura máxima del pavimento [1], °C                                                                      | ≤ 64  |      | ≤ 70  |      | ≤ 76  |      | ≤ 82  |      |
| Temperatura mínima del pavimento [1], °C                                                                      | ≥-16  | ≥-22 | ≥-16  | ≥-22 | ≥-16  | ≥-22 | ≥-16  | ≥-22 |
| Cemento asfáltico original                                                                                    |       |      |       |      |       |      |       |      |
| Punto de inflamación Cleveland [2], °C, mín.                                                                  | 230   |      |       |      |       |      |       |      |
| Viscosidad rotacional 135°C [2], Pa*s, máx.                                                                   | 3     |      |       |      |       |      |       |      |
| Punto de reblandecimiento [2], °C, mín.                                                                       | 48    |      | 55    |      |       |      |       |      |
| Separación, diferencia anillo y esfera [2], °C, máx.                                                          | -     |      | 2     |      |       |      |       |      |
| Recuperación elástica por torsión 25°C [2], %, mín.                                                           | -     |      | 35    |      |       |      |       |      |
| Módulo reológico de corte dinámico [2]<br>(G*/sen δ) [2], kPa, mín.<br>· Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 1.0   |      |       |      |       |      |       |      |
|                                                                                                               | 64    |      | 70    |      | 76    |      | 82    |      |
| Después de envejecimiento en horno RTFO [2]                                                                   |       |      |       |      |       |      |       |      |
| Pérdida por calentamiento [2], %, máx.                                                                        | 1.0   |      |       |      |       |      |       |      |
| Recuperación elástica en ductilómetro [2], 25°C, %, mín.                                                      | -     |      | 75    |      |       |      |       |      |
| Módulo reológico de corte dinámico<br>(G*/sen δ) [2], kPa, mín.<br>· Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C     | 2.2   |      |       |      |       |      |       |      |
|                                                                                                               | 64    |      | 70    |      | 76    |      | 82    |      |
| Trafico Normal "S", Nivel de Ajuste (MSCR) <sup>[3]</sup>                                                     |       |      |       |      |       |      |       |      |
| · Jnr a 3,2 kPa en MSCR [2] [4]; kPa-1, máx.                                                                  | 4.0   |      |       |      |       |      |       |      |
| · Temperatura de prueba, °C                                                                                   | 64    |      | 70    |      | 76    |      | 82    |      |
| · Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR [2][5]; %, mín.                                                    | -     |      | 25    |      |       |      |       |      |
| Tráfico Alto "H", Nivel de Ajuste (MSCR) <sup>[3]</sup>                                                       |       |      |       |      |       |      |       |      |
| · Jnr a 3,2 kPa en MSCR; kPa-1, máx.                                                                          | 2.0   |      |       |      |       |      |       |      |
| · Temperatura de prueba, °C                                                                                   | 64    |      | 70    |      | 76    |      | 82    |      |
| · Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR; %, mín.                                                           | -     |      | 25    |      |       |      |       |      |
| Tráfico Muy Alto "V", Nivel de Ajuste (MSCR) <sup>[3]</sup>                                                   |       |      |       |      |       |      |       |      |
| · Jnr a 3,2 kPa en MSCR; kPa-1, máx.                                                                          | 1.0   |      |       |      |       |      |       |      |
| · Temperatura de prueba, °C                                                                                   | 64    |      | 70    |      | 76    |      | 82    |      |
| · Respuesta elástica, a 3,2 kPa en MSCR; %, mín.                                                              | -     |      | 30    |      |       |      |       |      |

**CONTINUACIÓN DE LA TABLA 5**

| GRADO DE DESEMPEÑO (PG)                                     | PG 64 |     | PG 70 |     | PG 76 |     | PG 82 |     |
|-------------------------------------------------------------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
|                                                             | -16   | -22 | -16   | -22 | -16   | -22 | -16   | -22 |
| Tráfico Extremadamente Alto "E", Nivel de Ajuste (MSCR) [3] |       |     |       |     |       |     |       |     |
| · Jnr a 3,2 kPa en MSCR; kPa-1, máx.                        | 0.5   |     |       |     |       |     |       |     |
| · Temperatura de prueba, °C                                 | 64    |     | 70    |     | 76    |     | 82    |     |
| · Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR; %, mín.         | -     |     | 40    |     |       |     |       |     |
| Después de envejecimiento en horno a presión (PAV)          |       |     |       |     |       |     |       |     |
| Temperatura de envejecimiento PAV [2], °C                   | 100   |     |       |     |       |     |       |     |
| · En climas normales                                        |       |     |       |     |       |     |       |     |
| · En climas desérticos                                      | 100   |     | 110   |     |       |     |       |     |

| Rigidización ( $G^*\sin \delta$ ) [2], kPa, máxima<br>- Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C                  | 5000 |     |    |    |    |     |    |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|----|----|----|-----|----|----|
|                                                                                                               | 28   | 25  | 31 | 28 | 34 | 31  | 37 | 34 |
| Rigidez de Flexión [2]<br>S(t), máximo 300 MPa<br>Valor m, mínimo 0,300<br>- Temperatura de prueba @ 60 s; °C | -6   | -12 | -6 | 12 | -6 | -12 | -6 | 12 |

[1] Determinada como se indica en el Anexo C de este documento.

[2] Determinada como se indica en el Anexo B de este documento.

[3] Los niveles de ajuste son los indicados en la Tabla 1 de la Norma: N-CMT-4-05-004/18.

[4] Jnr representa la fluencia relativa del cemento asfáltico y la prueba con que se determina simula las condiciones de trabajo del cemento asfáltico durante la vida útil del pavimento.

[5] Determinado mediante el procedimiento de prueba correspondiente al método de ensayo A de la Norma ASTM D6084M-13.

### • Requerimientos de las mezclas asfálticas

Dentro de la metodología de diseño Superpave dos puntos son fundamentales para garantizar una mezcla con valores elevados de resistencia a la deformación permanente y fatiga; tales aspectos son la compactación en laboratorio y los ensayos de desempeño.

El compactador giratorio Superpave (Superpave Gyratory Compactor, SGC) es el equipo que se utiliza para llevar a cabo la compactación de las probetas en laboratorio, mismo que puede tener ligeras variantes en forma, tamaño y operatividad dependiendo de la marca que lo fabrica, sin embargo, todos estos dispositivos deben ser capaces de impartir sobre la mezcla una presión de confinamiento de 600 kilo pascales, con un ángulo de giro de  $1.25^\circ$  y una velocidad de giro de 30 revoluciones por minuto. El grado de compactación de las muestras en el SGC se incorpora mediante un software en el que se introduce la altura deseada del espécimen o bien, el número de revoluciones; la selección de este último está en función de la temperatura promedio del lugar de proyecto y del número de ejes equivalentes (ESAL's) establecidos en el diseño (Garnica, Delgado, & Gómez, 2004).

El nivel compactación se ve influenciado de manera directa por los requerimientos volumétricos de la mezcla, los cuales son: vacíos de aire (Va); vacíos del agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VFA), mismos que corresponden a la muestra compactada. Esta cantidad de vacíos de aire es un parámetro base para hacer la selección adecuada del contenido óptimo cemento asfáltico. Lo anterior se logra mediante la preparación de mezclas con distintos contenidos de asfalto, a las cuales, luego de efectuada la compactación en el SCG, se les determinan los parámetros volumétricos (Va, VMA y VFA), lo anterior con el fin de cumplir la premisa central del diseño volumétrico Superpave, es decir, que la mezcla contenga la cantidad adecuada de ligante asfáltico, tal que se alcance exactamente un 96% de compactación respecto a la gravedad teórica máxima (es decir, un 4% de volumen de vacíos para los giros seleccionados en el diseño).

En la publicación técnica no. 246 del IMT, se proporcionan valores mínimos de VAM (en cuanto al porcentaje de diseño de aire del 4%), mismos que se consideran en función del tamaño máximo nominal del agregado. La Tabla 6 muestra los requerimientos del Superpave para el VAM.

*Tabla 6. Criterio para VAM en México. Fuente: IMT, publicación técnica no. 246, elaboración propia.*

| <b>Tamaño nominal de agregado</b> | <b>Porcentaje de VAM mínimo</b> |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| <b>9.5 mm</b>                     | 15.0                            |
| <b>12.5 mm</b>                    | 14.0                            |
| <b>19.0 mm</b>                    | 13.0                            |
| <b>25.0 mm</b>                    | 12.0                            |
| <b>37.5 mm</b>                    | 11.0                            |

En la misma publicación se establece el rango aceptable del VFA de diseño para 4% de vacíos de aire, considerado como una función del nivel de tránsito (Tabla 7).

*Tabla 7. Criterio para VAF en México. Fuente: IMT, publicación técnica no. 246, elaboración propia.*

| <b>Tránsito, ESAL's (millones)</b> | <b>Porcentaje de VAF de diseño</b> |
|------------------------------------|------------------------------------|
| <b>&lt; 0.3</b>                    | 70-80                              |
| <b>&lt; 1</b>                      | 65-78                              |
| <b>&lt; 3</b>                      | 65-78                              |
| <b>&lt; 10</b>                     | 65-75                              |
| <b>&lt; 30</b>                     | 65-75                              |
| <b>&lt; 100</b>                    | 65-75                              |
| <b>&gt; 100</b>                    | 65-75                              |

Otro requerimiento de la mezcla es la proporción de polvo; se calcula como la relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0.075 mm y el contenido de asfalto efectivo en porcentaje del peso total en la mezcla, menos el porcentaje de asfalto absorbido. De acuerdo con la especificación AASHTO M323-13, la relación polvo/asfalto en la mezcla asfáltica deberá cumplir con rango que va de 0.6 a 1.2, mismo que se podrá incrementar de 0.8 a 1.6, esto en el caso de que la curva granulométrica pase por debajo del Punto de Tamiz de control primario (PCS, Primary Control Sieve). En la tabla 8 se especifica el valor de dicho punto para el Tamaño nominal máximo del agregado (en porcentaje que pasa).

Tabla 8. Punto de Tamiz de Control Primario, PCS. Fuente: AASHTO M323-13, elaboración propia.

| PCS, Punto de Control para el Máximo Tamaño Nominal de agregado en la Mezcla (% que pasa) |         |         |         |         |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Máximo tamaño nominal del agregado                                                        | 37.5 mm | 25.0 mm | 19.0 mm | 12.5 mm | 9.5 mm  |
| Tamiz de Control Primario                                                                 | 9.5 mm  | 4.75 mm | 4.75 mm | 2.36 mm | 2.36 mm |
| PCS punto de control, % que pasa                                                          | 47      | 40      | 47      | 39      | 47      |

Otro de los requerimientos importantes dentro del sistema Superpave es la susceptibilidad a la humedad, dicho parámetro se determina con en el ensayo: "Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad", establecido en la norma T 283 de la AASHTO. Esta prueba, que no se basa en el desempeño, sirve para dos propósitos; primero, identificar si una combinación de cemento asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua; segundo, mide la efectividad de los aditivos anti desprendimiento o de mejora de adherencia. Con esta especificación se completa lo que se considera en Superpave como en nivel básico o nivel 1 de diseño.

- **Ensayos de desempeño**

Existen dos ensayos que se basan en el desempeño de las mezclas asfálticas: el "Ensayo de Corte Superpave" (SST, Superpave Shear Test) y el "Ensayo de Tracción Indirecta" (IDT, Indirect Tensile Test). Los resultados de estas pruebas son valores de entrada de los modelos de predicción de desempeño en el Superpave, para estimar el comportamiento real de los pavimentos.

Los requisitos y el método de prueba del SST se establecen en la norma designada como: T 320-07 de la AASHTO; mientras que el IDT se rige bajo la norma D6931-17, de la ASTM (American Society for Testing and Materials). El cumplimiento de los requerimientos de ambas pruebas acredita el nivel 2 o intermedio del sistema Superpave.

Finalmente, el tercer nivel de la metodología Superpave abarca los procesos y especificaciones de los dos primeros niveles, adicionalmente, contempla ensayos adicionales de SST e IDT a distintas temperaturas con el fin de simular el rango de temperatura que experimenta un pavimento en su vida útil. De esta manera, dada la gran variedad de pruebas y resultados que comprende el nivel 3, la predicción del desempeño de una mezcla de esta categoría, incrementa su grado de confiabilidad.

## 3.2 HULE RECICLADO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU) EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 3.2.1 Neumáticos fuera de vida útil

El neumático o llanta está compuesta principalmente de tres productos: caucho (natural y sintético), un enorado de acero y fibra textil. A su vez, el caucho usado en la fabricación de neumáticos está compuesto por un grupo de polímeros entre los que se encuentran el polisopropeno sintético, el polibutadieno y el más común que es el estireno-butadieno, todos basados en hidrocarburos (Angulo & Duarte, 2005).

El caucho sintético es el más importante y utilizado debido a sus grandes propiedades y bajo costo. Este tipo de elastómero es un material que presenta propiedades mecánicas como el poder sufrir mayores deformaciones elásticas bajo tensión con respecto a otros materiales y aun así recupera su tamaño original sin una deformación permanente. El caucho SBR (estireno-butadieno) tiene mayor resistencia al desgaste y presenta mayor generación de calor (Carreño & Reyes, 2015).

Para mejorar las propiedades del caucho, se ejecuta en este, un proceso llamado vulcanización. Es un entrelazamiento de cadenas de polímeros con moléculas de azufre a alta presión y temperatura. En este proceso el caucho pasa de ser un material termoplástico a ser un material elastomérico, pues el estireno permite obtener un caucho más duro y más tenaz, que se cristaliza bajo grandes esfuerzos (PANAGIOTIS, 2003).

La goma del neumático, al estar sometida a ambientes agresivos como el roce con el pavimento, se desgasta y se degrada, es entonces que se dice que los neumáticos han cumplido su periodo de utilidad, formando con ello la categoría de neumáticos fuera de uso (NFU), mismos que son extraídos y recolectados para la gestión de residuos. Una de las opciones de reúso de estos residuos es el aprovechamiento en la industria de los pavimentos flexibles, donde algunas mezclas se elaboran mediante asfaltos con adición de caucho.

### 3.2.2 Obtención del Polvo de Caucho (hule de neumático)

La utilización en mezclas asfálticas en caliente, precisa que el caucho reciclado esté en forma de polvo; un material constituido por partículas finas de caucho natural y sintético vulcanizado, de tamaños inferiores a 2.0 mm (Schilling, 2018). Para esta aplicación, como primera etapa los neumáticos enteros deben pasar por un proceso de trituration mecánica para la disminución de su tamaño a trozos irregulares relativamente grandes de tamaños menores a 300 mm. Paso seguido, se deben eliminar los componentes de acero y tela del neumático para así, poder triturar el caucho.

El proceso de trituration se puede realizar de varias formas, las más utilizadas, son la trituration mecánica a temperatura ambiente, la trituration criogénica y la molienda húmeda; en los siguientes párrafos se describen cada una de ellas.

#### *3.2.2.1 Trituración a temperatura ambiente*

Se lleva a cabo en molinos abiertos, los cuales operan a temperatura ambiente, aunque la energía transmitida al caucho durante la molienda eleva su temperatura hasta 80° C (Bocanegra, 2019). La reducción de las partículas es lograda por acciones de rasgado, desgarre o aplastamiento. El molino comúnmente utilizado consta de dos rodillos con estrías superficiales, los cuales giran a diferentes velocidades, logrando así la acción de molido.

El caucho, por lo general, es pasado por 2 o 3 molinos para alcanzar varias reducciones de tamaño del grano, y así poder separarlo de los otros componentes como fibras y acero que se encuentran en los neumáticos. En general, los productos resultantes de este proceso son de alta calidad y limpio de todo tipo de impurezas, facilitando la utilización de este material en nuevos procesos y aplicaciones (Ramírez, 2006).

#### *3.2.2.2 Trituración por criogénesis*

El proceso de trituración criogénica requiere el enfriamiento previo de los trozos de neumático a través del uso de nitrógeno líquido para congelarlos a temperaturas por debajo de los 200°C bajo cero. En este rango de temperatura, el caucho pierde su elasticidad característica, volviéndose frágil y fácil de desintegrar; una vez congelado, molinos de martillos o molinos turbo de impacto efectúan la trituración hasta el tamaño requerido. El costo de operatividad resulta más elevado en comparación con otros métodos, debido al precio del nitrógeno líquido.

#### *3.2.2.3 Molienda húmeda*

Es un proceso patentado donde el caucho después de una reducción inicial, es pasado junto con un líquido a un molino produciéndose de esta manera partículas muy uniformes, adecuadas para que sean utilizadas como un modificador de asfalto. La molienda se hace hasta llegar a partículas más pequeñas que en los demás métodos, haciendo el proceso en un medio líquido que generalmente es agua (Memon, 2011).

#### *3.2.3 Fabricación de mezclas asfálticas con hule proveniente de NFU.*

La Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés, encargada de probar la resistencia de los materiales, define el asfalto-caucho como "una mezcla de cemento asfáltico, caucho de neumático reciclado y ciertos aditivos, en la que el componente de caucho es de al menos 15% en peso de la mezcla total y ha reaccionado con el cemento asfáltico en caliente lo suficiente como para causar la hinchazón de las partículas de caucho " (ASTM, 2011).

La implementación caucho reciclado a las mezclas traen beneficios físico-mecánicos y las características que adquieren varían dependiendo del método de adición. De acuerdo con la literatura revisada, existen dos procesos principales para añadir el hule molido de llanta en la mezcla asfáltica: vía seca y vía húmeda, sin embargo, recientemente se desarrolló una nueva metodología de adición llamada "caucho activado y reaccionado" (RAR), por sus

siglas en inglés. Cabe resaltar que en esta última está orientado el presente trabajo, por lo que en lo subsecuente se hará mayor énfasis en este proceso de modificación.

#### 3.2.3.1 Modificación por vía húmeda

Esta metodología genera un producto conocido como “Asfalto modificado con caucho” o “Asfalto-Ahulado” y consiste en agregar el hule molido al aglutinante de asfalto para actuar como un modificador. Este proceso de modificación aumenta la viscosidad del cemento asfáltico dándole unas características particulares. La plasticidad de esta mezcla disminuye en temperaturas altas, lo cual es un punto a favor para evitar fenómenos como el ahuellamiento. Además, en bajas temperaturas, la flexibilidad de esta mezcla aumenta, esto traduce un mejor comportamiento ante problemas de posible fisuración (Díaz & Castro, 2017).

Cuando el ligante asfáltico y el caucho son mezclados, este último interacciona hinchándose y ablandándose (digestión del caucho), ver figura 4. Esto hace necesaria la utilización de un catalizador que mejora la estabilidad de la mezcla, tal como lo explican Angulo y Duarte (2005). El grado de modificación del ligante depende de varios factores entre los que se encuentran: el tamaño, textura y proporción del caucho, el tipo de cemento asfáltico, tiempo, temperatura y grado de agitación mecánica de mezclado, así como el uso de otros aditivos.

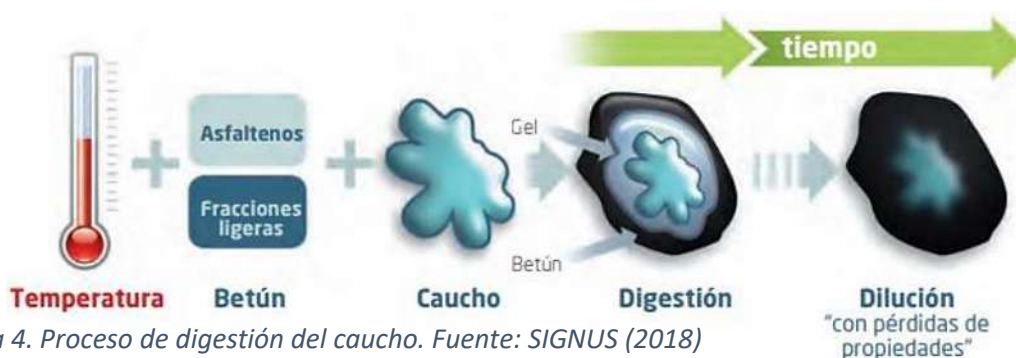


Figura 4. Proceso de digestión del caucho. Fuente: SIGNUS (2018)

Dentro del proceso por vía húmeda se encuentran varias técnicas de mezclado, entre las más usadas se tiene: el mezclado por batchadas o método McDonald, mezclado continuo y mezclado terminal.

#### 3.2.3.2 Modificación por vía seca

El proceso seco implica la mezcla del grano de caucho reciclado con agregados antes de adicionar el cemento asfáltico. Este proceso se lleva a cabo cuando se quiere usar el caucho reciclado como un agregado en la mezcla asfáltica, por lo general, como un sustituto de una pequeña porción del agregado fino, el cual puede estar entre el 1 y 3 % del peso total de los agregados en la mezcla. A diferencia del proceso húmedo, la modificación en seco no requiere un equipo especial, solo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad

adecuada de caucho y que se suministre en el momento justo para que se mezcle con los agregados, cuando estos alcanzan cierta temperatura.

Este procedimiento fue desarrollado por un par de compañías suecas en 1960, quienes reemplazaron una fracción de agregado con la misma porción de gránulos de hule de llanta. Posteriormente, en 1980, la técnica se mejoró para lograr una mezcla comercial conocida como PlusRide (Kandhal & Cooley, 2002) que requiere una gradación específica de los agregados; ya para 1990, se introdujeron el proceso seco genérico (no necesita una granulometría definida) (Nguyen y Tran, 2018).

A pesar de las mejoras que se han venido dando, este tipo de mezcla tiene grandes inconvenientes técnicos. La falta de estándares de calidad y del rendimiento inconsistente ha dado como resultado la desconfianza para los investigadores y profesionales en aceptar este tipo de modificación, por lo cual se inclinan por el proceso por vía húmeda, a pesar de que tiene el potencial para reciclar más polvo de caucho que en esta última.

#### *3.2.3.3 Modificación con caucho activado y reaccionado (RAR)*

A pesar de las ya discutidas mejoras que otorga el caucho en las mezclas asfálticas, se ha visto un estancamiento en la implementación significativa de esta tecnología de manera práctica. Esto puede explicarse en parte a los siguientes factores:

- La producción de asfalto ahulado por los métodos hasta ahora expuestos, necesitan el uso de temperaturas muy elevadas (por encima de los 190°C), lo cual incrementa el costo de producción y puede promover un envejecimiento prematuro.
- Plantas de fabricación complejas y costosas, que necesariamente deben ser instaladas en todas las plantas de mezclas asfálticas.
- Las dificultades para garantizar la estabilidad en el almacenamiento, incluso en el procedimiento en Terminal.

Ante esta problemática se desarrolló un nuevo material llamado caucho activado y reaccionado (RAR), por sus siglas en inglés, este modificador ha permitido implementar un nuevo proceso de adición de polvo de caucho a las mezclas asfálticas denominado semi-húmedo. La denominación de este proceso se debe a que el caucho ha sufrido una digestión y tratamiento previo, que permite que al momento de introducirlo en el proceso de elaboración de mezclas asfálticas se realice como si fuera un árido más, sin necesidad de otro procedimiento adicional.

El RAR, se puede decir que es un ligante bituminoso modificado con caucho, compuesto por asfalto convencional, polvo fino de caucho y un estabilizador de asfalto de tipo filler mineral activado (Activated Mineral Binder Stabilizer-AMBS) en porcentajes debidamente optimizados (Chávez, 2018). Generalmente las proporciones consisten en cerca de 62 a 65 % de polvo de caucho, 20 a 25 % de asfalto y 15 a 20 % de filler mineral. En la figura 5, se pueden observar los tres elementos que integran el RAR.



*Figura 5. Componentes del RAR, de izquierda a derecha: asfalto, polvo de caucho y AMBS. Fuente: Chávez (2018)*

El RAR entonces es producido por un corto tiempo de mezclado en caliente con asfalto y una activación a través de un proceso patentado, diseñado especialmente para formar un polvo de caucho seco y predigerido. Su diseño permite ser añadido a cualquier tipo de mezcla asfáltica en caliente, ya sea densa, abierta, porosa, SMA, etc. En campo, en la planta de mezclado, el RAR se agrega directamente al tambor de mezclado de los agregados, remplazando un cierto porcentaje de material fino justo antes de que se adicione el asfalto; todo esto usando los mismos alimentadores y equipamiento de una planta de mezclas asfálticas convencional.

Estudios recientes como el de Sousa et al. (2012), han demostrado que las mezclas asfálticas con RAR tienen un mejor desempeño frente mezclas convencionales y relativamente frente a mezclas asfálticas modificadas con Asfalto- caucho. En general, el RAR se comporta como un modificador elastómero de asfalto que modifica el betún virgen incrementado su grado PG, resiliencia y propiedades de recuperación (Moreno, Rubio, & Martinez, 2012).

#### 3.2.4 Normativas Asociadas en México

En México las normativas asociadas a la obtención, utilización y manejo de neumáticos fuera de uso es la siguiente:

- LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS. 2014. Establece en los artículos 19, 28 y 98, el marco para la gestión de residuos provenientes de neumáticos fuera de uso; además de la responsabilidad extendida del Productor y fomento al Reciclaje.
- LEY DE CAMINOS, PUENTES Y AUTOTRANSPORTE FEDERAL. 2014. En su artículo 6, promueve el empleo de caucho reciclado proveniente de neumáticos usados, en las concesiones que se otorguen para construir, conservar y mantener los caminos y puentes federales.

En cuanto a las especificaciones técnicas para el empleo caucho reciclado en la elaboración de mezclas asfálticas se tiene las siguientes:

- ✓ La norma N-CMT-4-05-002/06, Calidad de Materiales Asfálticos Modificados, de la SCT. En su apartado B.4. se refiere al uso de hule molido de neumáticos como

modificador. Así mismo en citada norma, se establecen los requisitos de calidad para los cementos asfálticos modificados con dicho material. A esta norma la completan las normas: Separación en cemento asfáltico modificado (N-MMP-4-05-022), Resiliencia en cemento asfáltico modificado (N-MMP-4-05-023) y Recuperación elástica por torsión en cemento asfáltico modificado (N-MMP-4-05-024).

### 3.3 DETERIOROS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Cuando una mezcla asfáltica se incorpora a un pavimento como carpeta, está sujeta a múltiples acciones que afectan y reducen su vida útil. Estas acciones se relacionan principalmente con las cargas transmitidas por los vehículos y el medio ambiente; y contribuyen en diferente medida al daño de la mezcla. Los principales deterioros en la mezcla asfáltica son: las deformaciones permanentes, el agrietamiento por fatiga, y el agrietamiento por baja temperatura (Garnica, Delgado, & Gómez, 2004).

En la publicación técnica no. 267, Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas (2005), del Instituto Mexicano del transporte; se describe cada uno de los deterioros de las mezclas asfálticas como a continuación se expone.

#### 3.3.1 Deformación permanente

Basándose en los resultados de pruebas de caminos e investigaciones del fenómeno de la deformación permanente realizadas por la AASHTO (American Association of State and Highway Officials) en Estados Unidos, algunos investigadores han concordado en que ésta se puede definir como un canal longitudinal, o depresión, que se forma en las huellas debido a la compresión, movimiento lateral, o ambos, en una o más de las capas que forman el pavimento, como resultado de la aplicación de las cargas del tránsito.

La deformación permanente es una manifestación de dos diferentes mecanismos: (a) densificación (cambio de volumen), y (b) deformación cortante (flujo plástico sin cambio de volumen). En el proceso de densificación el material es empujado hacia abajo; mientras que la deformación cortante provoca que el material fluya lateralmente y hacia arriba, como se muestra en la figura 6.

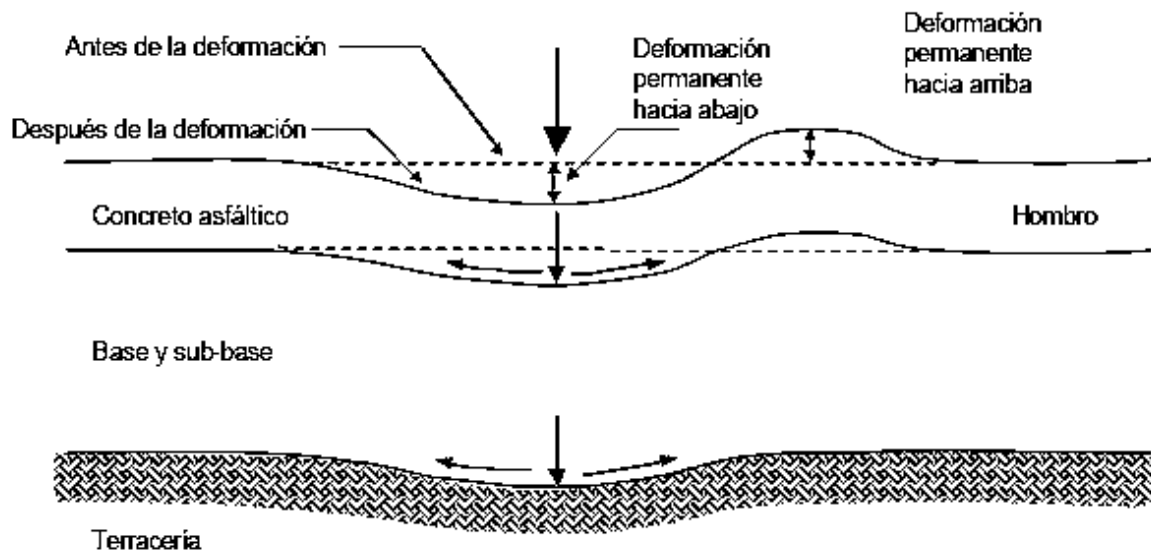


Figura 6. Mecanismo típico de deformación permanente en la trayectoria de la rueda externa. Fuente: IMT (2005)

A continuación se enlistan las causas principales de la deformación permanente o longitudinal de los pavimentos asfálticos, de acuerdo con el manual de pavimentos para mezclas en caliente del Departamento de Transporte y la Administración de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, 1997):

- a) Baja cantidad de vacíos de aire (menos del 4%)
- b) Exceso de vacíos de aire (más del 8%).
- c) Cemento asfáltico de baja viscosidad, principalmente por:
  - Errores en el diseño de la mezcla, debido a que las propiedades del asfalto a 25°C y 60°C no son iguales a las propiedades del asfalto en servicio.
  - El asfalto no es envejecido, como en el proceso de producción, en planta.
  - Resistencia insuficiente en la carpeta debido a que se permitieron en el lugar grandes cargas de tránsito, antes de que el asfalto se hubiera enfriado lo suficiente para adherirse al agregado de manera adecuada.
- d) Mayor consolidación de la base, sub-base o terracería.
- e) El tipo y duración de la carga afecta la resistencia a la deformación longitudinal. Las mezclas bituminosas son más resistentes a las cargas de corta duración, como sucede en condiciones de tránsito a alta velocidad, y menos resistentes a cargas de larga duración, como es el caso de vialidades urbanas con tráfico superior al de diseño y paradas del tránsito obligadas (semáforos).
- f) Factores de diseño de la mezcla, como altos contenidos de arena natural, poca cantidad de polvo mineral y agregados redondeados, los cuales proporcionan menor resistencia a la deformación.

### 3.3.2 Agrietamiento por fatiga

El agrietamiento por fatiga es llamado coloquialmente “piel de cocodrilo” debido a que el patrón de espaciamiento entre las grietas es muy similar a la forma exterior de la piel del cocodrilo (figura 7). El agrietamiento por fatiga es resultado de la aplicación de un esfuerzo de tensión mayor a la resistencia a la tensión de la mezcla.



*Figura 7. Pavimento asfáltico que presenta agrietamiento por fatiga. Fuente:fallasenpavimentoflexible.blogspot.com*

Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo prematuro de agrietamiento por fatiga. Este tipo de falla, generalmente ocurre cuando el pavimento ha sido esforzado hasta el límite, por la repetición de aplicaciones de carga. El agrietamiento por fatiga es comúnmente asociado con las cargas, las cuales son mucho más pesadas para la estructura del pavimento, o a que el número de repeticiones de carga fue mayor a las consideradas en el diseño.

De esta forma los investigadores asociados a este tema, coinciden de manera general en que el agrietamiento por fatiga es más un problema estructural, que uno de materiales. Ya que es provocado por un número de factores que tienen que ocurrir simultáneamente: cargas pesadas repetidas, drenaje pobre de la subrasante, un diseño o construcción deficiente de las capas del pavimento, o que el número de cargas para el que se diseñó fue excedido (NCAT, 2001).

### 3.3.3 Desprendimiento de agregados

La ASTM define el desprendimiento de agregados como un desgaste en la superficie del pavimento debido a la pérdida de ligante asfáltico o alquitrán y partículas del agregado removidas (figura 8). Estas fallas nos indican que el ligante asfáltico ha sufrido un endurecimiento considerable o que estamos en presencia de una mezcla de pobre calidad, caracterizada por la presencia de arcilla y partículas deleznable, lo cual promueve una baja afinidad entre los agregados y el cemento asfáltico.

Además, el desprendimiento puede ser causado por ciertos tipos de tráfico, por ejemplo, vehículos de rastreo. El ablandamiento de la superficie y la pérdida de agregado por acción de los derrames de aceite de vehículos también están considerados como desprendimientos.



*Figura 8. Desprendimiento de agregado en el km 15+900 de la autopista Pátzcuaro-Uruapan. Fuente: Imagen capturada por el autor.*

### 3.3.4 Fisuración por baja temperatura

La fisuración por baja temperatura se atribuye a la tensión inducida en la mezcla asfáltica, a medida que la temperatura desciende hasta un nivel crítico. El agrietamiento por baja temperatura es un deterioro, debido más a condiciones adversas del medio ambiente que a las aplicaciones de carga. Se caracteriza por fisuras transversales intermitentes (perpendiculares a la dirección del flujo de tránsito) que se producen en un espaciamiento notablemente uniforme, tal como se ilustra en la figura 9.

Las fisuras por baja temperatura se forman por contracciones en la carpeta asfáltica, lo cual normalmente ocurre en lugares con clima frío. Cuando la carpeta se contrae, se originan deformaciones de tensión en su interior. En algún lugar, a lo largo del pavimento, los esfuerzos exceden la resistencia a la tensión, y la carpeta asfáltica se fisura. De esta manera, las fisuras por baja temperatura ocurren principalmente por efecto acumulativo de varios ciclos climáticos fríos.

En este tipo de deterioro, el ligante asfáltico juega un rol significativo, por ejemplo, los duros son más propensos a la fisuración por baja temperatura que los blandos. También los ligantes asfálticos excesivamente oxidados, ya sea por ser muy propensos a la oxidación o por encontrarse en una mezcla asfáltica con muy alto porcentaje de vacíos, o por ambas causas, son más susceptibles al fisuramiento por baja temperatura (Brown, Kandhal, & Zhang, 2001).



*Figura 9. Fisura transversal asociada a bajas temperaturas. Fuente: MANUAL CENTROAMERICANO DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS, 2000.*

### 3.4 AUSCULTACIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS

La auscultación de pavimentos se refiere al levamiento periódico de la condición del pavimento, en forma ordenada y sistemática, es una tarea muy importante. Tal información permite conformar la función de comportamiento de los distintos tramos de la ruta, y pueden luego predecirse las tareas de mantenimiento necesarias en magnitud y oportunidad. En México los principales parámetros que se evalúan son los que a continuación se describen.

#### 3.4.1 Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

El Índice de Rugosidad Internacional, mejor conocido como IRI, fue propuesto por el Banco Mundial en 1986 como un estándar estático de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino, se expresa en [m/km]. El mismo representa la cantidad de desplazamientos verticales que acumula el conductor al recorrer un kilómetro de la carretera (UNR, 2015). En México, el IRI se utiliza para conocer el estado de conservación de la red carretera y el criterio de su clasificación es el considerado en el Sistema de Administración de Pavimentos HDM-4 (Bennett, C. R. and Paterson, William D O., 2000) que se muestra en la Tabla 9.

*Tabla 9. Condición del pavimento respecto al IRI. Fuente: Publicación Técnica No. 353 del IMT, 2011.*

| IRI (m/km)          | ESTADO FÍSICO |
|---------------------|---------------|
| $IRI < 3$           | bueno         |
| $3 \leq IRI \leq 5$ | Aceptable     |
| $IRI > 5$           | Deficiente    |

Los criterios y procedimientos para la determinación del IRI de los pavimentos en carreteras de la red mexicana, se establecen en la norma: N-CSV-CAR-1-03-004/21, de la SCT.

#### 3.4.2 Profundidad de la Rodera

La Profundidad de las Roderas (PR) es una deformación en la superficie del pavimento, normalmente asociadas a la acción del tránsito pesado que genera deformaciones plásticas de las distintas capas de la estructura y de la subrasante. Su medición puede realizarse con equipos de alto rendimiento o con metodología manual.

Los equipos de alto rendimiento utilizan sensores láser o ultrasonido, con los cuales se releva el perfil transversal de todo el ancho del carril. Estos sensores se encuentran montados sobre un vehículo, y se obtienen los perfiles transversales espaciados entre 5 cm y metro a lo largo de las progresivas, dependiendo del equipo. Luego, a través de un programa de procesamiento se obtiene el valor del ahuellamiento.

En la medición manual, se posiciona la regla en forma transversal al eje del camino en posiciones equiespaciadas a lo largo de las progresivas, y se valora la máxima depresión existente bajo la regla.

En México los concesionarios de carreteras se someten a inspecciones semestrales, sólo para pavimentos flexibles, en la que el valor mínimo aceptable es de 10 mm por tramos de

20 m-carril para no ser acreedores a una sanción mensual, causando la revocación de la concesión cuando presenten hasta tres calificaciones semestrales consecutivas con una PR mayor a 20 mm (Mendoza, Abarca, & Saucedo, 2011).

### 3.4.3 Resistencia a la Fricción

Es la resistencia al deslizamiento existente entre la superficie del pavimento y los neumáticos en condiciones definidas de velocidad de operación, tipo de neumático, tipo de dibujo, altura de película de agua. Esta resistencia tiene un valor máximo para superficies secas y bajas velocidades de circulación, y disminuye a medida que aumenta la velocidad o la cantidad de agua presente entre las superficies (UNR, 2015).

En normativa mexicana la fricción se identifica a través de un coeficiente adimensional denominado coeficiente de fricción (CF), que se define como la fuerza tangencial que se desarrolla entre la banda de rodadura del neumático y la superficie del pavimento. Los conceptos, procedimientos y criterios para la determinación de este coeficiente, se establecen de manera específica en la norma: N-CVS-CAR-1-03-007/17.

Según lo enunciado en la norma anterior, la condición de los tramos carreteros se calificará en función del coeficiente de fricción del pavimento, utilizando los rangos que se indican en la tabla 10.

*Tabla 10. Rangos del Coeficiente de Fricción para la clasificación superficial de los pavimentos. Fuente: N-CVS-CAR-1-03-007/17, SCT, 2017.*

| Condición             | Autopistas, corredores carreteros, red básica libre y red secundaria |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------|
| No aceptable          | 0 a 0.40                                                             |
| Aceptable             | 0.41 a 0.60                                                          |
| Bueno                 | 0.61 a 0.90                                                          |
| No aceptable (áspero) | >0.90                                                                |

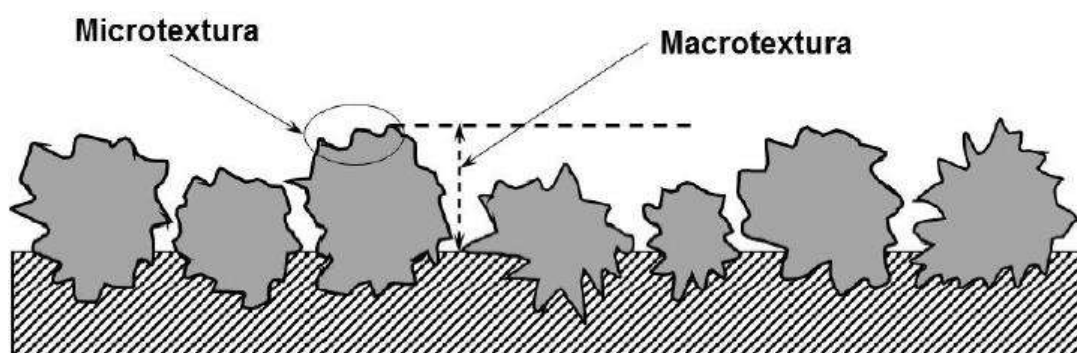
De acuerdo con Mendoza et al. (2011), en las carreteras de cuota mexicanas, el valor de la característica de la resistencia de fricción, se mide con el equipo Mu-Meter a 65 km/h, en condiciones de presencia de película de agua, tanto para pavimentos flexibles como rígidos, no deberá ser inferior a 0.6. En caso de que el valor sea inferior a 0.6, la Concesionaria se obliga a proceder a la corrección de la superficie. La evaluación de la resistencia a la fricción será anual.

En todos los casos se utilizarán equipos de alto rendimiento y personal que cuenten con la aprobación previa de la SCT.

### 3.4.4 Determinación de la Macrotextura

La norma N-CSV-CAR-1-03-006/16 (SCT, 2016) define la Macrotextura como las desviaciones de la superficie del pavimento con respecto a una superficie plana verdadera, con longitudes de onda entre cero coma cinco (0,5) y cincuenta (50) milímetros. Estas longitudes son del mismo orden que los elementos de la banda de rodadura del neumático en la zona de contacto con el pavimento.

Al igual que la microtextura (asperezas de partículas de agregados individuales), la macrotextura tiene influencia en la resistencia al deslizamiento en un pavimento y específicamente en lo referente al drenaje superficial, puesto que facilita el desalojo del agua de lluvia mediante los huecos presentes en la superficie de rodadura, lo que impide fenómenos indeseables tales como el hidroplaneo y el salpicado o rociado de agua, asociados a la circulación de los vehículos en presencia de lluvia. La figura 10 ilustra la particularidad de este tipo de textura.



*Figura 10. Desprendimiento de agregado en el km 15+900 de la autopista Pátzcuaro-Uruapan.  
Fuente: Imagen capturada por el autor.*

La macrotextura se determina en base a la medida de referencia conocida como Profundidad Media de la Textura (PMT), la cual se calcula como el cociente de un volumen dado de material estandarizado y el área que cubre dicho material al ser esparcido en forma circular sobre la superficie de prueba, de acuerdo a la norma N-CSV-CAR-1-03-006/16. El método para la obtención de la PMT se conoce como método volumétrico, es una medida tridimensional de la macrotextura y se expresa en milímetros (mm).

#### 3.4.5 Porcentaje de agrietamiento

Este es un parámetro indicador de la condición estructural que puede ser valorado desde la superficie y sin destrucción. Se ponderan las fisuras existentes identificando su grado de severidad en función de su abertura, su patrón en superficie y su extensión. El levantamiento puede ser visual siguiendo instructivos con descripciones y/o fotos de comparación. También pueden utilizarse equipos de relevamiento automáticos en base a filmación o escaneo de la superficie, que luego post procesan para obtener el tipo y extensión de la fisuración en forma manual o con software (UNR, 2015).

## 4. ESTADO DEL ARTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON HULE PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO

El presente capítulo está dividido en tres subsecciones, en las que se enlistan diferentes investigaciones que relacionan el efecto del caucho reciclado en las mezclas asfálticas. Partiendo desde la manera de adición y el efecto según el tamaño y la forma del caucho. La elección de estos enfoques se debe a la gran relación que guardan respecto a la presente investigación. Finalmente, en la tercera subsección se presenta una tabla resumen de las investigaciones que tienen mayor relación con el presente proyecto de tesis.

### 4.1 DE ACUERDO A LOS MÉTODOS DE ADICIÓN DEL HULE.

De acuerdo con **Lougheed y Papagiannakis (1998)**, el mejor comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas se obtiene cuando el proceso de modificación se realiza por vía húmeda. Por medio del proceso en seco el comportamiento de las mezclas varía entre aceptable a desastroso. **Epps (1981)**, señala que el sistema reacciona parcialmente.

**Huang, Bird y Heidrich (2007)**, determinaron que en la modificación con hule por vía seca el porcentaje de vacíos de aire, el tiempo y la temperatura de reacción del asfalto con el hule molido, son factores críticos que deben controlarse para mantener la integridad de la partícula de caucho, sobre todo su forma y rigidez para observar una mejora en las propiedades de la mezcla.

**Weidong Cao (2006)**, realizó ensayos en tres tipos de mezclas asfálticas que contenían diferente contenido de caucho (1%, 2% y 3% en peso de la mezcla total), por vía seca, diseñadas con contenidos óptimos de asfalto del diseño de mezcla Marshall. Llevó a cabo una prueba de deformación permanente, empleando el dispositivo de seguimiento de rueda que se muestra en la Figura 11 para la evaluación del desempeño del pavimento a alta temperatura (60 °C). Para comprobar la resistencia a bajas temperaturas empleó una prueba de tracción indirecta, mediante el dispositivo que se expone en la figura 12; a través de estos ensayos obtuvo un indicador de estabilidad dinámica en el primer caso y un módulo de rigidez a la falla en segundo.

*Tabla 11. Resultados de la prueba de formación de roderas y de tracción indirecta. Fuente: Weidong, 2006.*

| De caucho (%) | Promedio |      |      | (MPa), Promedio |        |       |       |        |
|---------------|----------|------|------|-----------------|--------|-------|-------|--------|
| 0             | 2356     | 2236 | 2488 | 2360            | 1011.8 | 1200  | 1009  | 1073.6 |
| 1             | 2387     | 2519 | 2662 | 2523            | 975.3  | 968.9 | 983.2 | 975.8  |
| 2             | 3236     | 3007 | 3418 | 3220            | 809.4  | 816.6 | 853.9 | 826.6  |
| 3             | 4456     | 4272 | 4559 | 4429            | 726.7  | 729.9 | 772.8 | 742.8  |



Figura 11. Ensayo de tracción indirecta. Fuente: Weidong, 2006.



Figura 12. Dispositivo de Seguimiento de la rueda de laboratorio. Fuente: Weidong, 2006.

Los resultados obtenidos (tabla 11) le permitieron establecer que, a diferencia de una mezcla convencional sin caucho, el índice de estabilidad dinámica de las mezclas asfálticas modificadas con caucho aumenta a medida que se incrementa el contenido de caucho. Mientras que el módulo de rigidez a la falla de las mezclas asfálticas modificadas con caucho disminuye; lo anterior se traduce en mayor resistencia a la deformación permanente por temperaturas altas y menor agrietamiento por bajas temperaturas. Los resultados de este estudio permitieron concluir que la adición de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas mediante proceso seco, mejora las propiedades de resistencia a la deformación permanente a alta temperatura (60 °C) y al agrietamiento a baja temperatura (10 °C).

**Chesner et al. (2002)**, encontró que el comportamiento del sistema asfalto-hule presenta factores importantes que influyen en las propiedades: la temperatura de mezcla, el tiempo de digestión, el mecanismo de mezcla, el tamaño y la textura del caucho y el contenido de aromáticos en el aglutinante de asfalto.

**Angulo & Duarte (2005)**, comprobaron que con la adición de caucho reciclado de llanta al asfalto original Barrancabermeja se mejoran algunas de sus propiedades como la recuperación elástica por torsión, la cual se logró aumentar en un 100 y 300 % para un

asfalto modificado con caucho mas un agente compatibilizante y para un asfalto modificado solo con caucho, respectivamente.

**Dias (2014)** resalta las ventajas de mejorar el pavimento por vía seca, donde expone que la resistencia a la fatiga y al ahuellamiento aumenta cuando la reacción entre la mezcla y el GCR no supera los 175°C. Estos resultados se compararon con mezclas convencionales y mezclas modificadas por vía húmeda, donde resalta que los resultados son los mismos que en la vía seca, **Zhaoxing (2016)**.

**Bocanegra (2019)**, realizo un análisis comparativo de resistencia a la fatiga en mezclas densas, con asfaltos de distintos grados PG, modificadas con estireno-butadieno-estireno (SBS) y con caucho de neumático mediante la metodología Terminal Blend. A través los resultados de la prueba Barrido de amplitud lineal (LAS) puso en evidencia que los asfaltos de grado PG más alto (70-22 y 76-22) modificados con SBS y los equiparables modificados con el 10 % de caucho, mostraron un desempeño a fatiga similar, lo que significa que la adición de hule molido de neumáticos compite con el polímero SBS. Además, al haber alcanzado resultados favorables de los cementos asfálticos modificados con los concentrados de hule, destacó que el sistema de modificación “terminal blend” aporta la ventaja de la devulcanización del caucho y su consecuente estabilización dentro de la matriz de asfalto, lo cual, implica que no decante si se detiene la agitación y que pueda transportarse fácilmente como si fuese un asfalto convencional.

De acuerdo con **Sousa et al. (2013)**, la complejidad del procedimiento terminal blend recae en que se eleva el costo por unidad de mezcla. Ante este problema, el mismo autor expone un nuevo método de adición llamado “caucho activado y reaccionado” (RAR). El RAR, es un ligante bituminoso modificado con caucho, compuesto por asfalto convencional, polvo fino de caucho y un estabilizador de asfalto de tipo filler mineral activado (Activated Mineral Binder Stabilizer-AMBS) en porcentajes debidamente optimizados. Este modificador ha permitido implementar un nuevo proceso de acción de polvo de caucho a las mezclas asfálticas denominado semi-húmedo. La denominación de este proceso se debe a que el caucho ha sufrido una digestión y tratamiento previo, que permite que al momento de introducirlo en el proceso de elaboración de mezclas asfálticas se realice como si fuera un árido más, sin necesidad de otro procedimiento adicional.

Además de las mejoras sugeridas en los procesos de producción de las mezclas asfálticas modificadas con RAR, se realizaron ensayos de fatiga por flexión (ASSHTO T321) y de Deformación permanente a temperaturas altas (alrededor de 60°C para ver el comportamiento similar en climas muy cálidos) y establecer también las mejoras mecánicas que este tiene en las mezclas asfálticas. Los resultados obtenidos por Sousa se muestran en las figuras 13 y 14.

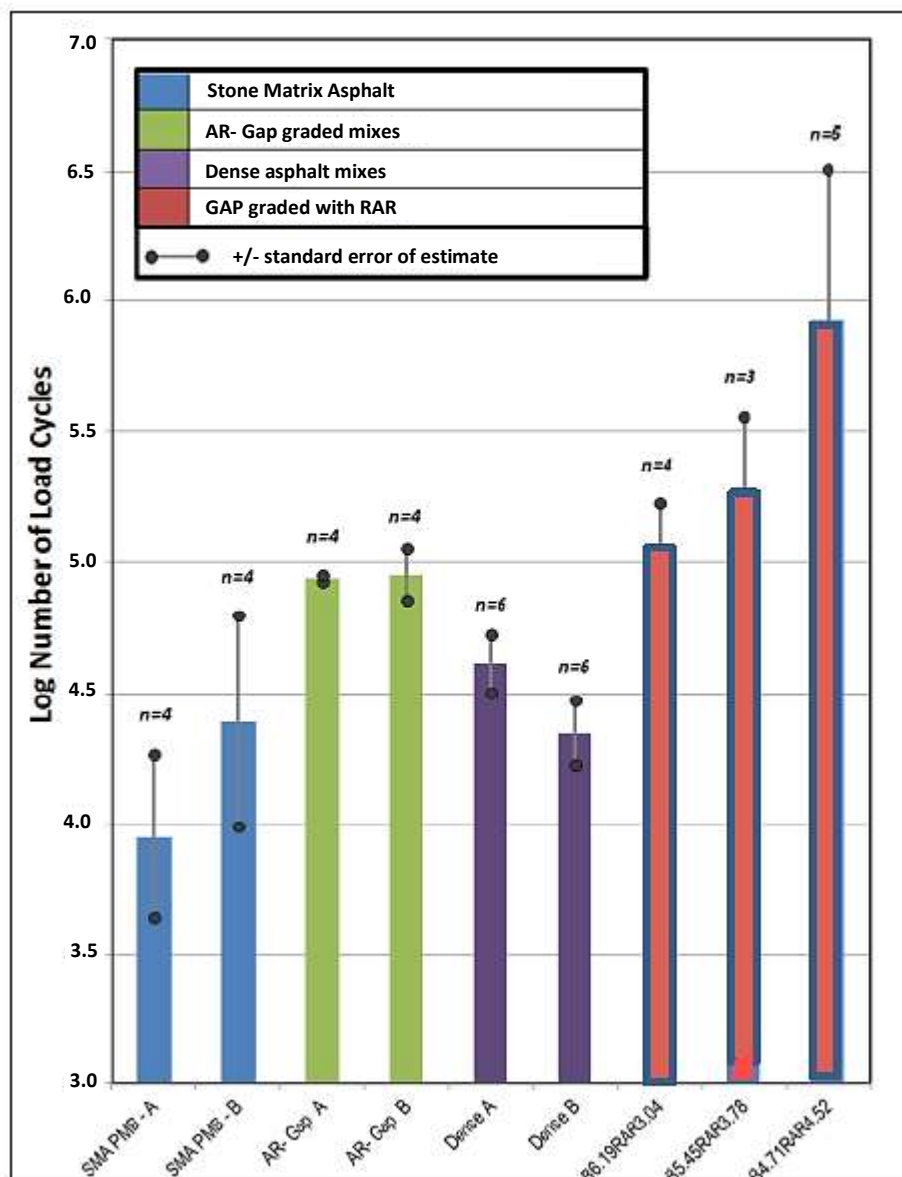


Figura 13. Resultados del ensayo de fatiga a flexión (ASSHTO T321) en mezclas en caliente comparadas con RAR. Fuente: Sousa (2013).

Los resultados mostrados en la figura 13, demuestran que las mezclas asfálticas modificadas con RAR (barras rosas), resisten un número mayor de ciclo de cargas sin que este tenga daños por fatiga con respecto a las demás (modificadas normalmente o convencionales).

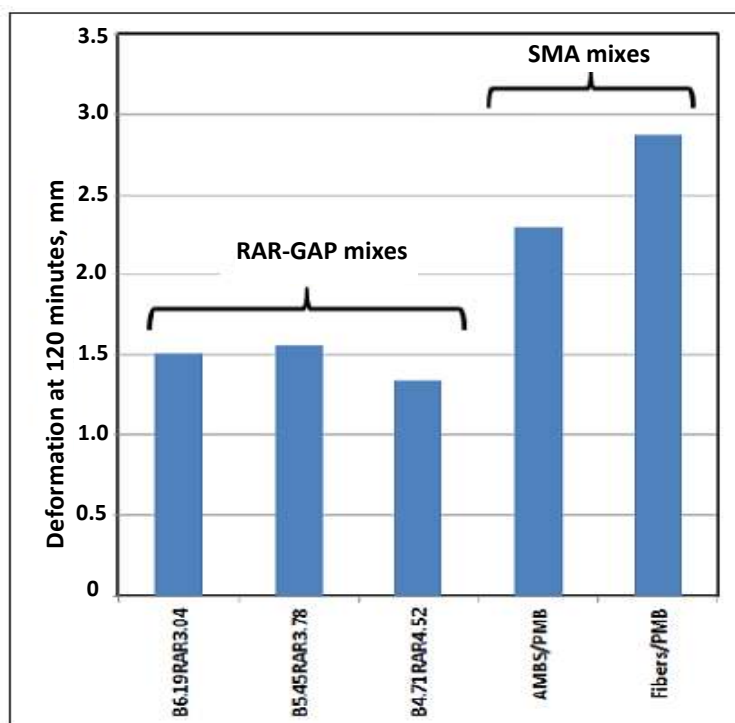


Figura 14. Resultados del ensayo de seguimiento de la rueda en mezclas SMA comparadas con mezclas tipo gap graded con RAR. Fuente: Sousa (2013).

En la figura 14, se observa que mezclas asfálticas tipo gap graded, modificadas con RAR (barras “RAR-GAP mixes”) resultan más resistentes a las deformaciones plásticas con respecto a mezclas tipo SMA, modificadas con polímeros (AMBS y PMB).

**Chávez (2018)**, realizó una comparación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con caucho producidas mediante el proceso húmedo, seco y semi-húmedo (metodología RAR). Sus resultados arrojaron que mediante el proceso semi-húmedo se mantiene el mismo desempeño que el obtenido a través del proceso húmedo. A su vez el comportamiento de las mezclas por el método seco, mostró buenos resultados en términos de fatiga y deformación permanente, sin embargo, el tiempo de digestión del caucho fue considerable. Lo anterior le permitió concluir que las mezclas asfálticas modificadas por el proceso semi-húmedo presentan mejoras en su desempeño, muy similares a los otros procesos, con la diferencia de que no requieren el uso de equipos costosos como es el caso del proceso húmedo; y sin la necesidad de tiempos largos de digestión del caucho, como es el caso del proceso por la vía seca.

## 4.2 DE ACUERDO AL TAMAÑO Y LA FORMA DE LA PARTÍCULA DE CAUCHO

**Xiao (2009)**, ensayó mezclas asfálticas modificadas con gránulos de caucho reciclado (GCR), variando el tamaño del GCR y encontró que el mejor desempeño ante deformaciones plásticas o ahuellamiento, se da cuando las partículas de GCR son de un tamaño de 0,6 mm

(resultando un tamaño de la huella de 0,5 mm aproximadamente). Este resultado lo expone en una gráfica de profundidad de la huella contra el tamaño del GCR (figura 15).

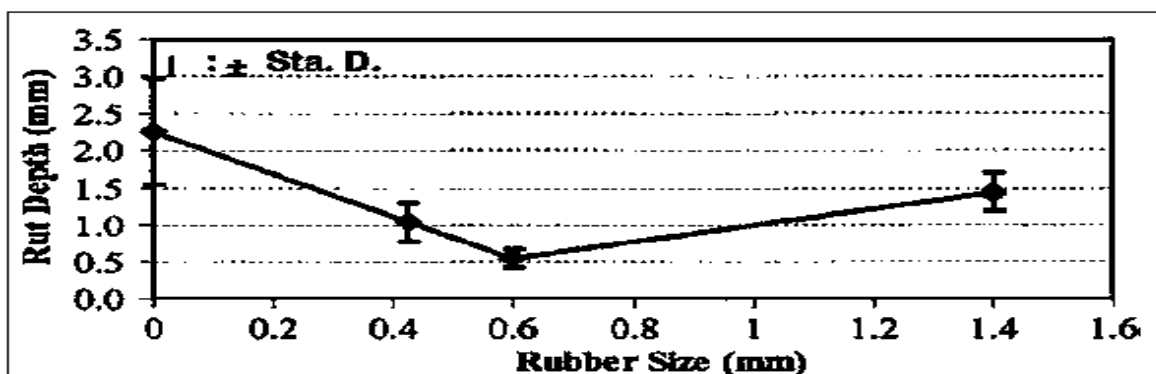


Figura 15. Profundidad del ahuellamiento contra el tamaño del GCR. Fuente: Xiao (2009).

De acuerdo con **Murat (2015)**, el tamaño y la forma del GCR afecta la resistencia a la deformación de fluencia de una mezcla asfáltica. Para llegar a este razonamiento estudio 4 tipos de mezclas asfálticas, la de control (mezcla asfáltica convencional), la Tipo I y la Tipo III tienen forma de grano, siendo la Tipo I más grande que la Tipo III (tamaño equivalente al tamiz 40) y la Tipo II tiene forma de tiras. A estas mezclas se les aplicó carga estática y dinámica, algunos de los resultados obtenidos por Murat se muestran en la figura 16.

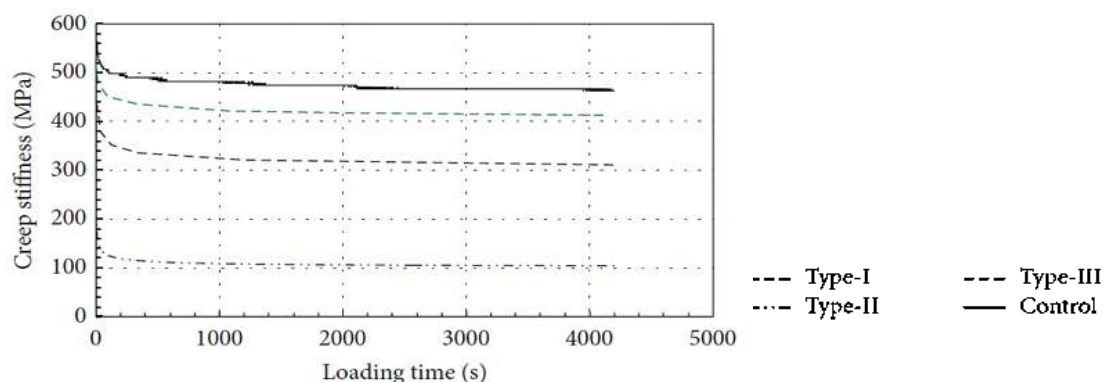


Figura 16. Curvas de fluencia en función del tiempo de carga estática. Fuente: Murat (2015).

De la figura 16 se observa que la carga de fluencia que tienen las muestras con diferentes contenidos de GCR es menor con respecto a una con mezcla convencional; sin embargo, el mejor comportamiento de los tres tipos diferentes de GCR se obtiene con un tamaño diminuto y forma de polvo (Tipo III).

#### 4.3 TABLA RESUMEN

En la tabla 12 se exponen las investigaciones que mayor relación guardan con la temática de modificación de mezclas asfálticas con caucho activado y reaccionado, así como las principales aportaciones o enfoques que se han dado en cada una de ellas.

Tabla 12. Principales investigaciones relacionadas con la modificación de mezclas asfálticas con caucho activado y reaccionado. Fuente: Elaboración propia, 2021.

| INVESTIGACIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                        | ADICIÓN POR VÍA SECA | ADICIÓN POR VÍA HÚMEDA | ADICIÓN POR METODOLÓGIA RAR | ENSAYOS DE FATIGA Y DEFORMACIÓN PERMANENTE | PRUEBAS DE DESEMPEÑO EN CONDICIONES REALES DE TRÁFICO | MEZCLA DENSA | MEZCLA SMA | MEZCLA GAP GRADED |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------|------------|-------------------|
| Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process, Weidong Cao, 2006, China.                                                                                                                                                                   | ○                    |                        |                             | ○                                          |                                                       | ○            |            |                   |
| Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas modificadas con hule molido devulcanizado, Bocanegra, 2019, México                                                                                                                                                                     |                      | ○                      |                             | ○                                          |                                                       | ○            |            |                   |
| Reacted and Activated Rubber, Sousa et al., 2013, Portugal.                                                                                                                                                                                                                          |                      |                        | ○                           | ○                                          |                                                       | ○            | ○          | ○                 |
| Comparación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con caucho producidas mediante el proceso húmedo, seco y semi-húmedo, Chávez, 2018, España.                                                                                                            | ○                    | ○                      | ○                           | ○                                          |                                                       |              |            | ○                 |
| Superpave Mix Design and Laboratory Testing of Reacted and Activated Rubber Modified Asphalt Mixtures, Janak Shah, 2018, E.U.A.                                                                                                                                                      |                      | ○                      | ○                           | ○                                          |                                                       | ○            |            |                   |
| Estudio de la resistencia a fisuración y estructural de mezclas bituminosas fabricadas con polvo de neumático fuera de vida útil. Influencia del espesor de capa”, Laboratorio Ingeniería de la Construcción, Tecnología y Sostenibilidad de la Universidad de Granada, 2019, España | ○                    | ○                      |                             | ○                                          |                                                       |              |            |                   |

|                                                                                                                                                                                                                                                               |  |   |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---|---|---|---|---|---|---|
| “Ensayo de dos secciones de mezclas bituminosas (AC22S) fabricadas con polvo de caucho en la pista de ensayo acelerado de firmes del CET”, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (CEDEX), 2020.                                    |  | ● | ● | ● |   |   |   |   |
| “Estudio del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas SMA fabricadas con polvo de neumático fuera de vida útil pre-tratado (RAR-X)”, Laboratorio Ingeniería de la Construcción, Tecnología y Sostenibilidad de la Universidad de Granada, 2020, España. |  |   | ● | ● |   | ● | ● |   |
| Comportamiento de mezclas asfálticas in situ modificadas con Caucho Activado y Reaccionado (RAR-X), Espinoza, 2021, México.                                                                                                                                   |  |   | ● |   | ● | ● | ● | ● |

## 5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se proporciona el desglose de la metodología sugerida para cumplir con los objetivos del proyecto. Se divide en cinco fases: Documentación y enfoque de la investigación, caracterización de insumos, desarrollo de pruebas, evaluación de resultados y etapa de finalización.

Cada una de las etapas se exponen en el diagrama de bloques de la figura 17, con el fin dar un panorama general del proceso metodológico, aunado a ello, se abordan y describen en los párrafos subsecuentes para dejar una explicación completa de la metodología seguida en este trabajo de investigación.



Figura 17. Diagrama de la secuencia metodológica de la investigación. Fuente: Elaboración propia.

## 5.1 DOCUMENTACIÓN Y ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Etapa preliminar que se extenderá hasta la culminación de la presente investigación. En ella se efectúa una revisión exhaustiva de la bibliografía y estado del arte para determinar el marco teórico, el problema, la justificación, los objetivos, hipótesis y metodología.

## 5.2 CARACTERIZACIÓN DE INSUMOS Y MEZCLAS DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO

Los componentes de una mezcla asfáltica determinan en gran medida su desempeño durante el periodo de vida útil, por lo que es necesario conocer cada una de las características de las mezclas, para complementar y sustentar el análisis posterior de resultados.

En los siguientes párrafos se expone la caracterización de cada tramo de estudio y su respectiva mezcla asfáltica, dando las especificaciones y propiedades tanto del cemento asfáltico como de los agregados.

### 5.2.1 Autopista Pirámides-Tulancingo

El tramo carretero se ubica entre los estados de México e Hidalgo, abarcando los municipios de Teotihuacán, San Martín de las Pirámides, Axapusco, Nopaltepec, Zempoala, Singuilucan, Santiago Tulantepec y Tulancingo (figura 18).

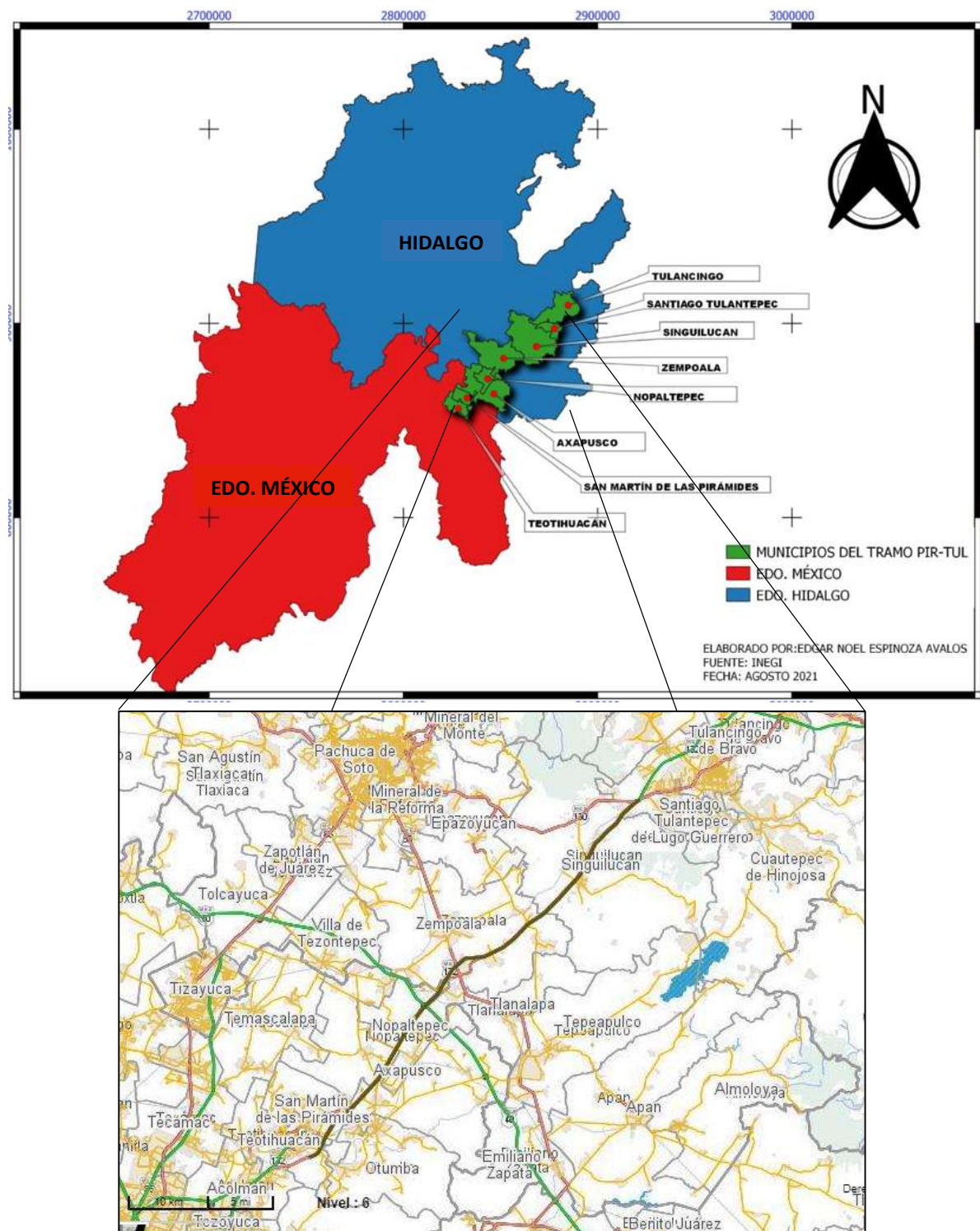


Figura 18. Macro y micro localización del tramo de estudio: Autopista Pirámides-Tulancingo. Fuente: INEGI, 2021 (elaboración propia).

La autopista pirámides Tulancingo estaba conformada por tres diferentes tipos de estructuras: tramos de concreto asfáltico, tramos de concreto asfáltico por debajo de losas de concreto y tramos de losas de concreto, tipologías constructivas efectuadas en diferentes campañas de conservación.

Ante la necesidad de nuevas acciones de mantenimiento, el problema principal que se presentó fue la rehabilitación de capas de rodadura sobre losas de concreto agrietadas, dada la complejidad de una metodología constructiva que evite el reflejo de las fisuras a lo largo de tiempo.

Para dar solución a esta problemática se plantearon diferentes alternativas y después de un análisis exhaustivo se decidió implementar una estrategia constructiva que consta de dos capas asfálticas sobre las losas agrietadas, la primera mediante una mezcla densa con bajo contenido de asfalto convencional, de 5 centímetros (cm) de espesor y sobre ella una segunda capa de 5 cm, con mezcla asfáltica en caliente de granulometría discontinua tipo gap graded, modificada con RAR (Gap-RAR), sistema constructivo ilustrado en la figura 19.

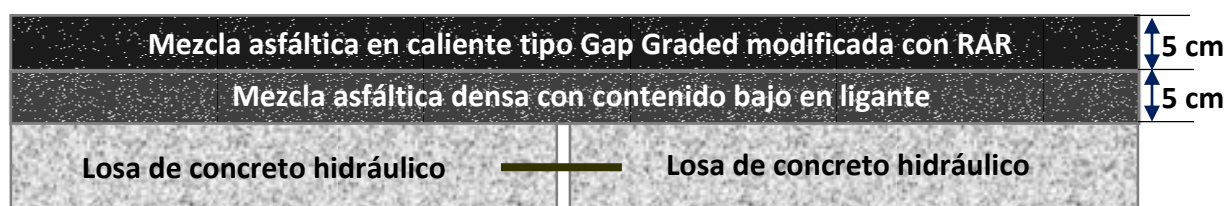


Figura 19. Estructura de las capas superficiales del pavimento. Fuente: Cirtec, Sacyr, 2020.

#### 5.2.1.1 Caracterización de los insumos de la mezcla asfáltica

Las características granulométricas, especificaciones del ligante asfáltico y propiedades volumétricas de una mezcla asfáltica influyen directamente en la resistencia al agrietamiento por fatiga, durabilidad y resistencia a la deformación permanente, es decir, las solicitaciones de un pavimento en servicio.

Para este caso la granulometría de trabajo se presenta en la tabla 13 y en la figura 20. El cemento asfáltico seleccionado para la mezcla de esta composición granulométrica corresponde a un ligante asfáltico grado PG 64-22-H.

Tabla 13. Granulometría de trabajo. Fuente: Cirtec, Sacyr, 2020.

| Mallas A.S.T.M. | 12/18 | 6/12 | 0/6 | Fracción total (% pasa) | Límites granulométricos |     |
|-----------------|-------|------|-----|-------------------------|-------------------------|-----|
| 19.1            | 100   | 100  | 100 | 100.0                   | 100                     | 100 |
| 12.7            | 25.8  | 98.7 | 100 | 88.0                    | 77                      | 95  |
| 9.5             | 4.6   | 69.6 | 100 | 67.0                    | 58                      | 76  |

Continuación de Tabla 13.

|              |     |      |      |      |     |     |
|--------------|-----|------|------|------|-----|-----|
| <b>6.3</b>   | 1.2 | 14.1 | 99.6 | 32.8 | 24  | 42  |
| <b>4.75</b>  | 0.6 | 3.6  | 97.4 | 26.0 | 21  | 31  |
| <b>2.38</b>  |     |      |      |      | 10  | 20  |
| <b>2</b>     | 0.4 | 0.4  | 59.2 | 16.1 |     |     |
| <b>0.85</b>  | 0.2 | 0.3  | 30.6 | 10.1 |     |     |
| <b>0.63</b>  |     |      |      |      | 4   | 12  |
| <b>0.43</b>  | 0.2 | 0.3  | 13.2 | 6.5  |     |     |
| <b>0.32</b>  |     |      |      |      | 3   | 9   |
| <b>0.25</b>  | 0.1 | 0.3  | 7.8  | 5.3  |     |     |
| <b>0.15</b>  | 0.1 | 0.3  | 5.0  | 4.8  |     |     |
| <b>0.075</b> | 0.1 | 0.2  | 3.6  | 4.4  | 2.4 | 6.4 |

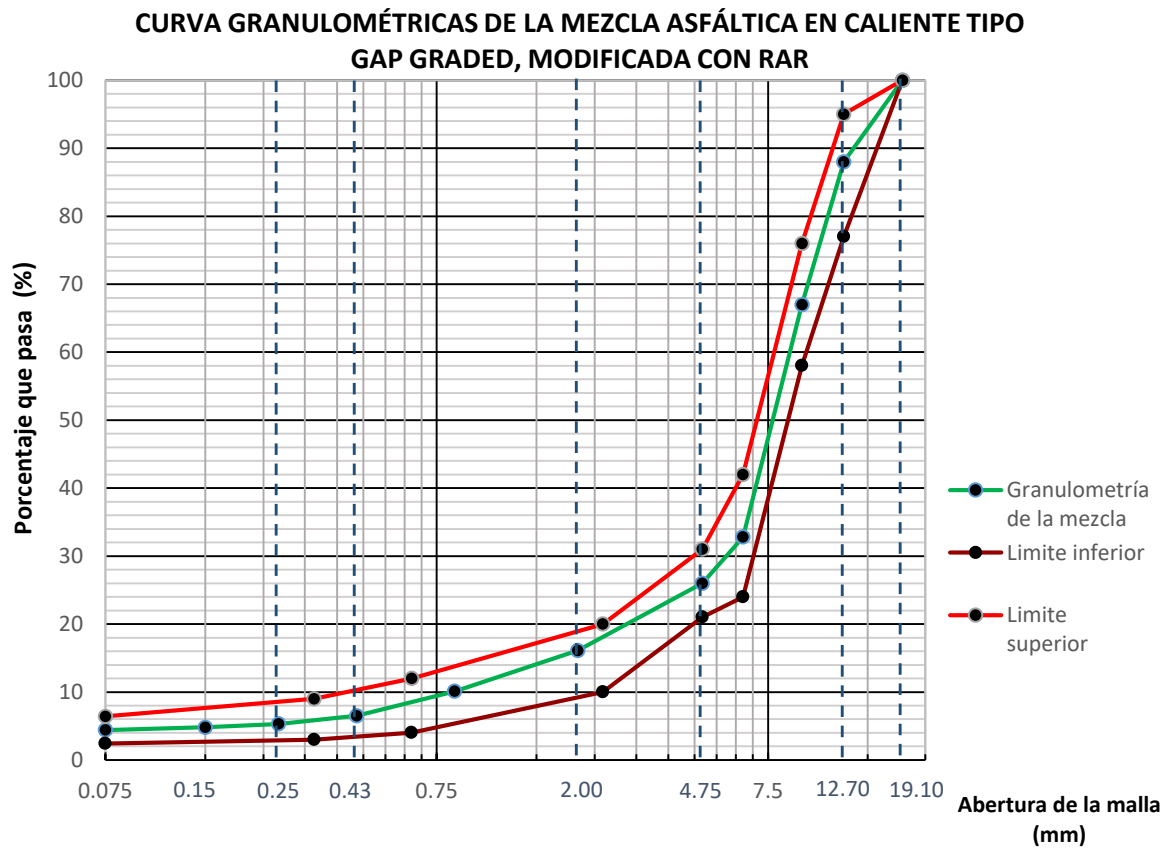


Figura 20. Curvas granulométricas de la mezcla Gap Graded-RAR. Fuente: Cirtec, Sacyr, 2020.

### 5.2.1.2 Caracterización y volumetría de la mezcla asfáltica

Los valores de volumetría que definen la mezcla asfáltica en caliente tipo “GAP GRADED” modificada con RAR, se resumen en la tabla 14.

*TABLA 14. Características de la mezcla asfáltica. Fuente: Cirtec, Sacyr, 2020.*

| <b>MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO GAP GRADED MODIFICADA CON RAR</b> |                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estructura granular                                                    | 76.5 % agregado grueso de 1/2” a No.4, 20.7% arena Fina, 2.8 % Finos y 2.88% de RAR/agregados |
| Asfalto                                                                | PG: 64V - 22                                                                                  |
| Contenido óptimo de asfalto (%)                                        | 6.59 respecto a la masa de la mezcla                                                          |
| Contenido óptimo de asfalto (%)                                        | 7.05 respecto a la masa del agregado                                                          |
| Densidad máxima teórica (T/m3)                                         | 2.281                                                                                         |
| Densidad de mezcla compactada (T/m3)                                   | 2.092                                                                                         |
| % Vacíos                                                               | 8.3                                                                                           |
| % VAM                                                                  | 24.0                                                                                          |
| % VFA                                                                  | 67.7                                                                                          |
| % TSR                                                                  | -                                                                                             |
| Ensayo de rueda cargada de Hamburgo (mm)                               | -                                                                                             |
| Estabilidad (kg)                                                       | No aplica                                                                                     |
| Flujo (mm)                                                             | No aplica                                                                                     |

### 5.2.2 Tramo carretero del periférico de la ciudad de Morelia

El proyecto del periférico Paseo de la República de la ciudad de Morelia, comprende la rehabilitación de tramos aislados de la zona oriente y sur de dicha vialidad, del km 0+000 al 14+000, con origen en Instituto Tecnológico, Municipio de Morelia, en el estado de Michoacán (remarcados con color negro en la figura 21). El proyecto consistió en el fresado de la carpeta existente y renivelación de la superficie de rodamiento mediante la aplicación de dos mezclas asfálticas en caliente en diferentes zonas, la primera de ellas corresponde a una mezcla asfáltica de granulometría discontinua tipo SMA con adición de caucho reaccionado y activado (RAR); la segunda obedece a una mezcla asfáltica de granulometría densa diseñada con el nivel II del protocolo AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto A.C.).

#### *5.2.2.1 Caracterización de los insumos de la mezcla asfáltica tipo SMA y de la mezcla de granulometría densa*

Los agregados pétreos utilizados en la mezcla SMA y en la mezcla densa son provenientes de dos bancos de materiales, para la fracción gruesa se obtuvieron del banco denominado “La roka”, con un tamaño nominal de 3/4” para la mezcla densa y 3/8” para la mezcla SMA. El banco se ubica en el municipio de Tarimbaro, Michoacán, a la altura del kilómetro 25+500 de la carretera Uriangato-Morelia; el material es de tipo basáltico con tratamiento de trituración total.

La parte correspondiente a la fracción fina para ambos tipos de mezclas, se obtuvo del banco de materiales “El zapatero”, localizado en el municipio de Santa Cruz de Juventino

Rosas, Guanajuato, a un costado de la carretera Guanajuato-Juventino Rosas, en el kilómetro 65+000; el material es de origen basáltico, extraído con maquinaria y uso de explosivos.

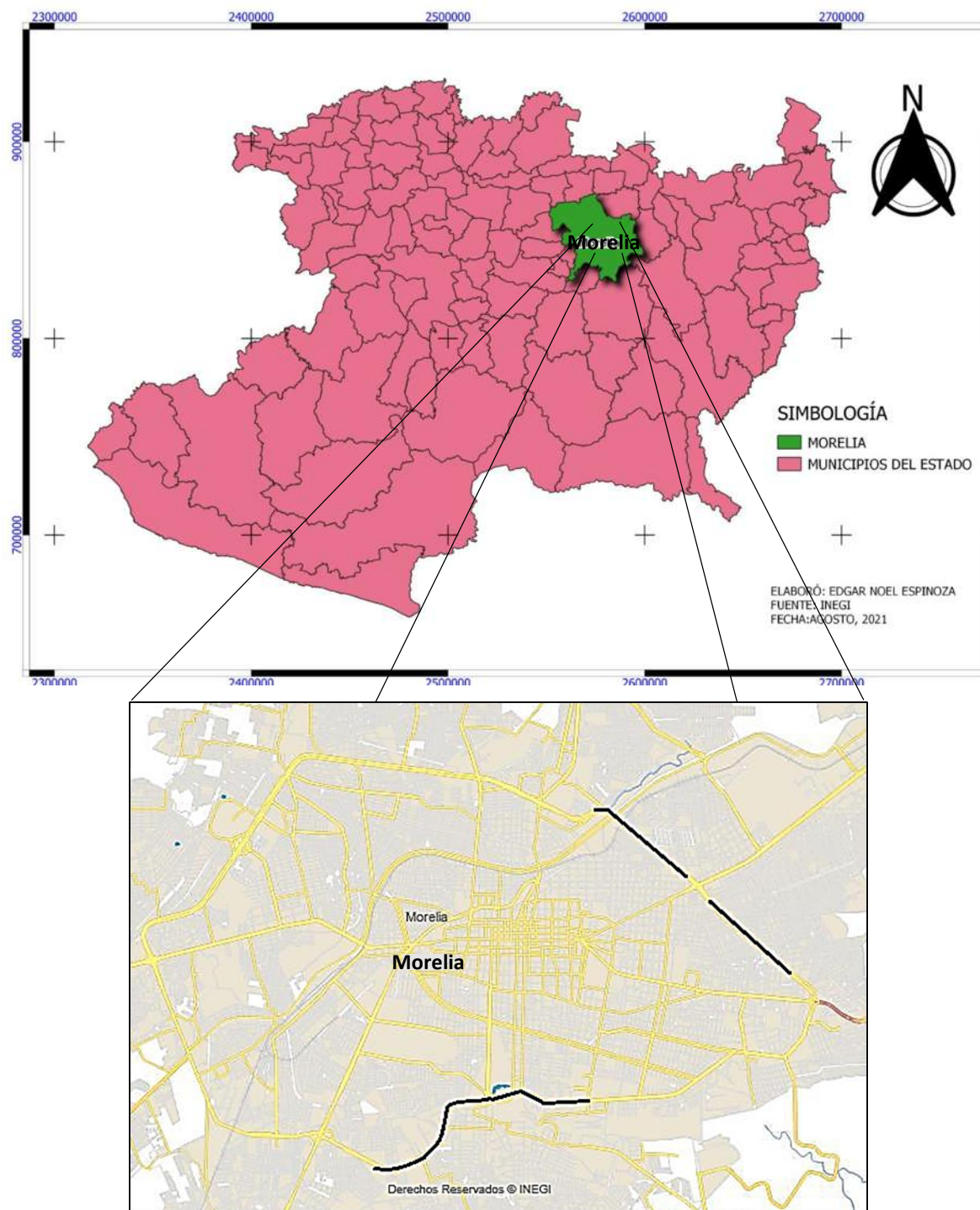


Figura 21. Macro y micro localización del tramo de estudio: periférico Paseo de la República de la ciudad de Morelia. Fuente: INEGI, 2021 (elaboración propia).

Las propiedades del pétreo son en gran parte responsables del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, ya que, por ejemplo: controlan en gran medida las características de deformación permanente de las mezclas, así como la fricción. En atención a esta idea y previo al uso de los materiales pétreos, se evaluaron las propiedades de calidad de los agregados pétreos, para la producción de mezclas asfálticas, establecidas en las normas de la SCT, así como las especificaciones americanas ASTM. Los resultados obtenidos mostraron que tanto la fracción gruesa, como la porción del agregado fino, cumplen con los parámetros establecidos en las normativas mencionadas en este párrafo; los índices de calidad del agregado pétreo grueso se exponen en la tabla 15 (grava 3/8”) y 16 (grava 3/4”), mientras que los parámetros correspondientes a los agregados finos y filler de aportación, se resumen respectivamente en las tablas 17 y 18 de esta sección.

*TABLA 15. Análisis de calidad del agregado grueso de 3/8” para la mezcla SMA. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V.*

| CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO SELLO DEL BANCO “LA ROKA” (3/8”) |           |                |                          |                  |
|--------------------------------------------------------------|-----------|----------------|--------------------------|------------------|
| ENSAYO                                                       | RESULTADO | ESPECIFICACIÓN | OBSERVACIONES            | MÉTODO DE PRUEBA |
| Desgaste de los Ángeles (%)                                  | 16.4      | 25 máximo      | Dentro de especificación | ASTM C 131       |
| Desgaste Microdeval (%)                                      | 12.1      | 15 máximo      | Dentro de especificación | ASTM D 6928      |
| Partículas trituradas 1 cara (%)                             | 100       | 100 mínimo     | —                        | ASTM D 5821      |
| Partículas trituradas 2 o más caras (%)                      | 100       | 90 mínimo      | Dentro de especificación | ASTM D 5821      |
| Partículas alargadas y lajeadas (%)                          | 32        | 35 máximo      | Dentro de especificación | N-CMT-4-04-17    |
| Adherencia asfalto/pétreo (%)                                | 93.4      | 90 mínimo      | Dentro de especificación | AMAAC RA 08      |
| Densidad (T/m3)                                              | 2.57      | 2.40 mínimo    | Dentro de especificación | ASTM C127        |
| Absorción (%)                                                | 1.88      | N.A.           | —                        | ASTM C127        |

*TABLA 16. Análisis de calidad del agregado grueso de 3/4" para la mezcla densa. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V.*

| CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO GRUESO DEL BANCO "LA ROKA" (3/4") |           |                |                          |                  |
|---------------------------------------------------------------|-----------|----------------|--------------------------|------------------|
| ENSAYO                                                        | RESULTADO | ESPECIFICACIÓN | OBSERVACIONES            | MÉTODO DE PRUEBA |
| Desgaste de los Ángeles (%)                                   | 19.4      | 30 máximo      | Dentro de especificación | ASTM C 131       |
| Desgaste Microdeval (%)                                       | 14.4      | 15 máximo      | Dentro de especificación | ASTM D 6928      |
| Partículas trituradas 2 o más caras (%)                       | 100       | 90 mínimo      | Dentro de especificación | ASTM D 5821      |
| Partículas alargadas, 1 a 5 (%)                               | 1.7       | 10 máximo      | Dentro de especificación | ASTM D4791       |
| Partículas lajeadas, 1 a 5 (%)                                | 2.4       | 10 máximo      | Dentro de especificación | ASTM D4791       |
| Adherencia asfalto/pétreo (%)                                 | 92.1      | 90 mínimo      | Dentro de especificación | AMAAC RA 08      |
| Densidad (T/m3)                                               | 2.61      | 2.40 mínimo    | Dentro de especificación | ASTM C127        |
| Absorción (%)                                                 | 2.14      | N.A.           | _____                    | ASTM C127        |

*TABLA 17. Análisis de calidad del agregado fino para mezcla SMA y mezcla densa. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V.*

| CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO ARENA FINA DEL BANCO "EL ZAPATERO" |           |                |                          |                   |
|----------------------------------------------------------------|-----------|----------------|--------------------------|-------------------|
| ENSAYO                                                         | RESULTADO | ESPECIFICACIÓN | OBSERVACIONES            | MÉTODOS DE PRUEBA |
| Equivalente de arena (%)                                       | 65.6      | 50 mínimo      | Dentro de especificación | ASTM D2419        |
| Azul de metileno (mg/g)                                        | 12        | 12 máximo      | Dentro de especificación | AMAAC RA 05       |
| Angularidad del fino (%)                                       | 46.3      | 40 mínimo      | Dentro de especificación | AASHTO T 304      |
| Densidad (T/m3)                                                | 2.52      | 2.40           | _____                    | ASTM C128-12      |
| Absorción (%)                                                  | 3.97      | N.A.           | _____                    | ASTM C128-12      |

*TABLA 18. Análisis de calidad del filler de aportación para la mezcla SMA. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V.*

| CARACTERIZACIÓN DEL FILLER (CARBONATO DE CALCIO) |           |                |                          |                   |
|--------------------------------------------------|-----------|----------------|--------------------------|-------------------|
| ENSAYO                                           | RESULTADO | ESPECIFICACIÓN | OBSERVACIONES            | MÉTODOS DE PRUEBA |
| Azul de metileno (mg/g)                          | 3         | 12 Máximo      | Dentro de especificación | AMAAC RA 05       |
| Densidad (T/m3)                                  | 2.51      | N.A.           | _____                    | ASTM C128-12      |

Asegurada la calidad de los agregados, se determinó la granulometría de cada una de las fracciones de material que integran las dos diferentes mezclas, dando como resultado los valores mostrados en la tabla 19 y 20, que se exponen a continuación.

*TABLA 19. Granulometrías individuales de los agregados y componentes de la mezcla SMA. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V.*

| GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS |                     |                |                 |                |
|--------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|
| Malla                          | Grava 3/8" (% pasa) | Arena (% pasa) | Filler (% pasa) | RAR X (% pasa) |
| 3/4                            | 100.0               | 100.0          | 100.0           | 100.0          |
| 1/2                            | 100.0               | 100.0          | 100.0           | 100.0          |
| 3/8                            | 99.1                | 100.0          | 100.0           | 100.0          |
| No.4                           | 24.9                | 100.0          | 100.0           | 100.0          |
| No.8                           | 0.6                 | 86.7           | 100.0           | 100.0          |
| No.16                          | 0.0                 | 41.7           | 98.1            | 100.0          |
| No.30                          | 0.0                 | 23.8           | 96.9            | 98.9           |
| No.50                          | 0.0                 | 14.5           | 92.7            | 56.5           |
| No.100                         | 0.0                 | 9.7            | 75.7            | 18.2           |
| No.200                         | 0.0                 | 6.6            | 56.4            | 11.3           |

*TABLA 20. Granulometrías individuales de los agregados y componentes de la mezcla densa. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V.*

| GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS |                     |                     |                |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| Malla                          | Grava 3/4" (% pasa) | Grava 3/8" (% pasa) | Arena (% pasa) |
| 1"                             | 100.0               | 100.0               | 100.0          |
| 3/4                            | 76.3                | 100.0               | 100.0          |
| 1/2                            | 32.3                | 100.0               | 100.0          |
| 3/8                            | 10.7                | 99.1                | 100.0          |
| No.4                           | 0.2                 | 24.9                | 100.0          |
| No.8                           | 0.0                 | 0.6                 | 86.7           |
| No.16                          | 0.0                 | 0.0                 | 41.7           |
| No.30                          | 0.0                 | 0.0                 | 23.8           |
| No.50                          | 0.0                 | 0.0                 | 14.5           |
| No.100                         | 0.0                 | 0.0                 | 9.7            |
| No.200                         | 0.0                 | 0.0                 | 6.6            |

En atención al clima predominante, las solicitudes y comportamiento del tráfico de este proyecto, se seleccionó un cemento asfáltico grado PG 64V-22 para las dos tipologías de mezclas, mismo que se ajusta a una intensidad del tráfico intermedia de 10 a 30 millones de ejes equivalentes de 8.2 toneladas y a velocidades de operación menores a 20 kilómetros por hora, condiciones presentes en este tramo carretero urbano. Las pruebas y los respectivos resultados que aseguran la calidad del asfalto se muestran en la tabla 21 de la presente sección.

*TABLA 21. Análisis de calidad del cemento asfáltico. Fuente: ERGON ASFALTOS MEXICO S. de R.L. de C.V.*

| ASFALTO CLASIFICACIÓN PG 64V-22                           |         |       |                    |                     |
|-----------------------------------------------------------|---------|-------|--------------------|---------------------|
| PRUEBA                                                    | UNIDAD  | VALOR | METODO DE ANALISIS | VALOR DE REFERENCIA |
| <b>Producto original</b>                                  |         |       |                    |                     |
| Viscosidad Rotacional Brookfield                          | Pa*s    | 0.657 | ASTM D4402         | 3.00 máximo         |
| Punto de inflamación Cleveland                            | °C      | > 230 | ASTM D3143         | 230.00 mínimo       |
| Punto de reblandecimiento                                 | °C      | 56.50 | ASTM D36           | 55.00 mínimo        |
| Módulo Reológico de Corte Dinámico                        | kPa     | 3.030 | ASTM D7175         | 1.00 mínimo         |
| <b>Después de envejecimiento en horno RTFO</b>            |         |       |                    |                     |
| Pérdida de masa por calentamiento                         | %       | -0.25 | ASTM D2872         | 1 máximo            |
| Módulo Reológico de Corte Dinámico                        | kPa     | 7.60  | ASTM D7175         | 2.2 mínimo          |
| Jnr a 3.2 kPa en MSCR para tráfico muy alto (V)           | kPa     | 0.707 | ASTM D7405         | 1.0 máximo          |
| MSCR Clasificación SuperPAVE Tipo de tráfico              | S,H,V,E | V     | ASTM D7405         | -                   |
| <b>Después de envejecimiento en horno a presión (PAV)</b> |         |       |                    |                     |
| Rigidización a 25 °C                                      | kPa     | 4140  | ASTM D7175         | 5000                |
| Rigidez de Flexión a -12 °C                               | Mpa     | 223.5 | ASTM D6648         | 300                 |
| Valor "m" a -12 °C                                        | ----    | 0.311 | ASTM D6648         | 0.300               |

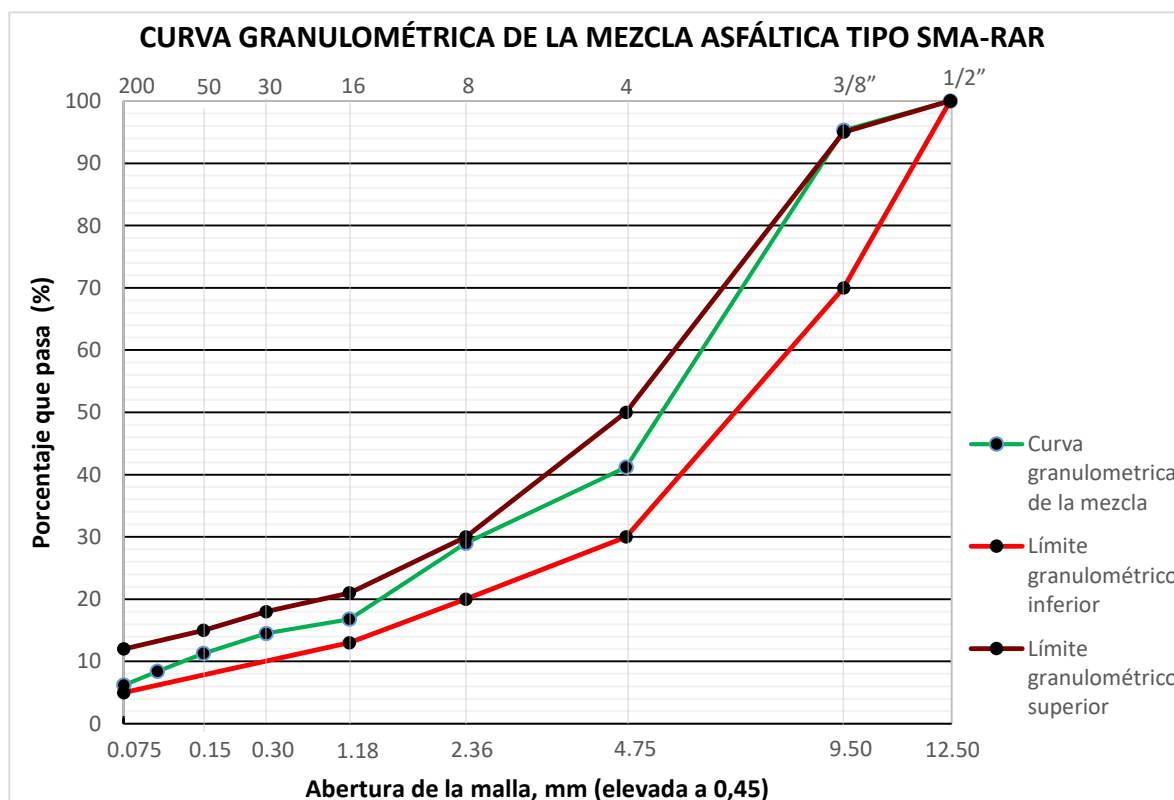
La selección de la gradación de agregado del pétreo y el agente modificador (RAR en la mezcla SMA), consta de la siguiente combinación para la mezcla SMA: 70% de material de tamaño nominal de 3/8" (sello), 21% de arena fina, 6% de filler (carbonato de calcio) y 3% de RAR; mientras que para la mezcla densa se tiene un 56.1 % de agregado grueso de 3/4" a No.4, 40.8 % de arena y 3.1% finos.

La granulometría de trabajo para la mezcla tipo SMA de 3/8" de tamaño nominal y con adición de RAR, se muestra en la tabla 22 y figura 22. En el caso de la mezcla densa de 3/4",

con diseño: protocolo AMAAC nivel dos; la tabla 23 y figura 23, describen su estructura granular.

*TABLA 22. Granulometría de trabajo de la mezcla SMA-RAR. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V.*

| ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA DE LA MEZCLA SMA-RAR |                |                                                    |                                              |                                              |
|------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Malla                                          |                | Tamaño nominal del agregado = 9.5 mm (3/8")        |                                              |                                              |
| Denominación                                   | Abertura en mm | Granulometría de trabajo (70-21-6-3)<br>% que pasa | Límite granulométrico superior<br>% que pasa | Límite granulométrico inferior<br>% que pasa |
| 1/2                                            | 12.5           | 100.0                                              | 100                                          | 90                                           |
| 3/8                                            | 9.5            | 95.3                                               | 95                                           | 70                                           |
| No.4                                           | 4.75           | 41.2                                               | 50                                           | 30                                           |
| No.8                                           | 2.36           | 29.0                                               | 30                                           | 20                                           |
| No.16                                          | 1.18           | 16.8                                               | 21                                           | -                                            |
| No.30                                          | 0.60           | 14.5                                               | 18                                           | -                                            |
| No.50                                          | 0.30           | 11.3                                               | 15                                           | -                                            |
| No.100                                         | 0.15           | 8.4                                                | -                                            | -                                            |
| No.200                                         | 0.075          | 6.2                                                | 12                                           | 5                                            |



*Figura 22. Curvas granulométricas de la mezcla SMA-RAR. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V., 2021.*

TABLA 23. Granulometría de trabajo de la mezcla densa nivel 2 del protocolo AMAAC. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V.

| ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA DE LA MEZCLA DENSA |                |                                                 |                                       |                                       |
|----------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Malla                                        |                | Tamaño nominal del agregado = 19 mm (3/4")      |                                       |                                       |
| Denominación                                 | Abertura en mm | Granulometría de trabajo (70-21-6-3) % que pasa | Punto de control superior, % que pasa | Punto de control inferior, % que pasa |
| 1                                            | 25.0           | 100.0                                           | 100                                   | 100                                   |
| 3/4                                          | 19.0           | 92.7                                            | 100                                   | 90                                    |
| 1/2                                          | 12.5           | 84.5                                            | 90                                    | -                                     |
| 3/8                                          | 9.5            | 74.8                                            | -                                     | -                                     |
| No.4                                         | 4.75           | 43.9                                            | -                                     | -                                     |
| No.8                                         | 2.36           | 31.1                                            | 49                                    | 23                                    |
| No.16                                        | 1.18           | 15.8                                            | -                                     | -                                     |
| No.30                                        | 0.60           | 10.2                                            | -                                     | -                                     |
| No.50                                        | 0.30           | 7.7                                             | -                                     | -                                     |
| No.100                                       | 0.15           | 5.9                                             | -                                     | -                                     |
| No.200                                       | 0.075          | 3.1                                             | 8                                     | 2                                     |

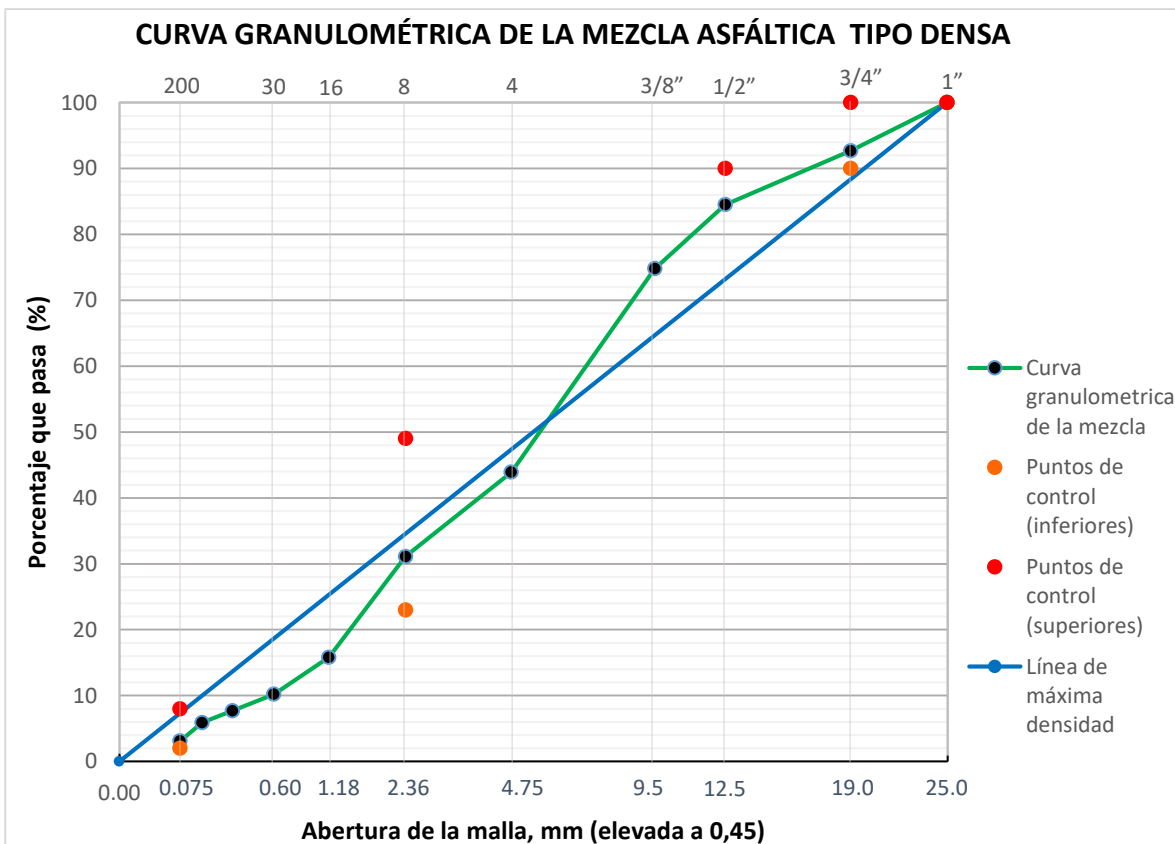


Figura 23. Curvas granulométricas de la mezcla densa nivel 2 del protocolo AMAAC. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V., 2021.

### 5.2.2.2 Caracterización y volumetría de las mezclas asfálticas

Tanto para la mezcla SMA como para la mezcla densa se usó la metodología de diseño de mezclas del protocolo AMAAC nivel dos, es decir, se atendieron las recomendaciones establecidas en dicho procedimiento de diseño en cuanto a la selección del asfalto grado PG, los requerimientos en las propiedades volumétricas, daño por humedad y la susceptibilidad a la deformación permanente. La caracterización de las mezclas empleadas en los tramos, se resume en la tabla 24.

*TABLA 24. Características de las mezclas asfálticas empleadas. Fuente: PRUEBAS, ENSAYOS Y PROYECTOS S.A. de C.V., 2021 (elaboración propia).*

| MEZCLA                                          | SMA RAR                                                                     | DENSA ALTO DESEMPEÑO                                            |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>GRANULOMETRÍA DE TRABAJO</b>                 | 70% sello 3/8", 21% arena Fina, 6% Filler (Carbonato de calcio) y 3% de RAR | 56.1 % agregado grueso de 3/4" a No.4, 40.8 % arena, 3.1% finos |
| <b>ASFALTO</b>                                  | PG: 64V - 22                                                                | PG: 64V - 22                                                    |
| <b>CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO (%)</b>          | 6.28 respecto a la masa de la mezcla                                        | 5.79 respecto a la masa de la mezcla                            |
| <b>CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO (%)</b>          | 6.70 respecto a la masa del agregado                                        | 6.15 respecto a la masa del agregado                            |
| <b>DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA (T/M3)</b>           | 2.386                                                                       | 2.321                                                           |
| <b>DENSIDAD DE MEZCLA COMPACTADA (T/M3)</b>     | 2.284                                                                       | 2.225                                                           |
| <b>% VACÍOS</b>                                 | 4.28                                                                        | 4.48                                                            |
| <b>% VAM</b>                                    | 17.52                                                                       | 17.78                                                           |
| <b>% VFA</b>                                    | 75.58                                                                       | 74.79                                                           |
| <b>% TSR</b>                                    | 93.9                                                                        | 85.44                                                           |
| <b>ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO (MM)</b> | 5.57                                                                        | 4.66                                                            |

### 5.2.3 Autopista Pátzcuaro-Uruapan

En años recientes el tramo carretero concesionado Pátzcuaro - Lázaro Cárdenas se ha sometido a un proceso de mejora, modernización y ampliación. Dentro de los últimos trabajos que se efectuaron está la construcción de un segundo cuerpo en el segmento comprendido entre Pátzcuaro y Uruapan, del km 61+900 al 66+700, cuerpo A, carril de baja velocidad (remarcado en color negro en la figura 24).

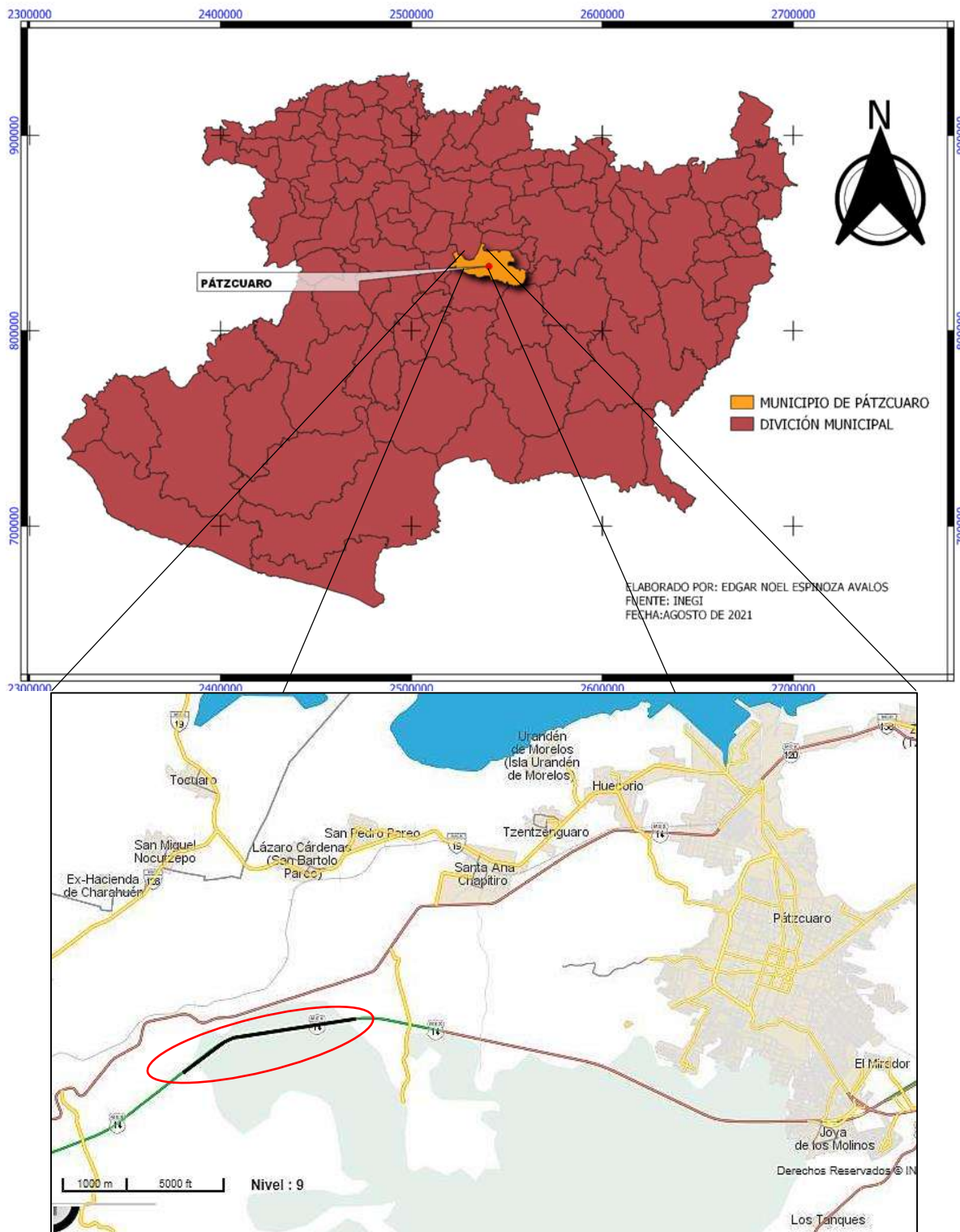


Figura 24. Macro y micro localización del tramo de estudio: Autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas. Fuente: INEGI, 2021 (elaboración propia).

Derivado de cuestiones técnicas, se realizó el cambio del proyecto en la estructuración del pavimento inicialmente considerado. El cambio implicó la aplicación de una capa de base estabilizada con cemento la cual fue construida con porcentajes de cemento variables. Encima de esa capa se construyó una capa base asfáltica y sobre ella una carpeta asfáltica densa diseñada con la metodología Marshall.

Antes de la puesta en servicio el tramo manifestaba agrietamientos y otros deterioros, por lo cual el concesionario “Autopistas Michoacán” contrató a la empresa Soluciones e Ingeniería en Vías Terrestres S.A. de C.V. para la ejecución de un dictamen técnico en el cual se expusieran las causas de dichos deterioros y se estableciera la o las soluciones viables para que el tramo en cuestión fuera reparado con el fin de elevar el nivel de servicio y cumplir con los estándares de calidad por un periodo mínimo de 10 años.

De las diferentes alternativas posibles analizadas en el dictamen técnico, se optó por aplicar sobre la mezcla densa agrietada, una sobre carpeta con mezcla asfáltica tipo SMA con asfalto modificado con hule molido de llanta, en un espesor de 5 cm para retardar la aparición de las grietas en la superficie del pavimento. La motivación de dicha alternativa fue solucionar un problema funcional (la reflexión de grietas originadas en la base estabilizada con cemento), ya que dentro del análisis estructural efectuado en el dictamen se determinó que no existía necesidad de refuerzo estructural.

#### *5.2.3.1 Caracterización de los insumos de la mezcla asfáltica de granulometría discontinua tipo SMA con adición de RAR.*

En lo que comprende a los agregados pétreos utilizados en la mezcla, tanto la fracción gruesa (tamaño nominal de 3/8”) como la fracción fina son provenientes del banco de materiales conocido como “Las víboras”, este se ubica en el municipio de Acuitzio del Canje, Michoacán, en las coordenadas 19° 31’ 46.48’’ latitud norte y 101° 18’ 21.73’’ longitud oeste; a la altura del kilómetro 21+500 de la carretera Morelia-Pátzcuaro. El material extraído en este banco es de tipo basáltico con tratamiento de trituración total.

La evaluación de las propiedades de calidad de los agregados pétreos para la producción de mezclas asfálticas, establecidas en las normas de la SCT, así como las especificaciones americanas ASTM, se exponen en la tabla 25 para el agregado de 3/8” y en la tabla 26 que corresponde a la porción fina. El filler de aportación para la mezcla es carbonato de calcio, cuyas propiedades corresponden a las especificadas en la tabla 9 del apartado 9.2.2.1.

*TABLA 25. Análisis de calidad del agregado grueso de 3/8" para la mezcla SMA. Fuente: LASFALTO S. de R.L. de C.V.*

| CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO TAMAÑO NOMINAL DE 3/8" DEL BANCO "LAS VÍBORAS" |           |                |                          |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------|--------------------------|------------------|
| ENSAYO                                                                      | RESULTADO | ESPECIFICACIÓN | OBSERVACIONES            | MÉTODO DE PRUEBA |
| Desgaste de los Ángeles (%)                                                 | 16.0      | 25 máximo      | Dentro de especificación | ASTM C 131       |
| Desgaste Microdeval (%)                                                     | 6.8       | 15 máximo      | Dentro de especificación | ASTM D 6928      |
| Partículas trituradas 1 cara (%)                                            | 100       | N.A.           | _____                    | ASTM D 5821      |
| Partículas trituradas 2 o más caras (%)                                     | 100       | 90 mínimo      | Dentro de especificación | ASTM D 5821      |
| Partículas alargadas y lajeadas (%)                                         | 31        | 35 máximo      | Dentro de especificación | N-CMT-4-04-17    |
| Adherencia asfalto/pétreo (%)                                               | 97.0      | 90 mínimo      | Dentro de especificación | AMAAC RA 08      |
| Densidad (T/m3)                                                             | 2.596     | N.A.           | _____                    | ASTM C127        |
| Absorción (%)                                                               | 1.930     | N.A.           | _____                    | ASTM C127        |

*TABLA 26. Análisis de calidad del agregado arena fina para la mezcla SMA. Fuente: LASFALTO S. de R.L. de C.V.*

| CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO ARENA FINA DEL BANCO "LAS VÍBORAS" |           |                |                          |                   |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|----------------|--------------------------|-------------------|
| ENSAYO                                                          | RESULTADO | ESPECIFICACIÓN | OBSERVACIONES            | MÉTODOS DE PRUEBA |
| Equivalente de arena (%)                                        | 86.8      | 50 mínimo      | Dentro de especificación | ASTM D2419        |
| Azul de metileno (mg/g)                                         | 7         | 12 máximo      | Dentro de especificación | AMAAC RA 05       |
| Angularidad del fino (%)                                        | 47.3      | 40 mínimo      | Dentro de especificación | AASHTO T 304      |
| Densidad (T/m3)                                                 | 2.505     | N.A.           | _____                    | ASTM C128-12      |
| Absorción (%)                                                   | 2.986     | N.A.           | _____                    | ASTM C128-12      |

En atención a los resultados obtenidos y mostrados en las tablas 25 y 26, se establece que tanto la fracción gruesa, como la arena constituyente del agregado fino, cumplen con las especificaciones establecidas en las normativas de la SCT, ASTM y AASHTO, especificadas en la caracterización de los agregados.

En cuanto a la granulometría de las fracciones de material que integran la mezcla SMA, se especifican en la tabla 27 de esta sección.

*TABLA 27. Granulometrías individuales de los agregados y componentes de la mezcla SMA.  
Fuente: LASFALTO S. de R.L. de C.V.*

| GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS |                     |                |                 |                |
|--------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|
| Malla                          | Grava 3/8" (% pasa) | Arena (% pasa) | Filler (% pasa) | RAR X (% pasa) |
| 3/4                            | 100.0               | 100.0          | 100.0           | 100.0          |
| 1/2                            | 99.5                | 100.0          | 100.0           | 100.0          |
| 3/8                            | 78.4                | 100.0          | 100.0           | 100.0          |
| No.4                           | 18.4                | 97.0           | 100.0           | 100.0          |
| No.8                           | 2.1                 | 70.3           | 100.0           | 100.0          |
| No.16                          | 0.0                 | 39.6           | 100.0           | 100.0          |
| No.30                          | 0.0                 | 24.6           | 100.0           | 98.9           |
| No.50                          | 0.0                 | 16.5           | 100.0           | 56.5           |
| No.100                         | 0.0                 | 11.2           | 100.0           | 18.2           |
| No.200                         | 0.0                 | 5.2            | 86.7            | 11.3           |

En atención al clima predominante en la zona, las solicitudes y comportamiento del tráfico de este proyecto, se seleccionó un cemento asfáltico convencional que cumple con las especificaciones de un asfalto grado PG 64V-22, de acuerdo a la norma N·CMT·4·05·004/18 de la SCT.

La selección de la gradación de agregado del pétreo y el agente modificador (RAR), consta de la siguiente combinación para la mezcla SMA: 70% de material de tamaño nominal de 3/8" (sello), 21% de arena fina, 6% de filler (carbonato de calcio) y 3% de RAR. La granulometría de trabajo que complementa la proporción de la mezcla se muestra en la tabla 28 y figura 25.

*TABLA 28. Granulometría de trabajo de la mezcla SMA-RAR. Fuente: LASFALTO S. de R.L. de C.V.*

| ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA DE LA MEZCLA SMA-RAR |                |                                                 |                                           |                                           |
|------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Malla                                          |                | Tamaño nominal del agregado = 9.5 mm (3/8")     |                                           |                                           |
| Denominación                                   | Abertura en mm | Granulometría de trabajo (70-21-6-3) % que pasa | Límite granulométrico superior % que pasa | Límite granulométrico inferior % que pasa |
| 3/4                                            | 19.0           | 100.0                                           | 100                                       | 100                                       |
| 1/2                                            | 12.5           | 99.7                                            | 100                                       | 90                                        |
| 3/8                                            | 9.5            | 84.9                                            | 95                                        | 70                                        |
| No.4                                           | 4.75           | 42.3                                            | 50                                        | 30                                        |
| No.8                                           | 2.36           | 25.2                                            | 30                                        | 20                                        |
| No.16                                          | 1.18           | 17.3                                            | 21                                        | -                                         |
| No.30                                          | 0.60           | 14.1                                            | 18                                        | -                                         |
| No.50                                          | 0.30           | 11.2                                            | 15                                        | -                                         |
| No.100                                         | 0.15           | 8.9                                             | -                                         | -                                         |
| No.200                                         | 0.075          | 6.6                                             | 12                                        | 5                                         |

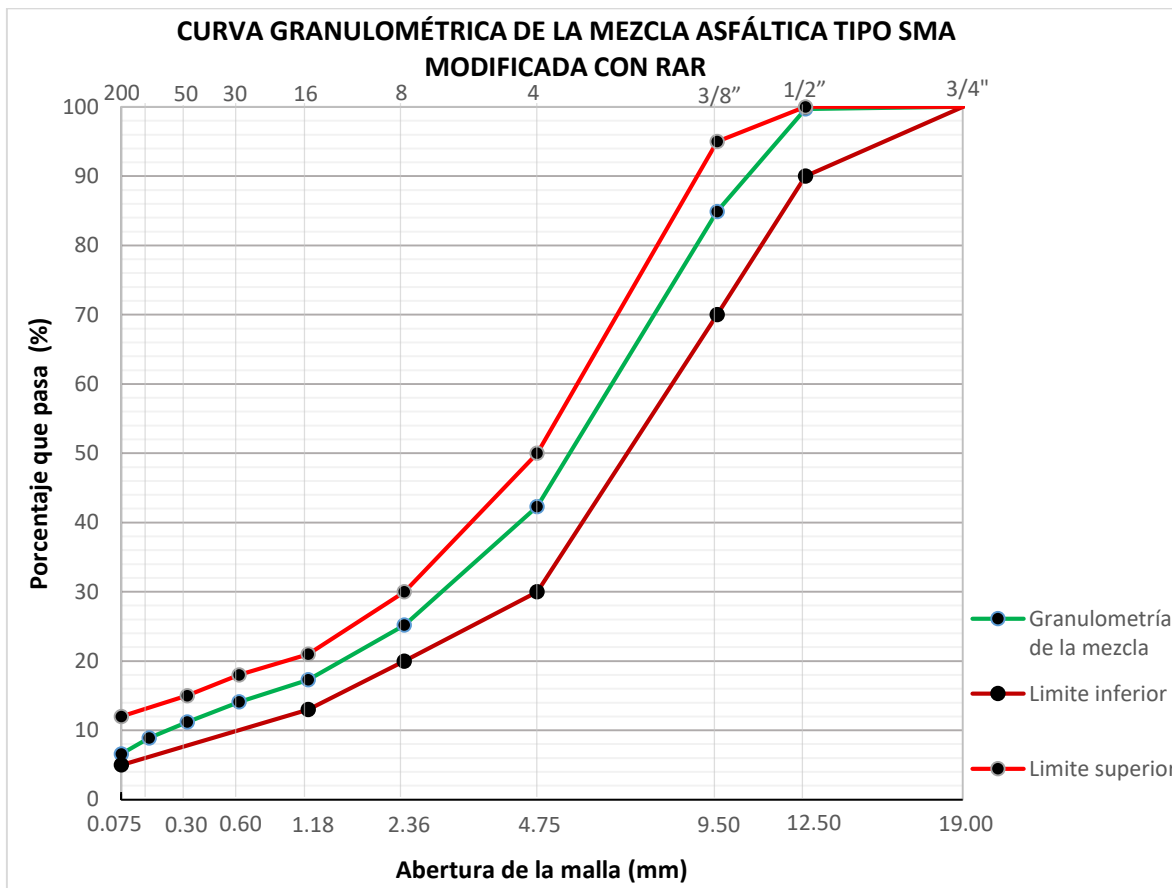


Figura 25. Curvas granulométricas de la mezcla SMA-RAR. Fuente: LASFALTO S. de R.L. de C.V., 2021.

#### 5.2.3.2 Caracterización y volumetría de las mezclas asfálticas

Como se mencionó en la sección 9.2.3 la estrategia constructiva implementada en este proyecto consistió en colocar una capa de rodadura en base a una mezcla SMA con adición de caucho reaccionado y activado, sobre una carpeta de mezcla densa que se encontraba agrietada y de esta manera buscar retardar la reflexión de fisuras en la última capa.

La caracterización de la mezcla asfáltica de granulometría densa, empleada inicialmente en el tramo y la mezcla asfáltica tipo SMA propuesta, se resumen en la tabla 29.

*TABLA 29. Características de las mezclas asfálticas. Fuente: LASFALTO S. de R.L. de C.V. y CONSTRUCTORA FELUXA S.A. DE C.V.*

| MEZCLA                                          | SMA RAR                                                                     | DENSA (MARSHALL)                                            |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>GRANULOMETRÍA DE TRABAJO</b>                 | 70% sello 3/8", 21% arena Fina, 6% Filler (Carbonato de calcio) y 3% de RAR | 50 % agregado grueso de 3/4" a No.4, 46 % arena, 4 % finos. |
| <b>ASFALTO</b>                                  | PG: 64V - 22                                                                | PG: 64V - 22                                                |
| <b>CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO (%)</b>          | 6.3 respecto a la masa de la mezcla                                         | 5.69 respecto a la masa de la mezcla                        |
| <b>CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO (%)</b>          | 6.7 respecto a la masa del agregado                                         | 6.03 respecto a la masa del agregado                        |
| <b>DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA (T/M3)</b>           | 2.281                                                                       | 2.405                                                       |
| <b>DENSIDAD DE MEZCLA COMPACTADA (T/M3)</b>     | 2.181                                                                       | 2.318                                                       |
| <b>% VACÍOS</b>                                 | 4.4                                                                         | 4.2                                                         |
| <b>% VAM</b>                                    | 20.6                                                                        | 17.02                                                       |
| <b>% VFA</b>                                    | 78.2                                                                        | 75.08                                                       |
| <b>% TSR</b>                                    | 85.0                                                                        | NA                                                          |
| <b>ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO (MM)</b> | 4.62                                                                        | NA                                                          |
| <b>ESTABILIDAD (KG)</b>                         | NA                                                                          | 1193                                                        |
| <b>FLUJO (MM)</b>                               | NA                                                                          | 3.10                                                        |

### 5.3 DESARROLLO DE PRUEBAS

Esta fase está orientada al monitoreo y ejecución de pruebas de desempeño de las mezclas y del pavimento en cada uno de los tramos de estudio. Las propiedades mecánicas evaluadas a las mezclas fabricadas en laboratorio fueron: susceptibilidad a la humedad y deformación permanente. La evaluación de los tramos se llevó a cabo mediante la obtención de los parámetros de auscultación empleados en México: Índice de Rugosidad Internacional (IRI), Profundidad de la Rodera (PR), Coeficiente de fricción (CF) y Profundidad media de la textura (PMT).

La susceptibilidad a la humedad (o daño por humedad) fue determinada por medio de lo especificado en la recomendación AMAAC RA-04/2010 “Resistencia de las mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad”, la cual dictamina dividir dos grupos de tres probetas cilíndricas equivalentes, esto es, con porcentaje de vacíos similares entre sí, los cuales deben ser igual a  $7 \pm 1 \%$ . Para obtener dicho porcentaje de vacíos, la recomendación especifica que la compactación sea mediante el compactador giratorio Superpave (en la figura 26 se ilustra el compactador giratorio utilizado en este ensayo). Adicionalmente la dimensión de los especímenes se establece de 150 mm de diámetro por  $95 \pm 5$  mm de altura, o 100 mm de diámetro por  $63.5 \pm 2.5$  mm de altura; cabe señalar que estas últimas dimensiones son las que se consideraron en este estudio. La parte esencial de este ensayo es que uno de los grupos se mantiene a temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$ , mientras que el otro grupo es sometido a una saturación en agua aplicando una presión de vacío de 13 a 70 kPa, para luego ser acondicionadas en un baño de agua a  $60^{\circ}\text{C}$  por un período de  $24 \pm 1$  hora. Luego ambos grupos de probetas son ensayados a tracción indirecta a  $25^{\circ}\text{C}$  por medio de la prensa “Marshall” y una mordaza Lottman. Finalmente se determina la resistencia conservada por medio de la siguiente ecuación:

$$TSR = \frac{Sta}{St} * 100$$

Donde TSR es la relación de resistencia a la tensión indirecta en %, Sta es la resistencia promedio a la tensión indirecta del subconjunto acondicionado en kPa y St es el promedio de la resistencia a la tensión indirecta del subconjunto acondicionado a temperatura ambiente, en kPa.



*Figura 26. Compactador Giratorio para la densificación de especímenes de prueba (propiedad de PEPSA). Fuente: Captura propia.*

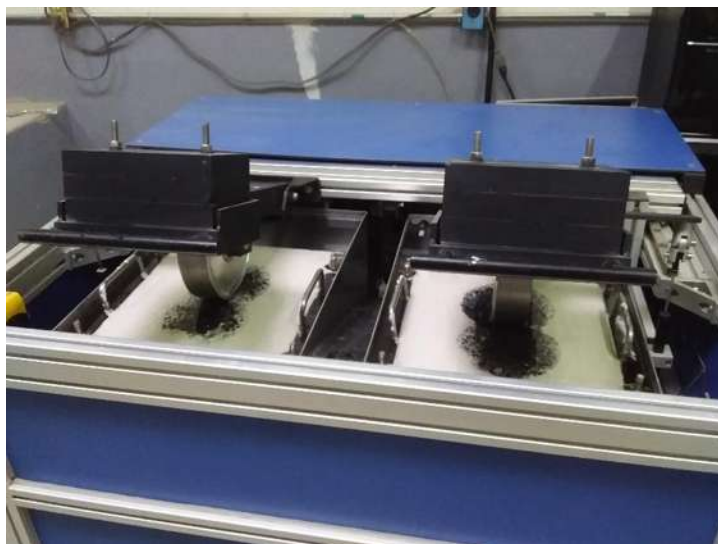
En la Figura 27 se muestra la prensa “Marshall” y la mordaza Lottman, elementos que forman parte del equipo usado en la ejecución de este ensayo.



*Figura 27. Prensa “Marshall” y una mordaza Lottman para el ensayo TSR (propiedad de PEPSA). Fuente: Captura propia.*

La deformación permanente fue evaluada a través de la recomendación AMAAC RA 01/2008 “Susceptibilidad a la Humedad y a la Deformación Permanente por Rodera de una mezcla asfáltica tendida y compactada, por medio del Analizador de la Rueda Cargada de Hamburgo (HWT)”. Este método describe un procedimiento para evaluar la deformación permanente y también el daño por humedad por medio de la adquisición de datos de ahuellamiento de la aplicación de una rueda cargada de 0,71kN (72 kg), sobre probetas acondicionadas en un baño de agua a 50°C por 20000 pasadas. Se requieren 4 especímenes cilíndricos por ensayo de 150 mm de diámetro o 2 losas de 320 mm de largo por 260 mm de ancho; en ambos casos el espesor del espécimen debe ser por lo menos el doble del tamaño nominal del agregado que generalmente va de 38 a 100 mm, así como un contenido de vacíos de  $7 \pm 0.5 \%$ .

La principal aplicación de esta prueba estriba en la identificación de mezclas asfálticas con estructuras débiles y susceptibles al desgranamiento. La figura 28 muestra el equipo empleado en esta prueba.

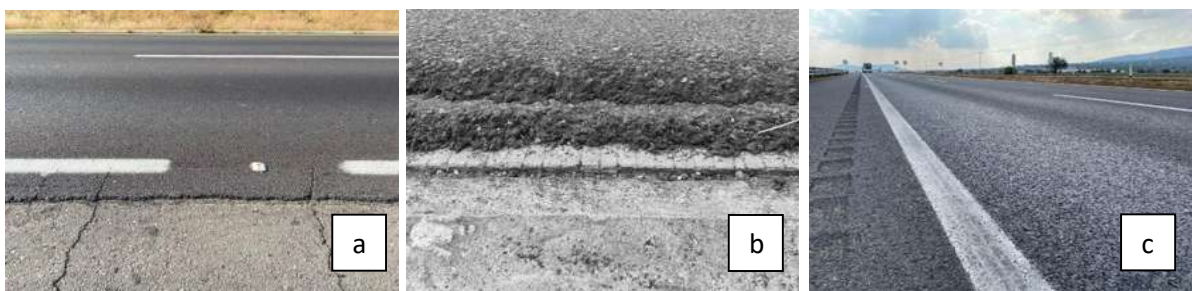


*Figura 28. Equipo Rueda Carga de Hamburgo (propiedad de PEPSA). Fuente: Captura propia.*

### 5.3.1 Pruebas realizadas en el tramo: Autopista Pirámides-Tulancingo

#### **Agrietamiento**

Con relación a la reflexión de fisuras en la capa de rodadura elaborada con mezcla de granulometría densa, colocada sobre losas de concreto agrietadas en el tramo Pirámides-Tulancingo, en la figura 29a se puede observar el comportamiento que había presentado. En referencia al mismo tramo, la figura 29b ilustra la estructuración con la mezcla Gap-RAR como capa de rodadura y finalmente, en la figura 29c se muestra la evidencia de que no se ha presentado reflexión de las grietas y juntas después de 4 años de operación.



*Figura 29. Evolución del tramo Pirámides-Tulancingo respecto al parámetro de*

### 5.3.2 Pruebas realizadas en el tramo: periférico de la ciudad de Morelia

#### **Coeficiente de Fricción**

Una vez construidas las secciones de los tramos, se realizó la prueba de obtención del Coeficiente de Fricción (CF); con base en el uso del equipo de rueda oblicua: Mu Meter, modelo MK6 (Figura 30), considerando como referencia la norma ASTM E 670- 94 (2000) “Standard Test for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter”, donde se establece la metodología a seguir, misma que consiste en remolcar el equipo a una

velocidad de 65 km/h sobre la superficie del pavimento, la cual será mojada por el sistema de riego del equipo, manteniendo un espesor de película de agua de 0.5 a 1 milímetro, donde se harán girar los neumáticos de prueba colocados a un ángulo de convergencia con respecto al eje longitudinal de 7.5 °.



Figura 30. Equipo de medición del CF, Mu meter (propiedad de PEPSA). Fuente: Captura propia.

### Profundidad Media de la Textura

Otro de los parámetros obtenidos fue la macrotextura, la cual se determinó en base a la medida de referencia conocida como Profundidad Media de la Textura (PMT), calculada como el cociente de un volumen dado de material estandarizado y el área que cubre dicho material al ser esparcido en forma circular sobre la superficie de prueba, de acuerdo a la norma N-CSV-CAR-1-03-006/16. En la figura 31.a y 31.b se ejemplifica visualmente este método.



Figura 31. Determinación de la PMT mediante el círculo de arena. Fuente: Captura propia.

El método para la obtención de la PMT se conoce como método volumétrico, es una medida tridimensional de la macrotextura y se expresa en milímetros (mm). Para su ejecución se tomó como referencia el manual M-MMP-4-07-009/16 de la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes. El intervalo de medición fue de doscientos metros (200 m).

### 5.3.3 Pruebas realizadas en el tramo: Autopista Pátzcuaro-Uruapan

#### Índice de Regularidad Internacional

Se efectuaron trabajos de regularidad superficial en ambos carriles del cuerpo A, del km 47+700 al 72+500, tramo del cual se tomó y analizó la información correspondiente al subtramo de estudio, es decir, del km 62+000 al 66+600, con un intervalo de medición de 100 m. El equipo utilizado en dichos trabajos fue de alto rendimiento, clasificado dentro de la categoría de perfilómetros inerciales, con referencia en la norma ASTM E 950.

El modelo empleado para el cálculo del IRI corresponde a un modelo matemático propuesto por el Banco Mundial, conocido como cuarto de carro, el cual calcula el movimiento vertical inducido por la rugosidad del camino, acumulado en la suspensión de un vehículo de pasajero típico, al recorrer una superficie del camino a una velocidad de 80 km/h; dicho sistema se representa en la Figura 30.

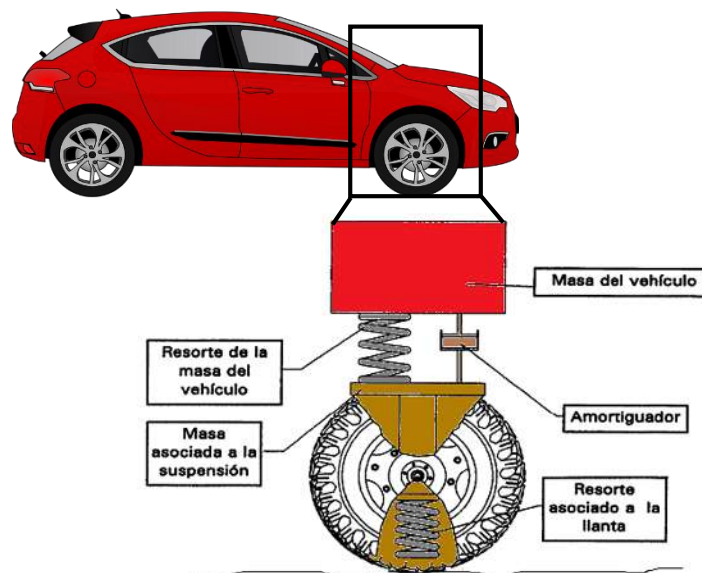


Figura 30. Representación del modelo de cuarto de carro

#### Profundidad de la Rodera

De manera simultánea a la medición del IRI, se efectuó evaluación de la Profundidad de Rodera (PR) mediante el perfilómetro de alto rendimiento, con el cual se determinó el perfil transversal de la superficie del pavimento del tramo de estudio, por medio de emisiones láser tipo barrido, con una densidad de aproximadamente 1000 puntos con elevaciones medidas.

Con los perfiles transversales medidos se alimentó el algoritmo de cálculo integrado al equipo para la obtención de la Profundidad de Rodera, en un intervalo de medición que corresponde a 100 metros. La referencia para este proceso fue el Manual: M-MMP-4-07-017, *Determinación del Perfil Transversal y Cálculo de la Profundidad de Roderas con Perfilómetro de Alto Rendimiento*.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta etapa se presenta la recopilación, interpretación, análisis y comparación de los datos obtenidos en cada tramo de prueba. Esto marcará la pauta a la elaboración de conclusiones que a su vez darán paso a la validación o rechazo de la hipótesis establecida en esta investigación.

### 6.1 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS EVALUADAS

#### Susceptibilidad a la humedad

La Tabla 30 muestra cada una de las mezclas evaluadas de los tramos: Periférico de Morelia y autopista Pátzcuaro-Uruapan; en ambos casos se cumple con el valor mínimo de TSR (80%) establecido en la recomendación AMAAC RA-04/2010, sin embargo, los valores promedio de resistencia a tracción indirecta de los núcleos extraídos en los tramos, son considerablemente menores con respecto a los mismos tipos de mezclas compactadas en laboratorio, mismas que como podría esperarse presentan un mayor grado de compactación, tal como lo manifiestan los valores de la densidad de la muestra compacta. En cuanto a los valores de resistencia a tracción indirecta en condición húmeda y seca, para las mezclas densificadas en el compactador giratorio, resultaron con una variabilidad baja, lo cual se traduce en valores de TSR similares.

*TABLA 30. Resultados de la susceptibilidad a la humedad (mediante relación de TSR) de las mezclas evaluadas*

| Parámetro \ Tipo de Mezcla            | SMA <sub>1</sub> -RAR<br>(Compactada en laboratorio) | MACDNII<br>(Compactada en laboratorio) | SMA <sub>2</sub> -RAR<br>(Compactada en laboratorio) | MACDNII<br>(Núcleos de campo) | SMA <sub>2</sub> -RAR<br>(Núcleos de campo 13/03/2021) | SMA <sub>2</sub> -RAR<br>(Núcleos de campo 26/11/2021) |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Sta (kPa)                             | 689.75                                               | 604.21                                 | 563.10                                               | 189.37                        | 536.7                                                  | 306.80                                                 |
| St (kPa)                              | 762.97                                               | 700.60                                 | 623.49                                               | 223.07                        | 633.9                                                  | 397.13                                                 |
| TSR (%)                               | 92.31                                                | 86.2                                   | 90.3                                                 | 84.89                         | 84.67                                                  | 81.12                                                  |
| Densidad compacta (t/m <sup>3</sup> ) | 2.201                                                | 2.254                                  | 2.185                                                | 2.196                         | 2.180                                                  | 2.093                                                  |

## Deformación permanente

La Tabla 31 muestra los resultados de deformación plástica o ahuellamiento de las mezclas de los tramos: Periférico de Morelia y autopista Pátzcuaro-Uruapan. Se observa que las mezclas compactadas en laboratorio tuvieron deformaciones bajas, mostrando el mejor desempeño las que cuentan con adición de RAR. Las mezclas compactadas en campo presentan una amplia variación de los resultados, siendo las mezclas con caucho las únicas que mostraron una deformación por debajo de 10 milímetros (mm), con excepción en los núcleos del tramo Pátzcuaro-Uruapan, probados con fecha de 26 de noviembre, los cuales presentaron una densidad muy baja respecto al valor obtenido en diseño.

*TABLA 30. Resultados de deformación por medio del ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo*

| Tipo de Mezcla                        | SMA <sub>1</sub> -RAR<br>(Compactada en laboratorio) | MACDNII<br>(Compactada en laboratorio) | SMA <sub>2</sub> -RAR<br>(Compactada en laboratorio) | SMA <sub>1</sub> -RAR<br>(Núcleos de campo) | MACDNII<br>(Núcleos de campo) | SMA <sub>2</sub> -RAR<br>(Núcleos de campo 13/03/2021) | SMA <sub>2</sub> -RAR<br>(Núcleos de campo 26/11/2021) |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Parámetro                             |                                                      |                                        |                                                      |                                             |                               |                                                        |                                                        |
| Deformación (mm)                      | 4.7                                                  | 6.1                                    | 4.2                                                  | 9.76                                        | 16.42                         | 4.2                                                    | 40.5                                                   |
| Densidad compacta (t/m <sup>3</sup> ) | 2.207                                                | 2.219                                  | 2.181                                                | 2.135                                       | 2.196                         | 2.180                                                  | 2.093                                                  |

## 6.2 RESULTADOS DE DESEMPEÑO DEL TRAMO CARRETERO DEL PERIFÉRICO DE LA CIUDAD DE MORELIA

### Coefficiente de fricción

Los resultados obtenidos del CF representativos de los tramos con mezcla asfáltica de granulometría discontinua tipo SMA, con adición de caucho reaccionado y activado (SMA<sub>1</sub>-RAR), así como las secciones con mezcla asfáltica de granulometría densa diseñada con el nivel II del protocolo AMAAC (MACDNII), se muestran en las figuras 31, 32 y 33; así como el umbral de aceptación del CF establecido en la norma mexicana N-CSV-CAR-1-03-007/17, el cual va de 0.41 a 0.60 para una condición regular y de 0.61 a 0.90 para una condición buena de la red carretera secundaria.

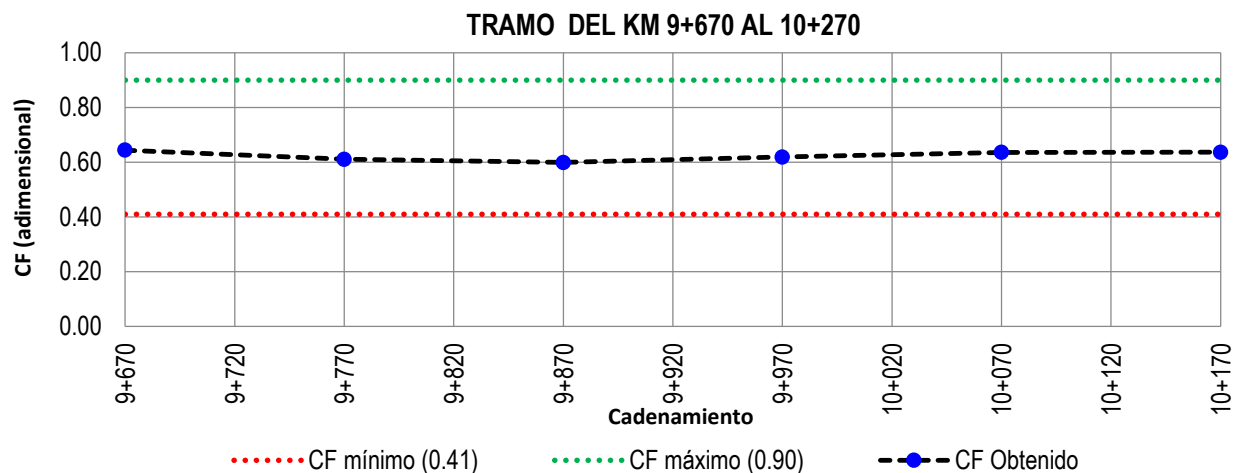


Figura 31. CF de la mezcla SMA1-RAR, tramo 2, en Periférico de Morelia.

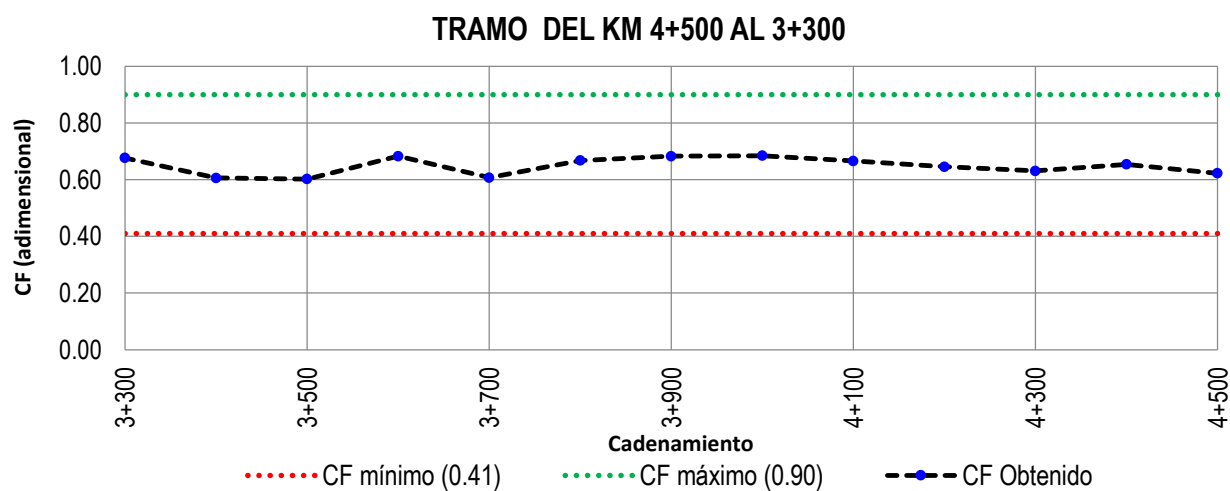


Figura 32. CF de la mezcla SMA1-RAR, tramo 1, en Periférico de Morelia.

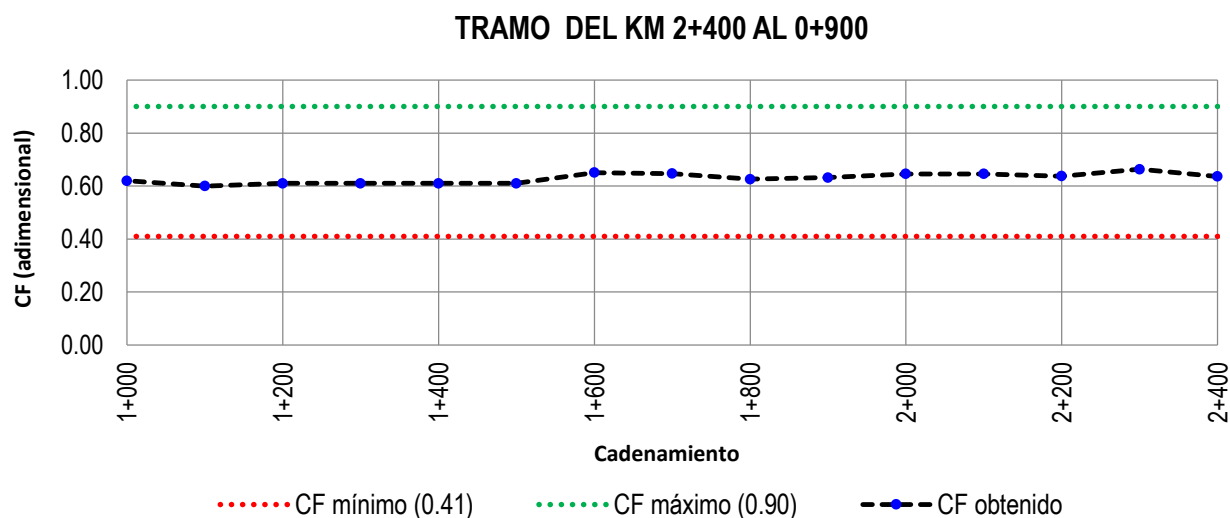


Figura 33. CF de la MACDNII del tramo Periférico de Morelia.

En referencia a los datos resultantes, se observa que ambos tramos están dentro del umbral de aceptación, aunque la mezcla SMA1-RAR es la que presenta un mejor comportamiento, ya que, aunque las variaciones en el CF del tramo con MACDNII son menores, su línea de tendencia se acerca más al valor mínimo aceptable de CF.

**Profundidad Media de la Textura**

Los resultados representativos de la PMT obtenida en el Periférico de Morelia, en los tramos con mezcla SMA1-RAR y el correspondiente a la MACDNII, se muestran en las figuras designadas con el numeral que va del 34 al 39 respectivamente; así como el umbral de aceptación de la PMT establecido en la norma mexicana N-CSV-CAR-1-03-006/16, el cual va de 0.65 a 0.80 mm para un estado calificado como regular, mientras que mayor a 0.80 mm corresponde a un estado bueno de la red carretera secundaria. Se presentan valores medidos en dos fechas: el 02 de febrero de 2022 y el 21 de mayo de 2023, lo anterior con el objetivo de observar la evolución de cada uno de los subtramos.

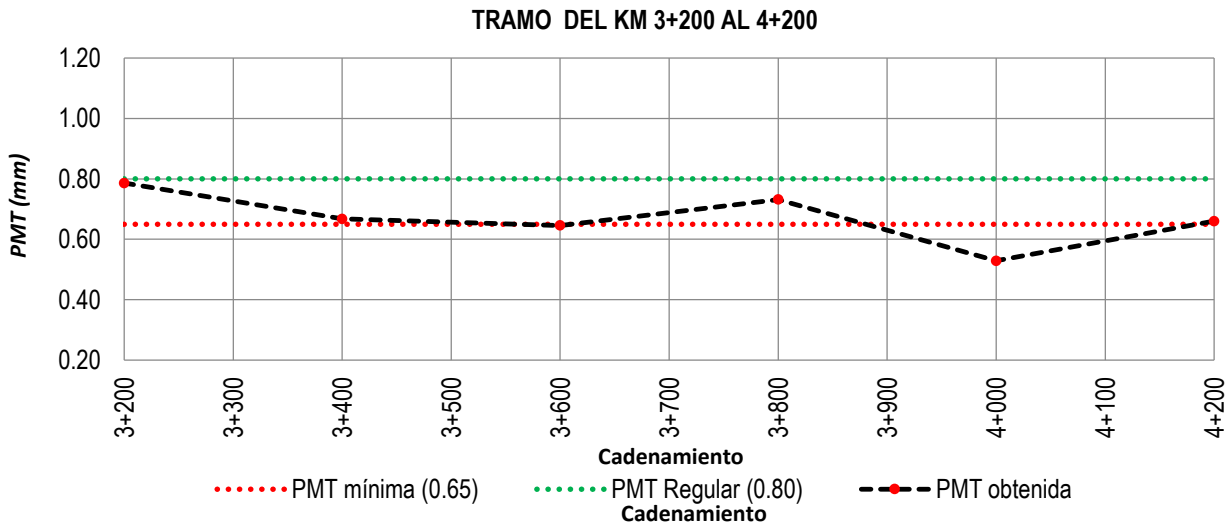


Figura 34. PMT de la Mezcla SMA1-RAR del tramo 1, en Periférico de Morelia (02-02-2022)

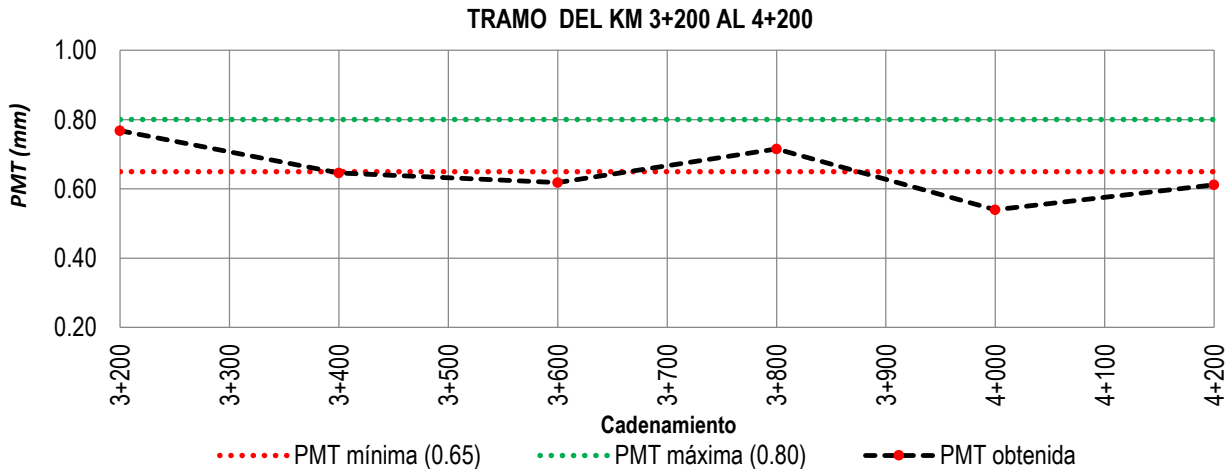
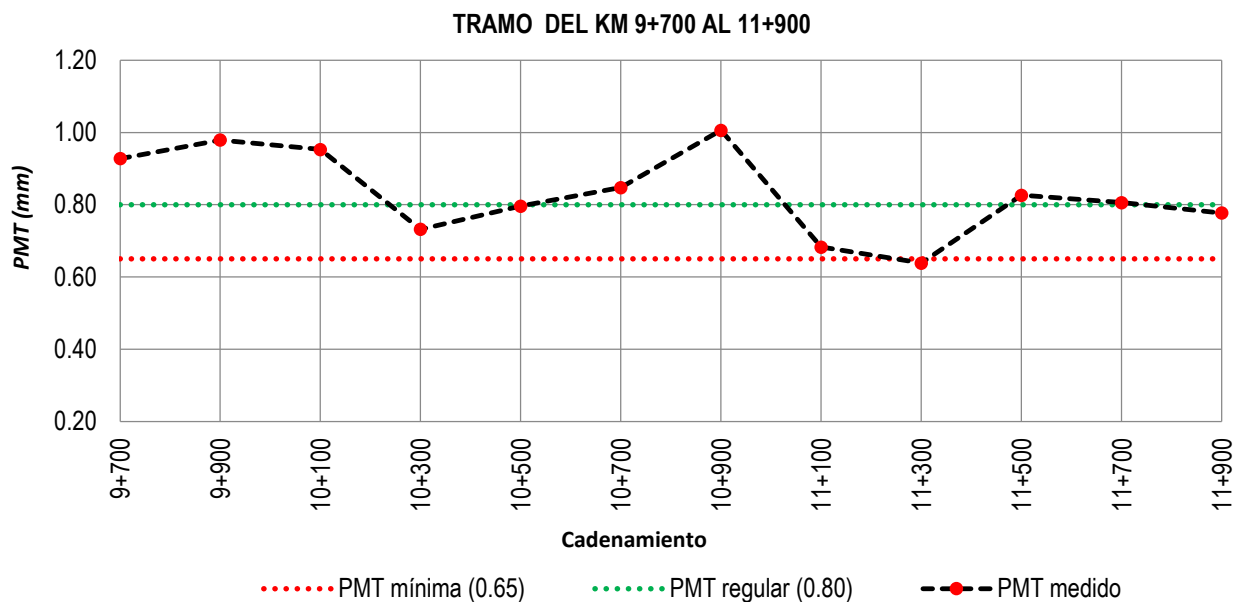
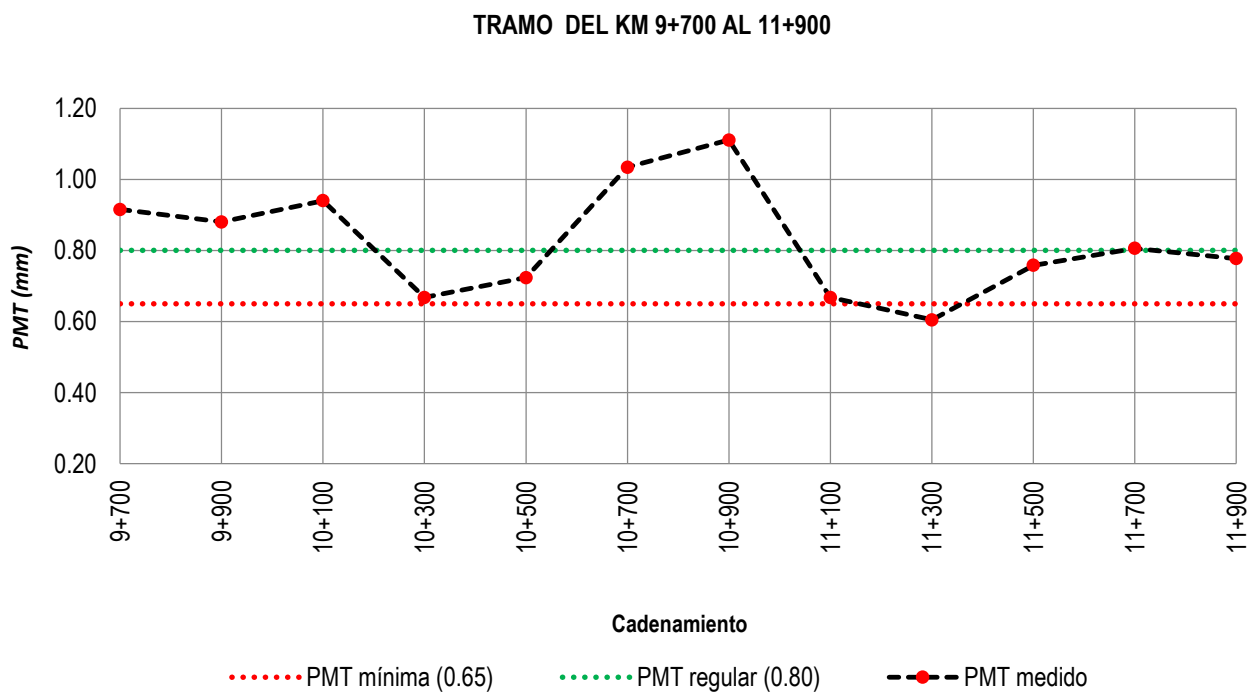


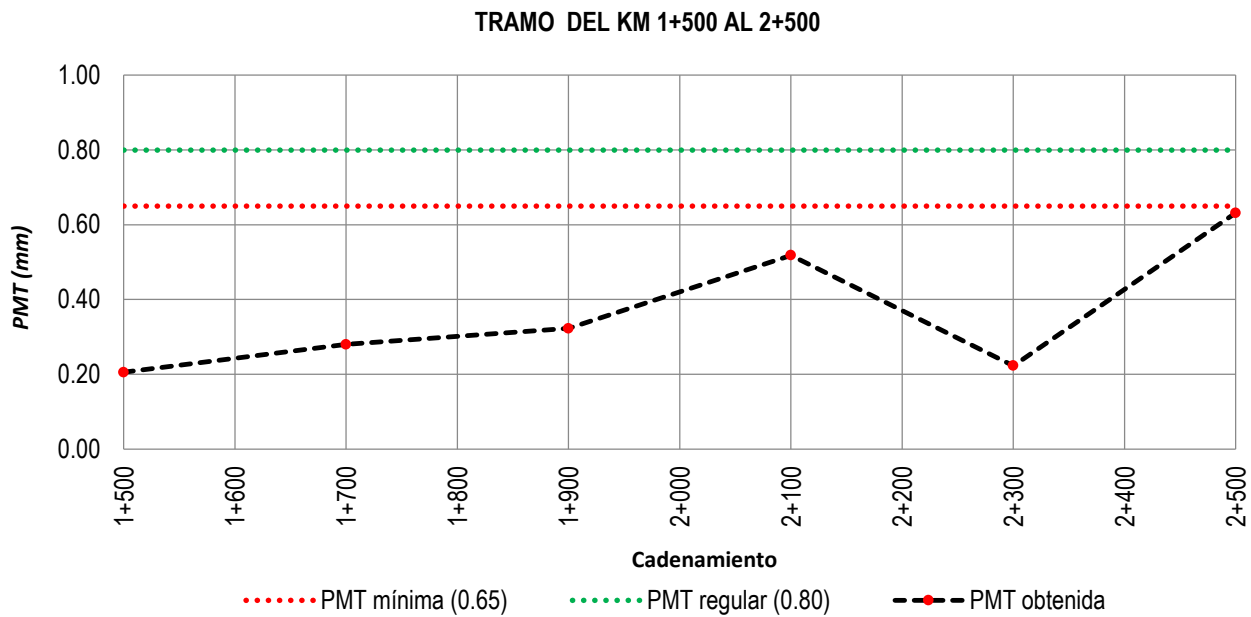
Figura 35. PMT de la Mezcla SMA1-RAR del tramo 1, en Periférico de Morelia (21-05-2023)



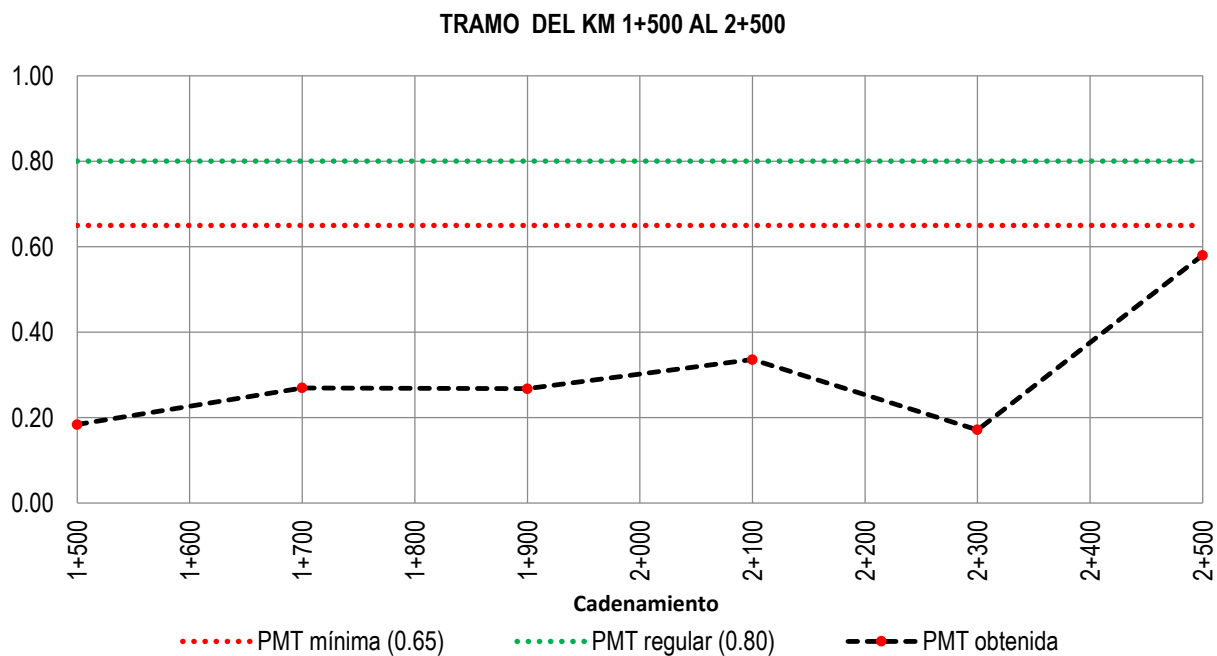
*Figura 36. PMT de la Mezcla SMA1-RAR del tramo 2, en Periférico de Morelia  
(02-02-2022)*



*Figura 37. PMT de la Mezcla SMA1-RAR del tramo 2, en Periférico de Morelia  
(21-05-2023)*



*Figura 38. PMT de la MACDNII del tramo Periférico de Morelia (02-02-2022).*



*Figura 39. PMT de la MACDNII del tramo Periférico de Morelia (21-05-2023)*

Con referencia a los resultados de PMT obtenidos al 02 de febrero de 2022, se puede establecer que el tramo con la mezcla SMA1-RAR tiene el mejor comportamiento, ya que, solo uno dos de los puntos evaluados se salen del umbral de aceptación: con valor de 0.64 mm en el cadenamiento 11+300 y 0.53 mm en el km 4+000; mientras que en el tramo con la MACDNII todos los puntos medidos resultaron estar fuera de dicho umbral, lo anterior del cadenamiento 1+500 al 2+500.

Adicionalmente y después de analizar los valores de PMT medidos al 21 de mayo de 2023, se observa una tendencia similar de los resultados obtenidos en la fecha del 02 de febrero de 2022, con ligeras diferencias, sin embargo, los mayores diferenciales se presentaron en el tramo con MACDNII, ya que pasó de tener un promedio de PMT de 0.36 a 0.30 mm, mientras que los dos subtramos con SMA1-RAR pasaron de 0.67 y 0.83 a 0.65 y 0.82 mm promedio de PMT.

### 6.3 RESULTADOS DE DESEMPEÑO DEL TRAMO: AUTOPISTA PÁTZCUARO-URUAPAN

#### **Índice de regularidad internacional**

En las figuras 40 y 41 se expone el índice estandarizado reconocido internacionalmente para medir la regularidad superficial (IRI) que corresponde al subtramo de estudio, del km 61+900 al 66+700, cuerpo A, carril de baja velocidad en la autopista Pátzcuaro-Uruapan; el gráfico de la figura 40 pertenece a la mezcla SMA<sub>2</sub>-RAR, mientras que el tramo con la mezcla densa se visualiza en la figura 41.

De acuerdo a la tipología de la carretera de este estudio (Autopista de cuota), el estado físico del pavimento se considera bueno para un valor de IRI menor a 1.8, regular o aceptable para un valor comprendido entre 1.8 y 2.5; mientras que un resultado mayor a 2.5 equivale a un estado físico no satisfactorio para la óptima circulación del usuario. El intervalo de medición seleccionado en este análisis es de 100 m.

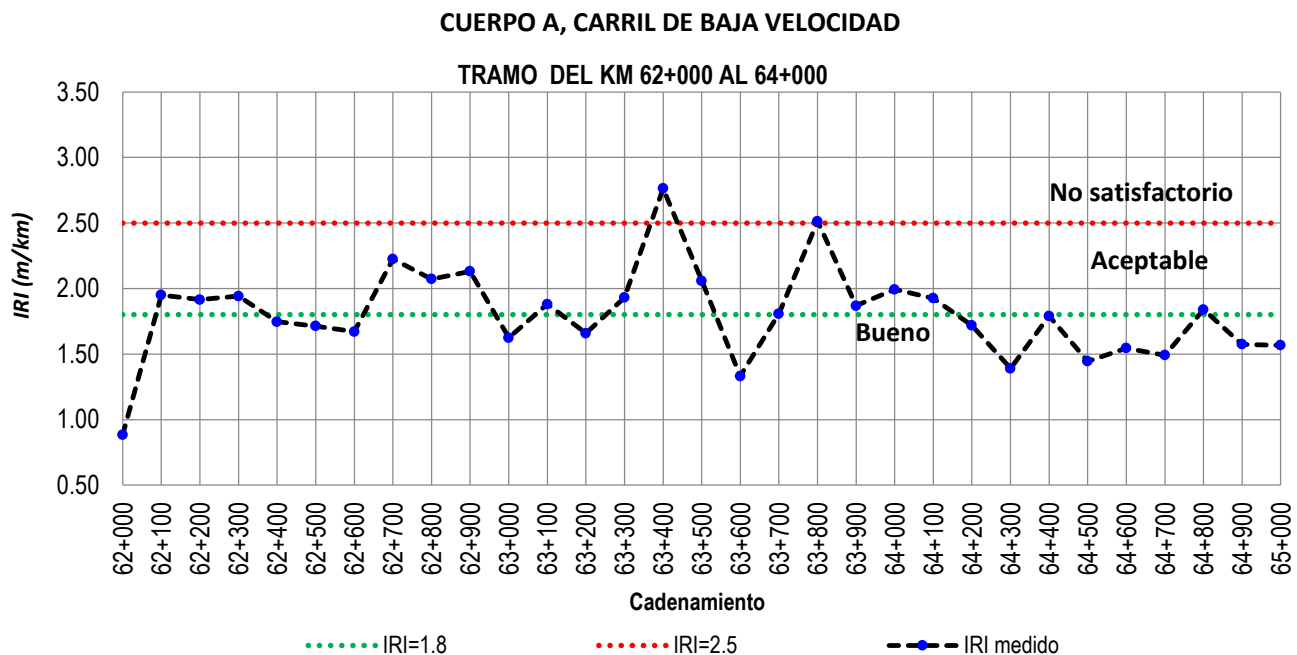


Figura 40. IRI de la Mezcla SMA<sub>2</sub>-RAR del tramo Pátzcuaro-Uruapan. Fuente: Elaboración propia

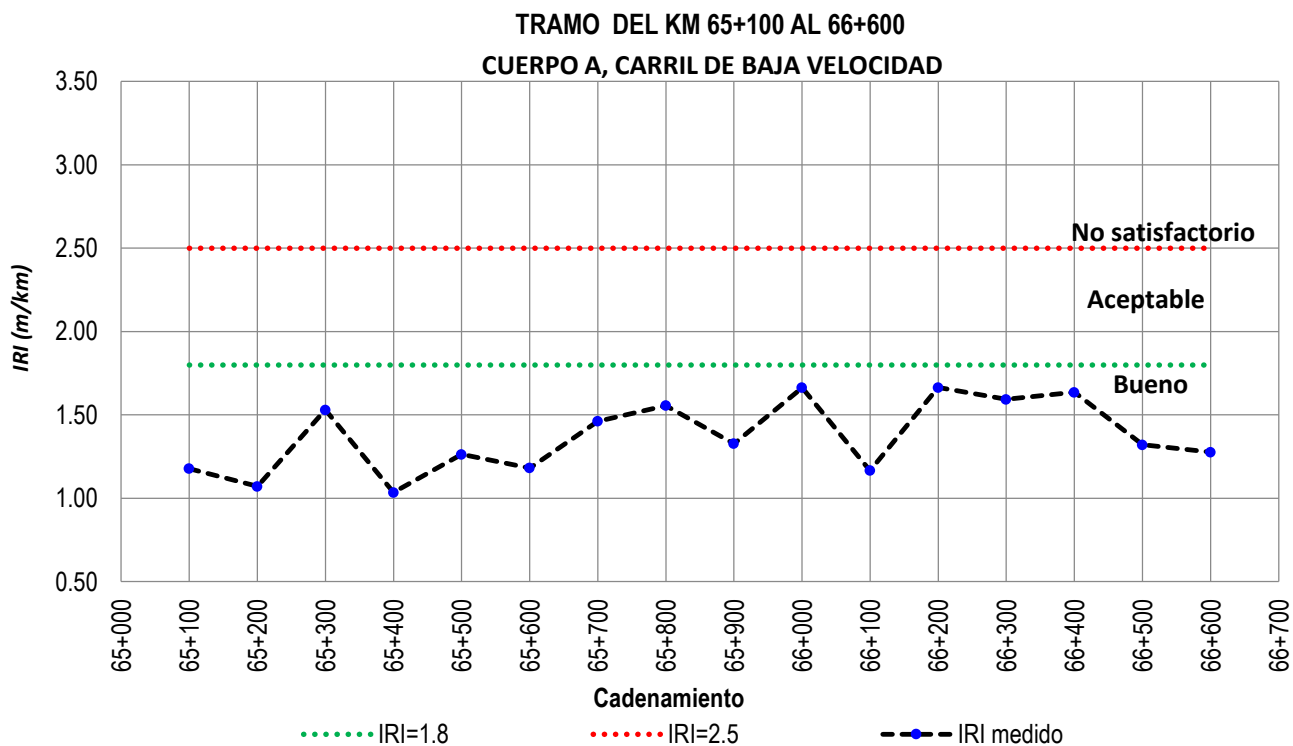


Figura 41. IRI de la Mezcla Densa del tramo Pátzcuaro-Uruapan. Fuente: Elaboración propia.

Con atención en los datos resultantes de IRI, se puede visualizar y dictaminar que el tramo con la mezcla SMA<sub>2</sub>-RAR tiene peor comportamiento que el tramo con mezcla densa, ya que, poco después de que se efectuó la propuesta de la capa de rodadura con la mezcla SMA, en el tramo de prueba y aun sin la puesta en servicio del mismo, se detectaron una serie de deterioros tales como: agrietamiento longitudinal, peladuras y desprendimientos; lo anterior derivado de desviaciones y malas prácticas dentro del proceso constructivo. Una vez que el tramo se abrió al tráfico, dichas afectaciones se vieron acrecentadas.

### Profundidad de Rodera

En las figuras 42 y 43 se muestran los datos de la Profundidad de Rodera (PR) medida en el mismo subtramo de estudio, del km 62+000 al 67+100, cuerpo A, carril de baja velocidad en la autopista Pátzcuaro-Uruapan; el tramo con la mezcla SMA<sub>2</sub>-RAR corresponde a la figura 42, mientras que el tramo con la mezcla densa se representa mediante la figura número 43.

La clasificación del estado físico del pavimento en función de la profundidad de rodadura medida y de acuerdo a la tipología de la carretera de este estudio (Autopista de cuota), se considera bueno para un valor de PR menor a 5 mm, regular o aceptable para un valor comprendido entre 5.1 y 8 mm; mientras que un resultado mayor a 8 mm equivale a un estado físico no satisfactorio o malo para la óptima circulación del usuario. El intervalo de medición seleccionado en este análisis es de 100 m.

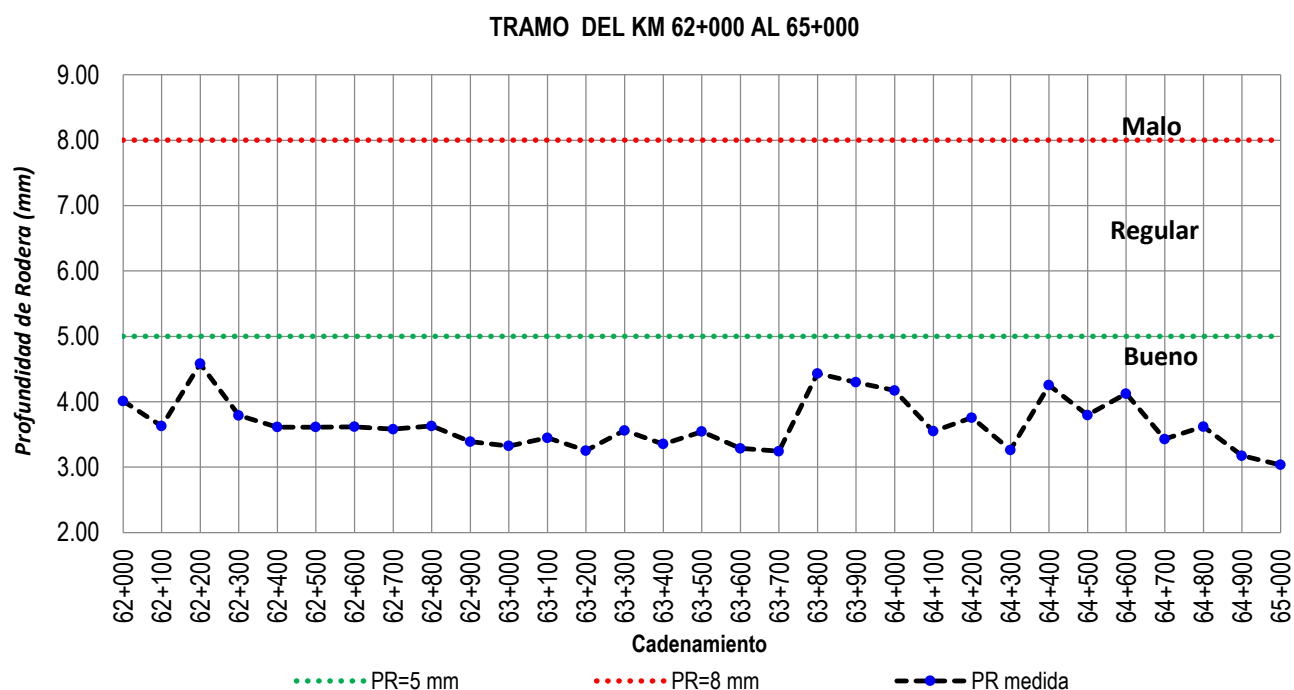
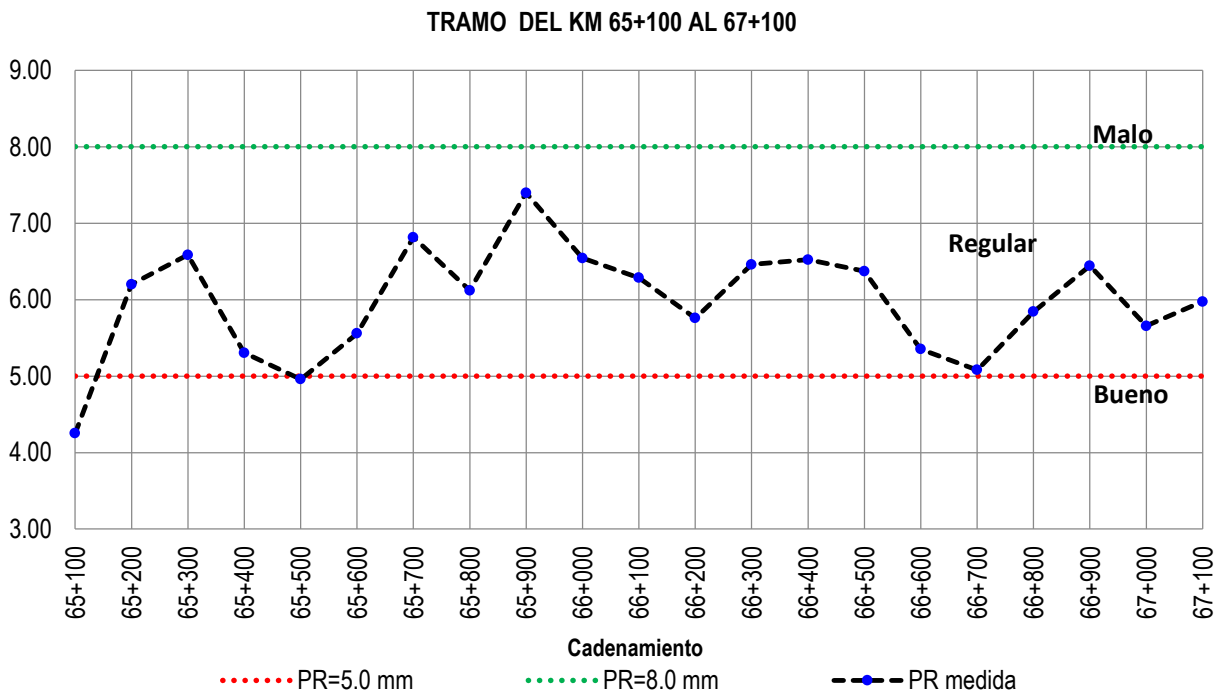


Figura 42. Profundidad de rodadura de la mezcla SMA<sub>2</sub>-RAR del tramo Pátzcuaro-Uruapan. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 43. Profundidad de rodera de la mezcla densa del tramo Pátzcuaro-Uruapan. Fuente: Elaboración propia.*

De acuerdo a las figuras 39 y 40 se aprecia una diferencia marcada en los valores de profundidad de rodera resultantes en el tramo con la mezcla SMA<sub>2</sub>-RAR y en el tramo con la mezcla densa; es evidente que el tramo con la primera mezcla tiene mejor comportamiento que el tramo con mezcla densa, ya que, la totalidad de los puntos evaluados en la carpeta con la mezcla SMA<sub>2</sub>-RAR resultaron por debajo de 5 mm, que corresponde a un estado bueno, mientras que de los puntos medidos en la carpeta con la mezcla densa solo dos están dentro del estado bueno, el resto de los valores obtenidos corresponde a la clasificación de estado regular.

## 7. CONCLUSIONES

Es importante señalar que los resultados de esta investigación se obtuvieron gracias a las campañas experimentales realizadas en colaboración con entes externos como Pruebas, Ensayos y Proyectos S.A de C.V. (Morelia, Michoacán), Neotech Asphalt S.A.P.I. de C.V. (Irapuato, Guanajuato), así como la concesionaria Autopistas Michoacán S.A de C.V.

La campaña experimental se llevó a cabo en dos tramos con mezclas fabricadas con y sin la adición del agente modificador RAR, con el propósito de comparar los resultados y determinar los beneficios que presentan unas sobre otras.

Con base en los resultados obtenidos bajo las condiciones experimentales de cada ensayo, llevan a las siguientes conclusiones:

- En cuanto a la modificación de mezclas asfálticas con caucho se tiene la norma N·CMT·4·05·002/06, donde se establecen los requisitos de calidad para los cementos asfálticos modificados con hule de llanta, sin embargo, no existe una normativa asociada a la modificación de mezclas mediante el proceso RAR.
- El agrietamiento por fatiga y la deformación permanente son los principales procesos de deterioro de un pavimento flexible en el país, por lo que es necesario considerar nuevas metodologías de modificación de mezclas asfálticas que produzcan mejores desempeños frente a estos deterioros.
- Una de estas nuevas tecnologías de modificación es el método RAR, técnica que hoy en día recién comienza a tener sus primeras aplicaciones en México, por lo que resulta interesante efectuar un análisis técnico que permita comprobar las mejoras que esta promueve en una mezcla asfáltica y que mejor manera que hacerlo mediante la obtención de parámetros de desempeño de un pavimento.
- A través del análisis de los resultados de la susceptibilidad a la humedad por medio de la relación TSR del Periférico de Morelia y autopista Pátzcuaro-Uruapan, se comprobó que cada una de las mezclas evaluadas cumplen con el valor mínimo de TSR (80%) establecido en la recomendación AMAAC RA-04/2010, sin embargo, los valores promedio en la resistencia a tracción indirecta en la condición húmeda y seca de los núcleos extraídos en los tramos, son considerablemente menores con respecto a los mismos tipos de mezclas compactadas en laboratorio, lo que cual se atribuye a porcentajes de vacíos inferiores en estas últimas. En cuanto a las resistencias a la tracción indirecta en las mezclas con y sin la adición de RAR, no se observó una diferencia notable; por lo que se asume que el nivel de densificación es el parámetro preponderante en esta prueba.

- Para el ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente de los tramos del Periférico de Morelia y autopista Pátzcuaro-Uruapan, se dedujo la influencia positiva que genera la adición de RAR en la mezcla, dada la mejora en la resistencia al ahuellamiento en las mezclas con este aditivo. Lo anterior es válido para niveles de compactación óptimos, es decir, para mezclas que presenten porcentajes de vacíos cercanos a los de diseño.
- Referente a los deterioros que se presentaron de manera prematura en el tramo de la autopista Pátzcuaro-Uruapan, rehabilitado con la mezcla SMA<sub>2</sub>-RAR, se detectaron varias causas que propiciaron dicha problemática, entre las que se encuentran:
  - Modificación en las propiedades físicas, mecánicas y químicas del agregado, una de las propiedades que más relevancia tuvo fue la Adherencia con el asfalto; se efectuaron varias pruebas de desprendimiento (asfalto-agregado) por ebullición (ASTM D – 3625) en agregados recuperados en tramo, donde se obtuvieron resultados promedio de 75 % de recubrimiento de la partícula, siendo 97 % el porcentaje de recubrimiento evaluado en el agregado de la mezcla de diseño. El origen de este problema se atribuye al cambio de banco de agregados o uso de una beta con inferior calidad de roca dentro del proceso de la producción de la mezcla asfáltica.
  - Humedad presente el proceso de almacenaje del caucho (RAR-X) o taponamiento de la tolva de caucho, ya que, además del desprendimiento de agregados, se observaron diversos grumos de caucho sobre la superficie del tramo.
  - Porcentaje de compactación insuficiente. Después de que se extrajeron núcleos en las zonas del tramo con mayor deterioro visible, se evaluaron las propiedades volumétricas de los especímenes extraídos, obteniendo un valor promedio de 9.5 % de vacíos, lo cual representa poco más del doble del valor de vacíos de diseño, mismo que es del 4 %. Esta problemática se atribuyó a un número insuficiente de pasadas con los equipos de compactación y a temperaturas de compactación inferiores a los 160°C, este último punto es de vital importancia, experimentalmente bajo condiciones de laboratorio se comprobó que las temperaturas óptimas de compactación de mezclas con adición de RAR, fluctúan en un rango que va de los 160 a 170 °C.

- Respecto a los resultados de coeficiente de fricción y macrotextura obtenidos en la primera campaña de medición (02-02-2022) en el Periférico de Morelia, el mejor desempeño se obtuvo en los tramos donde se colocó la mezcla asfáltica con adición de RAR, sobre todo en el parámetro de la profundidad media de la textura; sin embargo, lo anterior se atribuyó en ese momento al tipo de granulometría de la mezcla empleada en los tramos, más que a la presencia del agente modificador.
- Con los resultados de PMT obtenidos de los subtramos del Periférico de Morelia en una segunda medición realizada el 21 de mayo del 2023, se pudo observar la evolución de cada una de las mezclas, teniendo de manera general en todos los tramos una ligera reducción de la PMT, no obstante, el mejor comportamiento lo tuvo la mezcla SMA<sub>1</sub>-RAR pasando de 0.67 y 0.83 mm de PMT promedio de cada tramo a 0.65 y 0.82 mm respectivamente; mientras que la mezcla MACDNII pasó de un valor promedio de 0.36 a 0.30 mm.

## 8. REFERENCIAS

- Asphalt Institute. (1983). *Principles of Construction of Hot Mix Asphalt Pavements*. Manual Series N°22.
- Angulo, R., & Duarte, J. (2005). *MODIFICACIÓN DE UN ASFALTO CON CAUCHO RECICLADO DE LLANTA PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS*. Bucaramanga: Tesis, Universidad Industrial de Santander.
- Asphalt Institute. (1993). Superpave, Performace graded asphalt binder specifications and testing superpave. *Asphalt Magazine*, 1.
- AASHTO. (2003). AASHTO T 283. *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*.
- AASHTO. (2007). AASHTO T 320-07. *Standard Method of Test for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Tester (SST)*
- AASHTO. (2009). AASHTO T 209. THEORETICAL MAXIMUM SPECIFIC GRAVITY (Gmm) AND DENSITY OF ASPHALT MIXTURES
- AASHTO. (2013). AASHTO M 323-13. *Superpave Volumetric Mix Design*.
- ASTM. (1989). ASTM D1559. *RESISTANCE TO PLASTIC FLOW OF BITUMINOUS MIXTURES USING MARSHALL APPARATUS*.
- ASTM. (2003). ASTM D6433. *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*.
- ASTM. (2007). ASTM D1188. *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples*.
- ASTM. (2011). *ASTM International Standars Worldwide*, ol. 04.03. *Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems*.
- ASTM. (2017). *ASTM D6931-17, Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures*.
- Ayala del Toro, Y., Delgado, H., Cuellar, V., & Salazar, A. (2019). *MANUAL DE ENSAYOS PARA LABORATORIO: AGREGADOS (AG) PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Querétaro: Sanfandila.
- Bocanegra, D. (2019). *Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas modificadas con hule molido devulcanizado*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro. Tesis de grado de Mestría.
- Brown, E., Kandhal, P., & Zhang, J. (2001). *Performance Testing for Hot Mix Asphalt*. Alabama: National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 01-05, Auburn University.
- Carreño, R., & Reyes, J. (2015). *ESTUDIO DEL EFECTO DE ADITIVOS REDUCTORES DE TEMPERATURAS DE TRABAJO, EN EL DESEMPEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS GAP-*

*GRADED ELABORADAS CON ASFALTOS MODIFICADOS CON GRANO DE CAUCHO  
RECICLADO.* Bogotá.

- Cepeda, J. (2002). *Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis doctoral.
- Chávez, F. (2018). *Comparación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con caucho producidas mediante el proceso húmedo, seco y semi-húmedo*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Tesina de investigación.
- Delgadillo, R. (2014). *Apuntes de clase CIV-369*. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Díaz, C., & Castro, L. (2017). *IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA MEJORAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ*. Bogotá, Colombia: UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil.
- FHWA. (1997). *Hot Mix Bituminous Manual*. Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Engineering, Highway Operations Division Materials Group.
- Garnica, P., Gómez, J., & Delgado, H. (2003). *ALGUNOS ASPECTOS DE LA DENSIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EL COMPACTADOR GIRATORIO*. IMT. Queretaro: Sanfandila.
- Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., Delgado, H., et al. (2004). *ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. IMT. Queretaro: Sanfandila.
- Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., Delgado, H., et al. (2004). *ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE MÉTODO DE COMPACTACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. IMT. Queretaro: Sanfandila.
- Garnica, P., Delgado, H. & Sandoval, D. (2005). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS MARSHALL Y SUPERPAVE PARA COMPACTACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. IMT. Queretaro: Sanfandila.
- Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., & Delgado, H. (2005). *CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. IMT. Queretaro: Sanfandila.
- INN. (2012). *Polvo de caucho proveniente de Neumáticos Fuera de Uso*. Santiago, Chile.: INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN.
- Kandhal, S., & Cooley, L. (2002). *Evaluation of Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Using Loaded Wheel Tester*. Alabama: NCAT Report No 2002-08.
- Lei, Z., & Levinson, D. (2007). The Economics of Transportation Network Growth. En P. Coto-Millán, & V. Inglada, *Essays on Transport Economics* (págs. 317-339). Physica-Verlag Heidelberg.
- LEY DE CAMINOS, PUENTES Y AUTOTRANSPORTE FEDERAL. (2014). *artículo 6*.

LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS. (2014). *Artículos: 19, 28 y 98*

López, T., & Miró, R. (2015). EL ENVEJECIMIENTO EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS. *Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC)*, 10.

Memon, N. (2011). *Characterisation of conventional and chemically dispersed crumb rubber modified bitumen and mixtures*. Nottingham, UK.: University of Nottingham. PhD thesis.

Mendoza, A., Abarca, E., & Saucedo, M. (2011). *Prácticas para evaluar la calidad de infraestructura carretera de cuota*. Querétaro: Sanfandila. Publicación Técnica No. 353. IMT.

MINAYA, S., & ORDOÑEZ, A. (2014). Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. 164-206.

Mirza, M., & Witczak, M. (1995). Development of a global aging system for short term and long term. *Asphalt Paving Technol*, 393-430.

Moreno, F., Rubio, M., & Martinez, M. (2012). The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage. *Construction and Building Materials*, 466-474.

NAPA. (2002). *Diseño y Fabricación de Mezclas SMA - Técnicas Prácticas*.

Ocampo, M., & Caisedo, B. y. (2015). Mezclas asfálticas mejoradas con caucho molido proveniente de llantas usadas. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

PANAGIOTIS, F. (2003). Crumb rubber-bitumen interactions: Cold-stage optical microscopy. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 419-426.

Petersen, J. (1984). Chemical composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability. *Transportation Research Board*, 13-30.

Ramírez, N. (2006). *Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco*. Santiago, Chile: Universidad de Chile. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil.

Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D., & Kennedy, T. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. Lanham, MD United States : National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.

Schilling, J. (2018). *MODIFICACIÓN CON CAUCHO RECICLADO DE NEUMÁTICO DE UN LIGANTE CA-24 Y CARACTERIZACIÓN MEDIANTE ENSAYOS DE DESEMPEÑO*. Valparaíso, Chile: UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA. Tesis de grado de licenciatura.

SCT. (2006). N-CMT-4-05-002/06. *CALIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS MODIFICADOS*. Mexico: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

SCT. (2008). N-CMT-4-05-003/08. *CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES*. Mexico: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

- SCT. (2016). N-CSV-CAR-1-03-006/16. *DETERMINACIÓN DE LA MACROTEXTURA (MAC)*. Mexico: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).
- SCT. (2017). N-CVS-CAR-1-03-007/17. *DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN (CF)*. Mexico: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).
- SCT. (2017). *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Norma N-CMT-4-04/17*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT. (2018). N-CMT-4-05-004/18. *Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- SCT. (2021). N-CSV-CAR-1-03-004/21. *DETERMINACIÓN DEL INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Smith, W., Hashemi, J., Cázares, G., & González, P. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México: McGraw-Hill.
- Sousa, J. B., Vorobiev, A., Rowe, G., & Ishai, I. (2013). Reacted and activated rubber: elastomeric asphalt extender. *Transportation Research Record*, 32-40.
- Sousa, J., Ishai, I., & Svehinsky, G. (2012). Flexural fatigue tests and predictions models-tools to investigate SMA mixes with new innovative binder stabilizers. *J.C. Pais*, 171-188.
- UNR. (2015). *AUSCULTACIÓN DE PAVIMENTOS*. Rosario, Argentina: UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO.
- Way, G. B. (2012). *Asphalt-Rubber 45 Years of Progress*. Asphalt Rubber. Recuperado el 15 de noviembre de 2020 de Proceedings asphalt rubber conference, Germany, 2012: [http://www.ra-foundation.org/wp-content/uploads/2013/02/002-PAP\\_015.pdf](http://www.ra-foundation.org/wp-content/uploads/2013/02/002-PAP_015.pdf)
- Werner, F. (2005). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIPO SMA*. Guatemala: UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR. Tesis de grado de licenciatura.
- Xiao, F., Amirkhanian, S. N., & Shen, J. (2009). *Effects of various long-term aging procedures on the rheological properties of laboratory prepared rubberized asphalt binders*. *Journal of Testing and Evaluation*, 37(4), 329-336.
- Zhaoxing Xie, Junan Shen, Performance properties of rubberized stone matrix asphalt mixtures produced through different processes, Volume 104, 1 February 2016, Pages 230–234.

## ANEXOS

### ANEXO A. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE CONSENSO Y ORIGEN

#### PRUEBAS DE CONSENSO

##### Angularidad del agregado fino.

Este método de ensayo cubre la determinación del contenido de vacíos no compactados en una muestra de agregado fino. El contenido de vacíos provee un indicio de la angularidad, esfericidad y textura del agregado fino, comparado con otros a los mismos tamaños.

Esta propiedad se puede entender como el volumen de vacíos de una columna de material fino de clasificación definida que es depositado en un contenedor cilíndrico desde una altura de  $115 \pm 2$  mm (Figura 1) especificada en el “Método de prueba para determinar el contenido de vacíos no compactados del agregado fino”, del Manual del IMT de Ensayos para Laboratorio: Agregados (AG) para mezclas asfálticas.

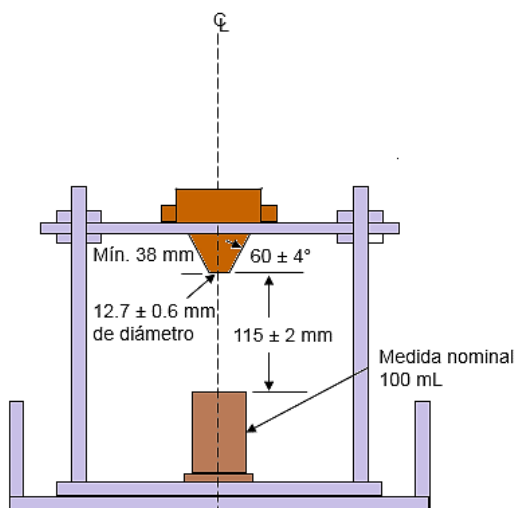


Figura 1. Diagrama del dispositivo empleado en la determinación de la Angularidad del agregado fino. Fuente: Manual de ensayos del IMT.

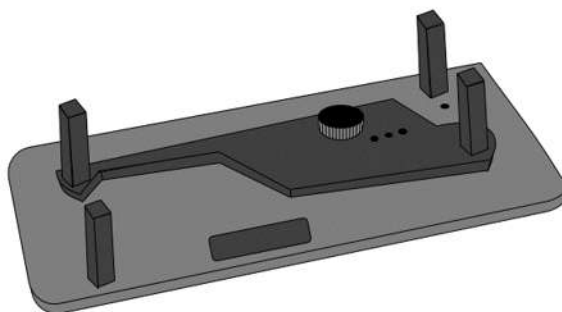
El contenido de vacío sin compactar de la muestra se calcula como la diferencia de volumen del recipiente y el volumen absoluto del agregado fino que es recolectado en este y es expresado como porcentaje del volumen total.

##### Partículas alargadas y lajeadas.

Se refiere a la determinación por masa del porcentaje de partículas planas y alargadas con respecto al volumen total de una muestra de agregado grueso. La forma de la partícula es un parámetro que influye en las propiedades de desempeño de la mezcla asfáltica, por lo que, para un comportamiento adecuado, se busca contar con partículas esféricas y evitar

las partículas planas y alargadas debido a que pudieran presentar tendencia a fracturarse durante la construcción y bajo la acción del tránsito.

El ensayo consiste en obtener y evaluar aproximadamente cien partículas de agregado retenido en la malla No. 4 que se hacen pasar por un calibrador (Figura 2) que ayuda a medir la relación del largo a espesor de cada pieza; de manera que si al colocar el largo de la partícula en la abertura más grande del dispositivo calibrador y ajustar el calibrador a dicha abertura, si esta misma partícula logra pasar el espesor a través de la abertura más pequeña, se considera plana y alargada.



*Figura 2. Representación del dispositivo calibrador de partículas. Fuente: Manual de ensayos del IMT.*

### **Equivalente de arena.**

Este método de prueba tiene como objetivo obtener la cantidad o proporción de material arcilloso presente en el agregado fino que pasan la malla de 4.75 mm, bajo condiciones estándar y de esta manera tener una idea de que tan afín será el agregado al cemento asfáltico en una mezcla, como es de esperarse, entre mayor sea la cantidad de arcilla que cubre las partículas del agregado, mayor será la dificultad en la adherencia con el cemento asfáltico.

De acuerdo al Manual del IMT de Ensayos para Laboratorio: Agregados (AG) para mezclas asfálticas, el “*Método de prueba para determinar el valor de equivalente de arena en el agregado fino*” consiste en verter una muestra de agregado que pasa el tamiz No. 4 y solución de trabajo (mezcla de cloruro de calcio en agua destilada, glicerina y formaldehído, o bien glutaraldehído) en una probeta graduada que es agitada con el propósito de despegar las partículas de arcilla del material granular. La muestra se irriga para que la arcilla quede en suspensión y la arena al fondo de la probeta, posteriormente se determina la altura del hasta donde llega el nivel de arcilla y la altura de la arena. El equivalente de arena se expresa como el porcentaje de la relación entre la lectura de arena sobre la lectura de arcilla; valores altos indicarán que se tiene un material “más limpio”.

En la Figura 3 se observa el esquema representativo de la obtención del valor de equivalente de arena.

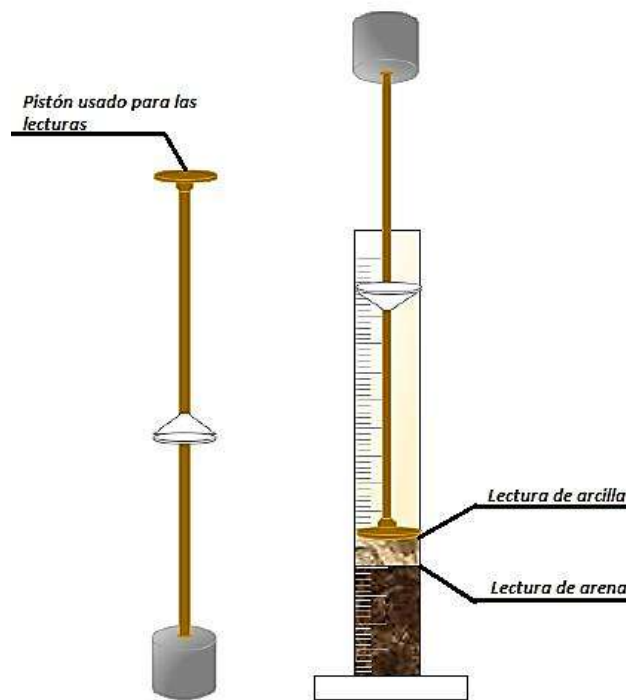


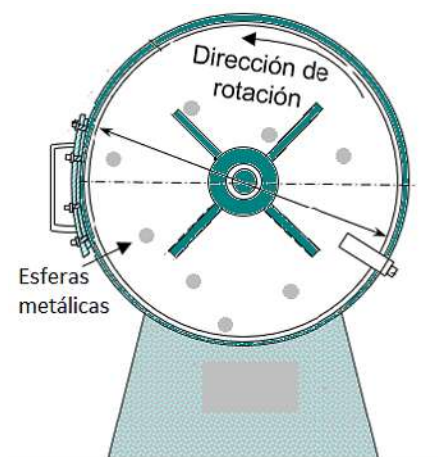
Figura 3. Esquema del dispositivo de determinación de equivalente de arena. Fuente: Manual de ensayos del IMT.

## PRUEBAS DE ORIGEN

### Resistencia a la degradación del agregado grueso por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles

Este método de prueba cubre un procedimiento para ensayar partículas de agregado gruesos con un tamaño máximo de 37.5 mm [1 1/2"], para evaluar su resistencia a la degradación utilizando un dispositivo de abrasión conocido como: Máquina de Los Ángeles. Se utiliza como un indicador de la tenacidad del material para resistir el impacto de las cargas durante la fabricación, tendido y compactación de la mezcla (IMT, 2019).

El ensayo concite en someter una muestra de agregado a abrasión por medio del impacto de esferas metálicas que se hacen girar con el agregado dentro de un tambor (Máquina de Los Ángeles, Figura 4); este proceso provoca un cambio en la granulometría del material, ya que, se produce una pérdida del agregado pétreo grueso respecto a una masa inicial. Un resultado bajo de pérdida por abrasión corresponde a un agregado resistente con buena tenacidad.



*Figura 4. Imagen y esquema representativo de la máquina de los ángeles. Fuente: imagen capturada por autor y esquema tomado del Manual de ensayos del IMT.*

### **Resistencia al intemperismo acelerado de los agregados**

Este método de prueba tiene como objetivo servir para determinar la resistencia de un agregado grueso a la desintegración por efecto de los agentes climáticos en la intemperie, principalmente, ante ciclos de congelamiento y deshielo, proceso común en las carreteras situadas en climas fríos. Este fenómeno se simula en el método de ensayo mediante la inmersión de una muestra de agregado en una solución de sulfato o magnesio, misma que posteriormente se lleva a secado en horno para completar un ciclo (figura 5); la prueba se completa después de efectuar un total de siete ciclos, la finalidad de este proceso es propiciar la formación de cristales de sal en los poros del agregado, generando al mismo tiempo una fuerza interna que hace que se desintegren las partículas de agregado mineral.



*Figura 5. Ciclo de inmersión y secado de las muestras de agregado. Fuente: imagen capturada por autor.*

## ANEXO B. SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO PARA UN PROYECTO SEGÚN SU GRADO DE DESEMPEÑO (PG)

De acuerdo a la norma mexicana N·CMT·4·05·004/18, dentro del proceso de la selección del cemento asfáltico según su grado de desempeño (PG) se considera la determinación de las temperaturas máxima y mínima de la zona donde se ubicará la obra; posteriormente se realiza un ajuste debido a la intensidad del tránsito y a la velocidad de operación de la carretera. A continuación, se describen cada una de las dichas etapas.

### Determinación de temperaturas máxima y mínima.

Con los datos estadísticos de la temperaturas máximas y mínimas de la zona donde se vaya a realizar la obra, se determinarán la temperatura máxima ( $T_{\text{máx}}$ ), y la temperatura mínima ( $T_{\text{mín}}$ ), como sigue:

Utilizando la fórmula B1 se calculan las temperaturas máximas esperadas en la carpeta o la capa de rodadura en los puntos donde inicia ( $T_{\text{máx}_1}$ ) y termina ( $T_{\text{máx}_2}$ ) del tramo por construir y se elige como temperatura máxima del tramo ( $T_{\text{máx}}$ ) la que resulte mayor, misma que se aproximará al valor superior más próximo de los considerados en la Tabla 1: sesenta y cuatro (64), setenta (70), setenta y seis (76) u ochenta y dos (82) grados Celsius. Cuando se tienen tramos muy largos o con cambios de temperatura muy drásticos, el proyecto se divide en tramos homogéneos, es decir, en los segmentos que se presenten variaciones iguales a un grado de desempeño PG o menores. En el caso de que la temperatura máxima calculada resulte mayor de ochenta y dos (82) grados Celsius se requerirá un diseño especial (N·CMT·4·05·004/18).

$$T_{\text{máx}_i} = 54.32 + 0.78T_{\text{air}_M} - 0.0025Lati^2 - 15.14\log(H + 25) + Z(9 + 0.61\sigma_{T_{\text{air}_M}}^2)^{0.5}. \quad (B1)$$

Donde:

$T_{\text{máx}_i}$  = Temperatura máxima calculada debajo de la superficie del pavimento en el sitio  $i=1$  donde inicia el tramo o  $i=2$  donde termina el tramo por construir, ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{air}_M}$  = Temperatura máxima promedio del aire de los 7 días consecutivos más cálidos registrados por lo menos en los últimos de 20 años en la zona, ( $^{\circ}\text{C}$ )

$Lati$  = Latitud, en el sitio  $i=1$  donde inicia el tramo o  $i=2$  donde termina el tramo por construir, ( $^{\circ}$ , con aproximación de 5 decimales)

$H$  = Profundidad, (mm) (se recomienda usar 20 mm).

$Z$  = Valor para el nivel de confiabilidad (distribución normal, se recomienda usar 2,055 para una confiabilidad de 98%).

$\sigma_{T_{air_M}}^2$  = Desviación estándar de la temperatura de los 7 días consecutivos más cálidos registrados por lo menos en los últimos 20 años en la zona, (°C).

Ahora bien, empleando la fórmula B2 se calcula la temperatura mínima esperada en la carpeta o la capa de rodadura ( $T_{mín}$ ) del tramo por construir, eligiendo entre menos dieciséis (-16) y menos veintidós (-22) grados Celsius, en caso de resultar menor de menos veintidós (-22) grados Celsius se requerirá un diseño especial (N·CMT-4-05-004/18).

$$T_{mín} = -1.56 + 0.72T_{air_M} - 0.004Lat^2 + 6.2\log(H + 25) - Z(4.4 + 0.52\sigma_{T_{air_M}}^2)^{0.5} \dots \text{ (B2)}$$

Donde:

$T_{mín}$  = Temperatura mínima esperada del pavimento debajo de la superficie por construir, (°C)

$T_{air_M}$  = Promedio de las temperaturas mínimas anuales del aire registradas en al menos los últimos de 20 años en la zona, (°C)

$Lat$  = Latitud del tramo de diseño, (°)

$H$  = Profundidad, (mm) (se recomienda usar 20 mm).

$Z$  = Valor para el nivel de confiabilidad (distribución normal, se recomienda usar 2,055 para una confiabilidad de 98%).

$\sigma_{T_{air_M}}^2$  = Desviación estándar de la temperatura mínimas anuales del aire registradas por lo menos en los últimos 20 años en la zona, (°C).

Las temperaturas máxima y mínima determinadas como se indica en los Incisos D.1.1. y D.1.2. de esta Norma, determinan el rango de temperaturas entre las que el cemento asfáltico requerido se comportará satisfactoriamente, es decir el grado de desempeño (PG), por ejemplo, PG 64-16.

### **Nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) seleccionado**

Después de haber seleccionado el grado de desempeño (PG) del cemento asfáltico según las temperaturas máximas y mínimas del sitio, como se indicó en los párrafos anteriores, se ajustará como último paso sus requisitos de calidad, eligiendo el nivel de ajuste que le corresponda de acuerdo con lo indicado en la Tabla 1 del presente anexo, considerando la intensidad del tránsito esperada y la velocidad de operación de la carretera; mismo que se representará con una letra que indicará cuando el ajuste sea Normal (S), Alto (H), Muy Alto (V) o Extrema (E).

Por ejemplo, si el grado de desempeño (PG) seleccionado de acuerdo con las temperaturas máxima y mínima es PG 76-16, la intensidad del tránsito es de veinte millones ( $20 \times 10^6$ ) de

ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas ( $\Sigma L$ ) y la velocidad de operación es mayor de setenta (70) kilómetros por hora, entonces el nivel de ajuste será Alto (H) por lo que se requerirá un cemento asfáltico PG 76H-16 y que se agregará al grado de desempeño (PG).

*Tabla 1. Nivel de ajuste del cemento asfáltico de acuerdo a la intensidad del tráfico y velocidad de operación del tramo de estudio. Fuente: Manual de ensayos del IMT.*

| <div> <div>Velocidad de operación (km/h)</div> <div>Intensidad del tránsito (<math>\Sigma L</math>)<sup>(1)</sup></div> </div> | Nivel de ajuste |                     |                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
|                                                                                                                                | $v > 70$        | $20 \leq v \leq 70$ | $v < 20$                |
| $\Sigma L < 10^6$                                                                                                              | Normal (s)      | Alto (H)            | Muy alto (V)            |
| $10^6 \leq \Sigma L \leq 30 \times 10^6$                                                                                       | Alto (H)        | Alto (H)            | Muy alto (V)            |
| $\Sigma L > 30 \times 10^6$                                                                                                    | Muy alto (V)    | Muy alto (V)        | Extremadamente alto (E) |

(1)  $\Sigma L$  es el número de ejes equivalentes de 8.2 t, acumulados durante el periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño, que en ningún caso será menor de diez (10) años; obtenido con el método del Instituto de Ingeniería de la UNAM para la condición de daño superficial.

## ANEXO C. RECOMENDACIONES PARA LA FABRICACIÓN, TENDIDO COMPACTACIÓN Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD DE UNA MEZCLA MODIFICADA CON CAUCHO REACCIONADO Y ACTIVADO

Luego de los problemas y detalles técnicos que se presentaron en el tramo de la autopista Pátzcuaro-Uruapan (rehabilitado con la mezcla SMA<sub>2</sub>-RAR), surgió la necesidad de elaborar un compendio de recomendaciones enfocadas en la práctica de la fabricación, tendido, compactación y aseguramiento de la calidad de mezclas que se les ha adicionado el agente modificador: Caucho Reaccionado y Activado (RAR). Sin embargo, debido a que muchos aspectos de producción, colocación y control de calidad de este tipo de mezcla son similares a los que se efectúan en una mezcla convencional en caliente (HMA), únicamente aquellos aspectos diferentes o problemáticas potenciales asociadas a las mezclas con adición de RAR, serán cubiertas a detalle.

La fabricación de mezcla en planta abarca aquellos procesos llevados a cabo en planta para producir la mezcla; tales como: el manejo de agregados, manejo de agentes modificadores, tiempos y temperaturas de mezclado y calibración de la planta. Es justamente con los agregados pétreos con los que se inicia este anexo de recomendaciones.

### Producción y manejo de agregados

Como cualquier mezcla en caliente, es una tarea común el mezclar dos o más almacenes de agregados (tamaño grueso, intermedio y fino) con el fin de obtener una estructura granulométrica idónea, ya que los agregados representan entre el 79 y 91 % de la mezcla

asfáltica, además de que la granulometría de los agregados tiene una enorme influencia en el comportamiento de la mezcla producida; sin embargo, para el caso de una mezcla asfáltica con adición de RAR, las propiedades o características esenciales que deben tener un control estricto son: la densidad de los agregados y la afinidad del agregado con el cemento asfáltico.

En la etapa inicial de la producción de arenas o gravas, se deberá tener un cuidado especial al realizar el despalme para no contaminar el agregado. Esto es particularmente importante cuando el suelo superficial contiene arcilla, vegetación, o algún otro material que pueda afectar desfavorablemente la afinidad del agregado con el asfalto, es decir, la pérdida de adhesividad o unión entre la partícula de agregado pétreo con el ligante asfáltico en la mezcla asfáltica producida.

Con cierta frecuencia, las operaciones en las excavaciones y explotación de la roca deben efectuarse alrededor de lentes de arcilla (depósitos en forma de lente), vetas (capas) de arcilla y otros depósitos de materiales indeseables que forman parte del depósito de agregado (figura 6).



*Figura 6. Matriz rocosa rodeada por depósitos de arcilla, banco de agregados “Las víboras”.  
Fuente: imagen capturada por autor.*

Las principales medidas en este aspecto son:

- Extremar cuidado al realizar el despalde para no contaminar el agregado.
- El material en ocasiones debe ser lavado para retirar el material innecesario y dañino como las arcillas y materia orgánica.
- Antes de trasladar las rocas a la trituradora es importante controlar visualmente la calidad de la roca que se está extrayendo.

Una vez que la roca se ha reducido a los tamaños deseados mediante el proceso de trituración y al mismo tiempo se ha controlado las proporciones presentes de dichos tamaños, esto es, el control granulométrico; la siguiente etapa es el acopio o almacenaje de los agregados para su posterior aprovechamiento en la producción de la mezcla.

Para producir mezclas asfálticas en caliente de alta calidad es esencial tener buenos procedimientos de acopio de materiales. Los agregados retienen su graduación si son adecuadamente almacenados (Ver Fotografía 7). Cuando el acopio es malo, las partículas de agregado de mayor tamaño se acumulan en la parte inferior de los apilamientos a lo que se le llama segregación, y la graduación varía en los diferentes niveles del acopio. Para evitar este fenómeno los apilamientos o montículos de material deberán tener una forma geométrica regular con un talud de pendiente lateral no mayor de 1:1.5 y un talud frontal de acceso de 3:1.



*Figura 7. Acopio de agregados con talud o ángulo de reposo adecuado. Fuente: imagen capturada por autor.*

Otro aspecto fundamental que se debe tener en cuenta en el acopio, es mantener la limpieza del agregado, esto se logra preparando superficies mediante el tendido y compactación de una capa de material pétreo, con la finalidad de obtener un área de acopio firme y libre de arcilla o cualquier otro material que sea susceptible de contaminar el almacén (Ver figura 8).



*Figura 8. Almacén de agregados donde se observa una superficie firme y libre de arcilla.  
Fuente: imagen capturada por autor.*

A manera de síntesis, los aspectos fundamentales a tomar en consideración previo al almacenaje del material pétreo son:

- Limpiar y desenraizar (despalmar) la zona elegida para almacenar los agregados pétreos.
- Nivelar el sitio para obtener una sección transversal que permita un buen drenaje.
- Compactar el suelo natural por lo menos con tres pasadas del equipo de compactación.
- Colocar, compactar y mantener una capa de por lo menos 150 mm de agregado grueso en el sitio de apilamiento y en los accesos, para estabilizar y evitar la contaminación del material del apilamiento.

## **Almacenaje y manejo del modificador (RAR)**

Otro aspecto fundamental dentro de la etapa de producción de la mezcla asfáltica con adición de RAR, es justamente el correcto manejo y/o almacenaje del aditivo RAR, ya que dicho aspecto tiene influencia directa en la integración adecuada de los materiales dentro del proceso de mezclado. Haciendo énfasis en la composición del modificador RAR, misma que consta de un 60 % de polvo de neumáticos, 16% ( $\pm 3\%$ ) de contenido de asfalto y 24% ( $\pm 3\%$ ) de Filler calizo y aditivos; los puntos o recomendaciones a tomar en cuenta en el manejo del aditivo RAR, son los que se presentan a continuación:

- El producto no es decadente, aunque para evitar algún tratamiento de reacondicionamiento, se aconseja su uso antes de un año desde la fecha de producción.
- Si se supera el periodo de un año posterior a la fabricación, se recomienda cribar el producto con una criba vibratoria, para romper las aglutinaciones eventuales que puedan ocurrir por el largo almacenamiento, logrando con ello mantener la granulometría original del producto.
- Mantener los sacos que contienen el aditivo RAR, fechados en almacenes ventilados, así como evitar la luz solar directa y mantenerlos en lugar seco, para evitar la degradación de estos sacos o bolsas.

Recordando que el agente modificador RAR es agregado directamente a los agregados en seco durante la producción de la mezcla, es imperativo que el sistema usado para agregar el modificador al tambor o secador de la planta, sea calibrado, para asegurar que la mezcla reciba la proporción adecuada que fue calculada.

## **Requerimientos de fabricación de la mezcla asfáltica**

La producción de una mezcla con adición de RAR es similar a una mezcla asfáltica convencional en caliente, desde el punto de vista de los cuidados que se deben tener presentes para asegurar la calidad de la mezcla producida; no obstante, las áreas de producción donde la calidad de la mezcla modificada con RAR puede verse especialmente comprometida, son: los tiempos y la temperatura de mezclado, así como la calibración de la planta; dichos aspectos son abordados en las líneas siguientes, cabe destacar que los cuidados y valores que se exponen son con base en las recomendaciones del fabricante, así como de la experimentación en laboratorio.

- La adición de RAR debe ser efectuada en un porcentaje definido previamente por la fórmula de trabajo de la mezcla bituminosa, siendo este valor variable entre el 0,5% y 4,5% del peso total de la mezcla bituminosa, según el tipo de mezcla que se vaya a utilizar.
- La cantidad exacta de RAR y la temperatura de mezclado, tendrán que ser determinadas por un estudio de formulación o diseño de la mezcla, elaborado por

un laboratorio independiente de ensayos, con experiencia en diseño de este tipo de mezclas.

- Una vez definido el porcentaje exacto de RAR no se podrá variar más de  $\pm 0.5\%$  ese valor, durante la fabricación en planta, por lo que es indispensable estar inspeccionando continuamente el sistema de dosificación, previamente calibrado.
- La producción de mezclas asfálticas con RAR se lleva a cabo en una planta convencional, de producción continua o discontinua. Con el fin de asegurar una mezcla homogénea, el RAR se mezcla con los agregados pétreos, antes de añadir el asfalto; este proceso inicial de mezclado tendrá un tiempo necesario para garantizar un reparto homogéneo con los agregados (máximo 5 segundos, dependiendo de la planta de fabricación de mezclas).
- Se recomienda calentar los agregados pétreos entre 5 y 15 °C por encima de la temperatura normal usada en un tipo de mezcla similar (sin sobrepasar los 195 °C) y calentar el asfalto, unos 5 °C por encima de la temperatura normal para el tipo de mezcla que se esté trabajando (sin sobrepasar los 180 °C o la temperatura recomendada para el asfalto que está siendo usado); lo anterior para compensar que el RAR se añade a temperatura ambiente.
- Con base en los ensayos y pruebas hechas en laboratorio, se recomienda mantener una temperatura de mezclado de la mezcla entre 175 °C y 180 °C.

La secuencia de fabricación de la mezcla con RAR se resume de la siguiente manera:

1. Adición de áridos al mezclador (Temperatura recomendada 190 °C)
2. Adición de RAR, tiempo de mezcla en seco, máximo 5 s.
3. Adición del asfalto (temperatura recomendada 180 °C)
5. Tiempo de mezcla en húmedo, máximo 20 s.

### **Transporte de la mezcla asfáltica**

Los tiempos de transporte, como en toda mezcla asfáltica en caliente, deberán ser tan cortos como sea posible. Es importante que la temperatura de la mezcla con adición de RAR no sea elevada arbitrariamente para solventar tiempos de acarreo más largos, ya que, una temperatura incrementada en conjunción con las vibraciones comunes en los vehículos transportadores puede provocar la separación del mortero del agregado grueso.

Un cuidado que especialmente se debe cuidar en este tipo de mezclas al momento de ser transportadas es la anti-adherencia, esto es: debido a la naturaleza del modificador RAR y a los mayores porcentajes de cemento asfáltico usados en comparación con una mezcla convencional, las mezclas modificadas con RAR tienden a adherirse a la caja de los camiones transportadores a un nivel superior; en consecuencia, es una acción prudente considerar el uso un agente anti-adherente y limpiar la caja de los camiones constantemente. Un mal

hábito que se ha tenido en México a lo largo de los años y que se debe erradicar es el uso de petróleo, diésel o aceites como agentes anti-adherentes, en cualquiera que sea su presentación, se deberán prohibir estrictamente, dada la degradación que le infiere a la mezcla.

En atención a la necesidad de contar con un agente anti-adherente efectivo, de coste accesible y que no comprometiera la calidad de la mezcla asfáltica modificada con RAR, se probó en el laboratorio una solución de agua con distintas dosificaciones de jabón detergente en polvo, donde se encontró que una dosificación de **20 g de jabón /litro de agua**, fue la que mejores resultados anti-adherentes tuvo. Dicho experimento consistió en un modelo a escala 1:10 de la caja de un camión transportador (figura 9), la cual se impregnaba con las distintas dosificaciones de solución jabonosa y posteriormente se colocaba mezcla modificada con RAR, para finalmente después de pasado un tiempo promedio de transporte, se simulaba la descarga de la mezcla, dando una inclinación al modelo con el ángulo de descarga típico en un camión transportador (figura 10).



*Figura 9. Modelo a escala 1:10 de la caja de un camión transportador. Fuente: imagen capturada por autor.*



*Figura 10. Simulación del proceso de descarga de la mezcla asfáltica, mediante el modelo a escala. Fuente: imagen capturada por autor.*

### **Tendido y compactación de la mezcla asfáltica con RAR**

Finalmente se tiene la fase final del proceso constructivo, es decir, el tendido y compactación de la mezcla; en este rubro, una mezcla que ha sido mejorada con la adición de RAR, posee un comportamiento muy similar al de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados y de alta viscosidad, por lo que el papel de la temperatura es crucial.

Para asegurar la densidad mínima de la mezcla compacta especificada, según su tipología, se recomienda mantener al comenzar una temperatura de compactación superior a 160 °C (ver figura 11). Para lograr dichas premisas, la compactación de la mezcla con RAR deberá ejecutarse tan pronto como sea posible luego de su colocación, evitando en todo momento paros de la operación. Por su misma naturaleza, una vez que la mezcla con RAR llega a enfriarse por debajo de los 160 °C, comienza a tener dificultades para compactarse al grado deseado.

La compactación deberá ser realizada con al menos tres rodillos metálicos, impregnados de agua con aproximadamente un 2% de cal hidráulica, estando uno de ellos cerca de la extendedora, a distancias no superiores a 15 metros. Se deberán usar compactadores de al

menos que pesen al menos 10 toneladas, con velocidades de operación no mayores a 5 km/h. Los compactadores con sistema de vibración pueden ser usados, sin embargo, deben ser usados con precaución, con alta frecuencia y amplitud baja, ya que la vibración puede romper el agregado y/o causar ondulaciones en la superficie terminada de la carpeta.



*Figura 11. Comprobación de la temperatura de compactación en tramo de prueba, autopista Patzcuaro-Uruapan. Fuente: imagen capturada por autor.*

En síntesis, las recomendaciones generales para el tendido y compactación de una mezcla con RAR, son enlistadas a continuación:

- Asegurar que la temperatura ambiental mínima de 10° C sea mantenida durante el tendido de la mezcla.
- Usar camiones transportadores con cajas limpias, mismas que se impregnarán únicamente con soluciones a base de agua y jabón, se recomienda el uso de agua con jabón en polvo con una dosificación de **20 g de jabón /litro de agua**.
- Un equipo de transferencia de material (transfer) puede ser usado para favorecer una temperatura uniforme de la mezcla y evitar la segregación de la mezcla.
- Mantener las operaciones de pavimentación continuas.
- Completar la compactación antes de que la mezcla alcance los 160 °C.
- No detener el compactador sobre la mezcla caliente.

- No deben ser usados compactadores con llantas de hule.
- Es necesario el uso de al menos tres compactadores de rodillo liso de por lo menos 10 ton de peso y con velocidades de operación no superiores a 5 km/h.
- Tener cuidado especial en la inspección y fabricación de las juntas.

### **Aseguramiento de la calidad de la mezcla asfáltica con RAR**

Una vez que se han abordado las recomendaciones prácticas y cuidados que se deben tener desde el manejo de los materiales, la producción y la disposición final de la mezcla; es momento de exponer los métodos o programas encaminados a garantizar que la mezcla producida y colocada reúna las especificaciones con los márgenes de aceptación establecidos en el proyecto, es decir, el aseguramiento de la calidad.

Los métodos de aseguramiento de calidad que se refieren a una mezcla asfáltica con RAR son presentados en las siguientes secciones o aspectos propios de la mezcla.

#### **AGREGADOS**

Tal como en una mezcla asfáltica convencional, se debe inspeccionar periódicamente los almacenes de agregado que se estén usando para la producción de la mezcla asfáltica con RAR; la frecuencia de estas inspecciones o verificaciones de la calidad del agregado dependerán de la dimensión del proyecto y de la capacidad de producción de mezcla, sin embargo, a través de la práctica se ha comprobado que una buena inspección puede llevarse a cabo por cada 2000 o 2500 m<sup>3</sup> de material pétreo utilizado, así como cuando se presente un cambio en la beta de extracción o por el cambio de banco de materiales. La evaluación comprenderá las propiedades de los agregados, tales como: densidad, caras fracturadas, desgaste, intemperismo acelerado, adherencia con el asfalto, caras planas y alargadas, lo anterior para los agregados gruesos, mientras que para el agregado fino se deberá evaluar la gravedad específica bruta, equivalente de arena, Angularidad y azul de metileno. De estos parámetros de evaluación se deberá poner especial atención en la adherencia, equivalente de arena y azul de metileno, ya que son aspectos directamente relacionados con la afinidad de los agregados con el asfalto, esto es algo que frecuentemente se deja de lado y es bien comprobado que cuando un agregado presenta problemas de afinidad con el asfalto, la situación se torna más crítica en una mezcla con RAR.

La alimentación del agregado en frío también deberá ser inspeccionada, tanto en plantas de tambor como las de bachas. Durante la producción de la mezcla asfáltica en planta, se recomienda realizar el muestreo de los agregados pétreos (grueso, fino y filler) en la banda de transporte de agregados en frío, a cada 3000 m<sup>3</sup>, siendo necesario evaluar todas las propiedades anteriormente mencionadas.

#### **CEMENTO ASFÁLTICO**

El cemento asfáltico usado en las mezclas con RAR deberá ser evaluado tal como se hace en los proyectos con mezclas asfálticas convencionales, es decir, en la planta se verificarán los

parámetros de punto de inflamación Cleveland, punto de reblandecimiento, recuperación elástica por torsión a 25°C (en caso de asfaltos modificados) y penetración; el resto de las propiedades reológicas tendrán que evaluarse en laboratorios especializados, dada la complejidad de los equipos y procesos empleados. Una adecuada frecuencia de los resultados de las reologías a los asfaltos será de un reporte cada 7 días o 150 t recibidas en planta (lo que ocurra primero).

#### SECCIONES DE PRUEBA

Antes de la producción en masa de la mezcla asfáltica con RAR, se deberá fabricar y colocar un tramo de prueba (ver figura 12). Este tramo deberá ser realizado en el sitio de la obra y constará de entre 200 y 500 toneladas métricas de mezcla, este volumen permite que todos los componentes de la planta puedan operar a un ritmo de producción consistente. Este ensayo es una buena oportunidad para determinar cualquier problema o desviación en la producción de la fórmula de trabajo final de la mezcla. En el tramo de prueba también se determina el patrón de compactación adecuado.

Los requerimientos para colocar un tramo de prueba antes de la producción, varían de un día a una semana, todo dependerá del nivel de ajuste que se tenga que llevar a cabo.



*Figura 12. Proceso de compactación en tramo de prueba, autopista Patzcuaro-Uruapan.  
Fuente: imagen capturada por autor.*

## ENSAYOS EN LA MEZCLA

Ciertos datos de ensayos practicados en la mezcla deberán ser recolectados para tener un control de la mezcla, así como para tener argumentos para aceptar o rechazar la mezcla. Estos ensayos son similares a los ejecutados en las mezclas convencionales, a continuación, se presentan los que mayor relevancia tienen dentro del aseguramiento de calidad.

### *Especímenes compactados en laboratorio*

Los especímenes compactados en laboratorio de la mezcla fabricada en planta deben ser analizados para determinar su cumplimiento con las propiedades volumétricas establecidas en las especificaciones del diseño de la mezcla (ver figura 13). Para dicho fin el procedimiento de compactación deberá ser el mismo que se fue utilizado durante el diseño.

Las propiedades volumétricas preponderantes son: la gravedad específica de los especímenes que puede ser determinada mediante la norma AASHTO T66, la gravedad máxima teórica (gmm) determinada con la norma AASHTO T 209 por cada día producción y finalmente los vacíos, que pueden ser determinados de acuerdo al método descrito para las mezclas asfálticas de granulometría densa, en la norma AASHTO T 269. Los vacíos resultantes deben estar dentro del rango especificado en diseño, mismo que normalmente oscila entre 4 y 5%, mientras que los vacíos del agregado mineral (VAM) deberán tener o exceder el requisito mínimo de 17%.



*Figura 13. Fabricación de especímenes para verificación de propiedades volumétricas.  
Fuente: imagen capturada por autor.*

### *Determinación de la granulometría y contenido asfáltico*

La determinación de la granulometría y contenido asfáltico son dos de los factores que influyen determinadamente en las propiedades volumétricas y en el desempeño de la mezcla asfáltica, por lo que su análisis deberá ser diario, con una frecuencia de muestreo recomendada que puede estar entre 150 y 200 metros cúbicos de mezcla producida. El método para determinar el contenido asfáltico y su respectiva tolerancia, puede ser mediante el método de ignición (AASHTO T 308 o ASTM D6307), el cual ha funcionado adecuadamente para las mezclas con RAR. Después de la extracción o lavado del cemento asfáltico, se deberá obtener la granulometría del agregado de acuerdo a la norma AASHTO T11 y T27, donde los resultados deberán cumplir con las tolerancias especificadas en el diseño.

### *La densidad en sitio*

Finalmente, otro parámetro fundamental para el control de calidad de cualquier tipo de mezcla asfáltica es la determinación de la densidad en sitio, misma que debe ser verificada continuamente a lo largo de la construcción del pavimento, para asegurar que la densidad obtenida es la adecuada. El valor de densidad recomendable debe estar entre el 94 y 96% de la densidad teórica máxima, a menos que se trate de un diseño especial, en el que se pretenda una estructura más abierta.

La densidad de la mezcla en sitio puede ser inspeccionada directamente de la extracción de núcleos o mediante el empleo de un densímetro electromagnético (ver figuras 14 y 15), siendo esta última técnica la más recomendada, ya que se puede emplear desde el tendido inicial de la mezcla, para estimar el número adecuado de pasadas con el rodillo compactador, hasta la mezcla compactada, para determinar el grado de compactación final de cualquier punto sin tener que dañar la superficie del pavimento y en un menor tiempo invertido, en comparación a la extracción de núcleos, sin embargo, la extracción de especímenes en campo es una tarea imprescindible, ya que, a partir de sus valores de gravedad específica bruta (gmb) se podrá calibrar el densímetro, dejando de manifiesto que entre más lecturas y su respectiva correlación con el gmb de los especímenes extraídos, mayor será la precisión y por ende mayor la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante el densímetro electromagnético.



Figura 13. Determinación de la densidad de la mezcla asfáltica compactada, mediante densímetro electromagnético. Fuente: imagen capturada por autor.



Figura 14. Verificación del grado de compactación de la mezcla asfáltica, mediante densímetro electromagnético. Fuente: imagen capturada por autor.