

CONTENIDOS



Rey Omar Adame



PROTOCOLO “DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRANULOMETRÍA Densa EMPLEANDO PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP)”

Rey Omar Adame Hernández
Coordinador del comité técnico de materiales reciclados

XIII Congreso Mexicano del Asfalto. 20, 21y 22 de agosto de 2025, Cancún, Quintana Roo, México

Introducción



Línea de tiempo RAP – Evolución mundial

1970' Origen

- **Crisis del petróleo impulsa el reciclaje** de asfalto para reducir costos.
- Inicio del fresado en frío y reutilización en EE.UU.
- **Primeras plantas adaptadas** para mezclar RAP con materiales vírgenes.

1980's Expansión y regulación

- **FHWA en EE.UU. publica guías** para uso controlado de RAP (10–20%).
- **Expansión a Canadá, Europa y Japón.**
- Políticas ambientales europeas limitan el vertido y fomentan el reciclaje.

1990's optimización tecnológica

- Nuevas **plantas con calentamiento indirecto** para no afectar el ligante.
- **Desarrollo de rejuvenecedores y aditivos** para mayor porcentaje de RAP.
- Mayor control de calidad en granulometría y propiedades.

2000's Integración a gran escala

- **Mezclas tibias (WMA)** facilitan uso de RAP y reducen emisiones.
- Proyectos en Australia/Nueva Zelanda alcanzan 50% RAP.
- La UE establece metas de reciclaje cercanas al 100% del asfalto recuperado.

2010's innovación y economía circular

- Reciclado in situ: FDR y CIR ganan popularidad.
- Uso de análisis de **ciclo de vida (LCA)** para cuantificar beneficios.
- Japón logra tasas >99% de reciclaje de asfalto.
- **Control inteligente y trazabilidad del RAP.**

2020's Digitalización y sostenibilidad total

- **Sensores y big data optimizan la dosificación de RAP.**
- Agentes de reciclado de base biológica y nanomateriales.
- Compromisos de cero residuos en carreteras.





Línea de tiempo RAP – Evolución México

Años 80-90: Aparición y ensayos iniciales

- El uso del RAP en México comenzó de forma esporádica, **inspirado en prácticas de Estados Unidos**.
- Inicialmente **se utilizaba en caminos de bajo tránsito y en mezclas en frío**, principalmente como base o subbase estabilizada con emulsiones.
- **Las pruebas eran limitadas**, con resultados variables debido a la **falta de control en la granulometría y contenido de ligante recuperado**.

Años 2000: Introducción formal en proyectos piloto

- El **Instituto Mexicano del Transporte (IMT)**, **empresas privadas** y algunas universidades y concesionarias comenzaron a documentar el uso de RAP en mezclas en caliente (HMA) como parte de proyectos de investigación.
- Se establecieron lineamientos iniciales para porcentajes de incorporación (generalmente menores al 20%), debido a limitaciones en plantas y desconocimiento de técnicas de rejuvenecimiento.
- En esta etapa, el objetivo era **reducir costos y aprovechar materiales existentes**, pero el enfoque ambiental empezaba a ganar relevancia.

Años 2010: Expansión y avances tecnológicos

- **Plantas de asfalto más modernas** con sistemas de doble tambor y dosificación precisa permitió aumentar los porcentajes de RAP (hasta 30–40% en algunos casos).
- Se introducen **aditivos rejuvenecedores** para mejorar las propiedades del ligante envejecido.
- Se fortalece la idea de que el RAP no es “desecho” sino un **recurso valioso**.

Años 2020 al presente-Sustentabilidad y economía circular

- El RAP comienza a ser común en contratos de conservación de carreteras, especialmente en concesionarias.
- Proyectos recientes lo combinan con **mezclas tibias (WMA)** para reducir temperatura y emisiones.
- En México, las concesionarias comienzan a incorporar criterios de **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)** para justificar el uso del RAP como parte de estrategias de reducción de huella de carbono.
- Las investigaciones se han enfocado en **maximizar su contenido sin comprometer el desempeño**.



Protocolo AMAAC en México



Diseño de mezclas:

- selección de materiales (agregados pétreos y asfalto) y en la determinación de sus proporciones para lograr una mezcla de alto desempeño

Niveles de diseño:

- El protocolo establece diferentes niveles de evaluación, que van desde el diseño volumétrico básico hasta ensayos más complejos.

Control de calidad:

- Se definen pruebas y controles durante la producción de la mezcla para garantizar que las propiedades se mantengan.

Importancia del protocolo AMAAC:

Mejora la calidad y durabilidad de los pavimentos:

- Se busca aumentar la vida útil de los pavimentos y reducir la necesidad de mantenimiento.

Adaptación a condiciones específicas:

- Permite adaptar el diseño de la mezcla a las condiciones climáticas y operativas de cada proyecto.

Homogeneización de metodologías



Problemática del RAP en México

1. Limitaciones técnicas

- **Variabilidad del material:**
 - Lo que genera inconsistencias en la calidad.
- **Falta de caracterización sistemática:**
 - No se realizan estudios completos
- **Tecnología limitada en algunas plantas:**

2. Normatividad y lineamientos

- **Normas incipientes:**
 - Todavía no existe una normativa robusta y de cumplimiento obligatorio
- **Adopción desigual:**

3. Factores económicos y de percepción

- **Inversión inicial:**
- **Percepción de menor calidad:**
 - Algunos actores de la industria consideran al RAP como “desecho”

4. Aspectos ambientales y de sostenibilidad

- **Potencial no aprovechado:**
 - El RAP contribuye a la economía circular y reducción de huella de carbono.
- **Escasa integración con criterios de ACV**



Protocolo de reciclados AMAAC en México



Este protocolo contiene las recomendaciones necesarias para diseñar una mezcla asfáltica de granulometría densa **con hasta 35% RAP, fabricada en caliente y en planta** que se utilice en la construcción de pavimentos flexibles para carreteras donde se desee obtener altos niveles de desempeño.

MATERIAL ASFÁLTICO
RECUPERADO



CONSIDERACIONES PARA LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE RAP EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Porcentaje del 0 al 10 % RAP

Las consideraciones en diseño de la mezcla asfáltica producto del uso del RAP son minimas, la afectación en volumetría, granulometría o desempeño no son significativas

APLICACIÓN

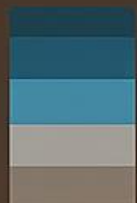
DENSAS SUPERFICIALES

DENSAS INTERMEDIAS

ESTRUCTURALES



- ✓ El RAP se incorpora a la mezcla como un agregado más.
- ✓ El asfalto del RAP no se considera como asfalto de aporte.



Capas densas superficiales, capas densas intermedias o estructurales.



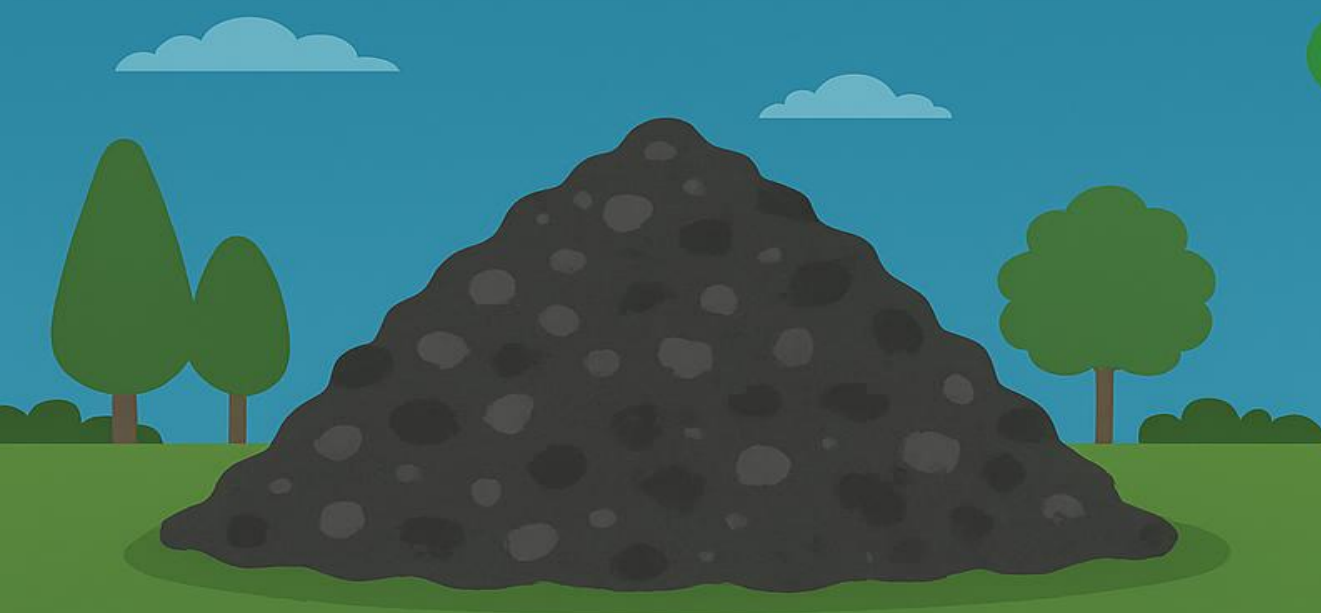
Se **recomienda** utilizar un ensayo que evalúe el potencial de agrietamiento



Porcentaje mayor al 10 y menor o igual al 25% de RAP

El diseño volumétrico considerando las propiedades del material RAP, como: origen, porcentaje de asfalto y nivel de envejecimiento.

Los resultados de laboratorio, la capacidad de dosificación de la planta, el tránsito, el origen del RAP, los costos, así como las distancias de transporte podrían definir la idoneidad de la capa a colocarse.



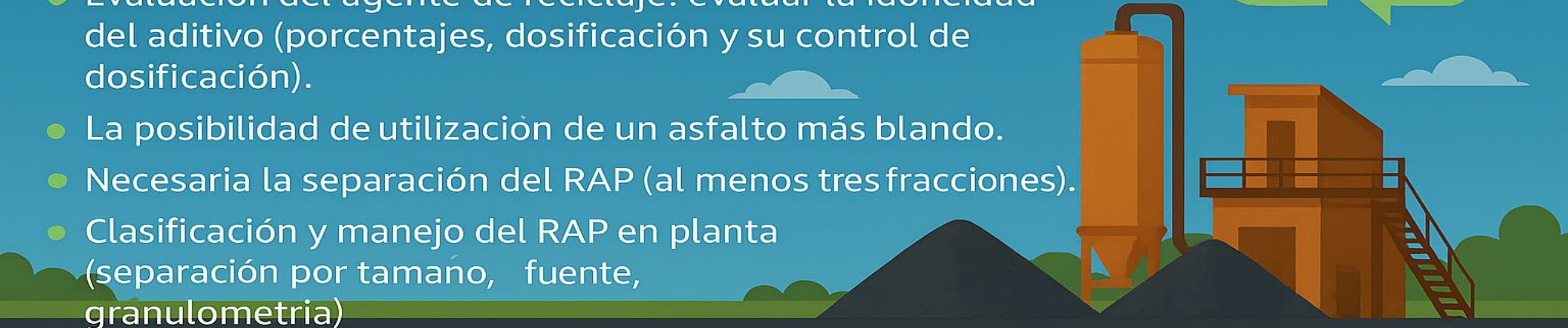
Se recomienda:

- El diseño por desempeño
- Obtener las propiedades reológicas del RAP,
- Manejo del RAP en la planta:
 - Por nivel de envejecimiento
 - Por granulometría
 - Con polímero
 - Sin polímero
 - evaluar la idoneidad del aditivo

Porcentaje mayor a 25 y menor o igual a 35 % de RAP

El uso de altas tasas de RAP exige una alta responsabilidad en todo el proceso de fabricación de una mezcla asfáltica.

- El uso de un agente de reciclaje se vuelve fundamental para contrarrestar los efectos de rigidez y fragilidad que aporta el RAP.
- Evaluación del agente de reciclaje: evaluar la idoneidad del aditivo (porcentajes, dosificación y su control de dosificación).
- La posibilidad de utilización de un asfalto más blando.
- Necesaria la separación del RAP (al menos tres fracciones).
- Clasificación y manejo del RAP en planta (separación por tamaño, fuente, granulometría)
- Consideración de las propiedades y uniformidad del RAP.
- evaluar la idoneidad del aditivo (agente de reciclaje)



Selección de materiales



Selección de los materiales

Propiedades del agregado pétreo virgen

Clasificación de las mezclas asfálticas en función del tamaño de partícula.

Tamaño nominal del material pétreo

Gráfico de Fuller y sus puntos de control para una mezcla

Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo

Característica	Norma	Especificación
Densidad relativa del material pétreo seco, adimensional	ASTM C127	2.4 mín.
Desgaste de Los Ángeles, %	ASTM C131	25 máx.
Desgaste Microdeval, %	AASHTO T327 / ASTM D6928	15 máx.
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T104 / ASTM C88	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
2 o más caras fracturadas, %	ASTM D5821	90 mín.
Partículas planas y alargadas, %	ASTM D4791	5:1, 10% máx. ⁽¹⁾
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08	90. mín.

Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D2419	55 mín.
Angularidad, %	ASTM T304	40 mín.
Azul de metileno, ml/g	Recomendación AMAAC RA-05	15 máx.

Caracterización del RAP

Objetivo: recopilar la información para el diseño volumétrico y dosificación de agente de reciclaje

Propiedad / Característica	Estándar de prueba		Especificación	Porcentaje de RAP en la mezcla asfáltica
Contenido de cemento asfáltico	AASHTO T164 (Dispositivo Rotarex)	AASHTO T308 (Horno de Ignición)	-	Aplica para cualquier porcentaje de RAP
Granulometría ⁽¹⁾	AASHTO T30		-	
Extracción del asfalto oxidado presente en el RAP ⁽²⁾	ASTM D2172		-	Aplica para mezclas asfálticas con porcentajes de RAP mayores a 10%
Recuperación del asfalto oxidado presente en el RAP	ASTM D1856 (Método Abson)	ASTM D1856 (Método Rotavapor)	-	
Determinación de la alta temperatura crítica de falla del asfalto recuperado	AASHTO T315		G*/Sen δ = 1.00 kPa	

Determinación de la Gravedad Específica efectiva y Gravedad específica bruta del RAP

cuando la mezcla asfáltica incorpore una cantidad menor o igual a 10% de RAP se recomienda estimar el valor de la gravedad específica bruta (G_{sb}) del agregado recuperado.

Método A

La gravedad específica bruta (G_{sb}) del agregado recuperado podrá estimarse a partir de los valores promedio obtenidos en las fracciones de material pétreo de aporte virgen.

cantidad de RAP superior al 10% se recomienda: Método B y C

Método C

Ejecutar el ensayo de gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) en las muestras de RAP conforme al estándar de prueba ASTM D2041 y asignar el valor resultante de G_{mm} a la gravedad específica bruta (G_{sb}) del agregado recuperado.

Ejecutar el ensayo de gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) en las muestras de RAP conforme al estándar de prueba ASTM D2041 y, posteriormente, estimar las gravedades por medio de retro-cálculo empleando las siguientes ecuaciones

$$G_{seRAP} = \frac{100 - P_{bRAP}}{\frac{100}{G_{mmRAP}} - \frac{P_{bRAP}}{G_{bRAP}}} \quad Ec. (1)$$

$$G_{sbRAP} = \frac{G_{seRAP}}{\left[\frac{P_{baRAP} G_{seRAP}}{100 G_{bRAP}} + 1 \right]} \quad Ec. (2)$$

Donde:

G_{se-RAP} = gravedad específica efectiva del agregado recuperado;

G_{mm-RAP} = gravedad específica teórica máxima del RAP;

G_{b-RAP} = gravedad específica del asfalto del RAP;

* P_{b-RAP} = contenido de asfalto presente en el RAP;

G_{sb-RAP} = gravedad específica bruta del agregado recuperado y;

** P_{ba-RAP} = asfalto absorbido en porcentaje respecto al peso del agregado recuperado

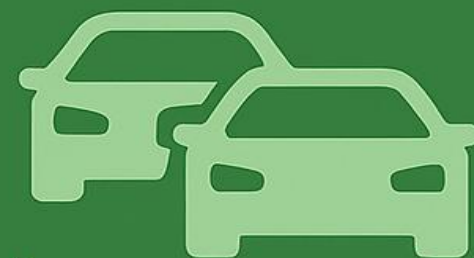
Selección del cemento asfáltico de aporte

El cemento asfáltico de aporte deberá seleccionarse en función de:

- ✓ La temperatura máxima y mínima prevaleciente en el lugar de aplicación.
- ✓ La intensidad y velocidad de operación del tránsito esperado



Todo ello en apego al procedimiento señalado por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes en la Norma N-CMT-4-05-004/18:



“Calidad de materiales asfálticos según su Grado de Desempeño (PG).”

Determinación de la cantidad de agente de reciclaje”.

Los agentes de reciclaje se utilizan para restaurar las propiedades físicas y reológicas degradadas de los asfaltos envejecidos, favoreciendo su uso en un nuevo ciclo de servicio. La presencia de un agente de reciclaje añadido al cemento asfáltico de aporte estará condicionada a los siguientes escenarios:

- Cuando el porcentaje de RAP en la mezcla asfáltica supere el 10%.
- Cuando el porcentaje de RAP en la mezcla asfáltica sea menor o igual al 10% y no se alcance la resistencia al agrietamiento indicado en la sección “*Energía de fractura y propagación de fisuras*”.

$$PGH_{MEZCLA} = ((100 - \%RAP) \times PGH_{BASE}) + (\%RAP \times PGH_{RAP})$$

Ec. (3)

Dónde:

PGH_{MEZCLA} = alta temperatura crítica de falla de la combinación teórica entre el cemento asfáltico envejecido y el cemento asfáltico nuevo de aporte, °C

PGH_{BASE} = alta temperatura crítica de falla del cemento asfáltico de aporte seleccionado, °C

PGH_{RAP} = alta temperatura crítica de falla del asfalto envejecido, °C

$\%RAP$ = porcentaje de RAP participando en la mezcla asfáltica

Estimar la dosis de agente de reciclaje por añadir utilizando la Ecuación 4:

$$Dosis\ rejuvenecedor\ (\%) = (PGH_{MEZCLA} - PGH_{BASE}) / E_{ADT}$$

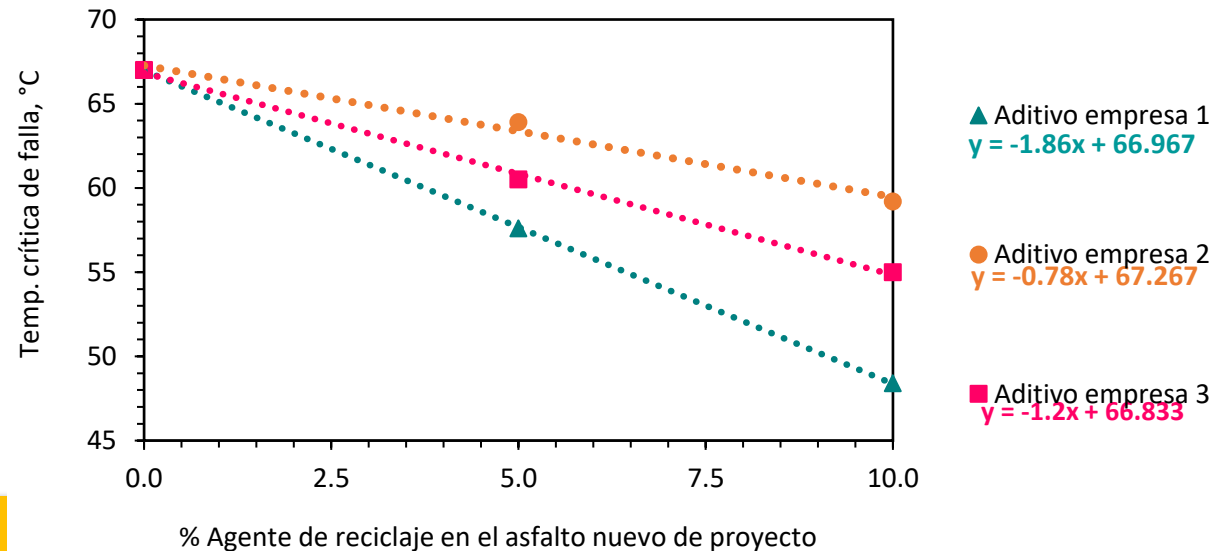
Ec. (4)

Dónde:

PGH_{MEZCLA} = alta temperatura crítica de falla de la mezcla teórica entre el cemento asfáltico envejecido y el cemento asfáltico nuevo de proyecto, °C

PGH_{BASE} = alta temperatura crítica de falla del cemento asfáltico de proyecto seleccionado, °C

E_{ADT} = eficiencia del aditivo, °C/%



CRITERIOS DE EVALUACIÓN REQUERIDOS EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE RAP EN LA MEZCLA ASFÁLTICA E INTENSIDAD DEL TRÁNSITO DE PROYECTO

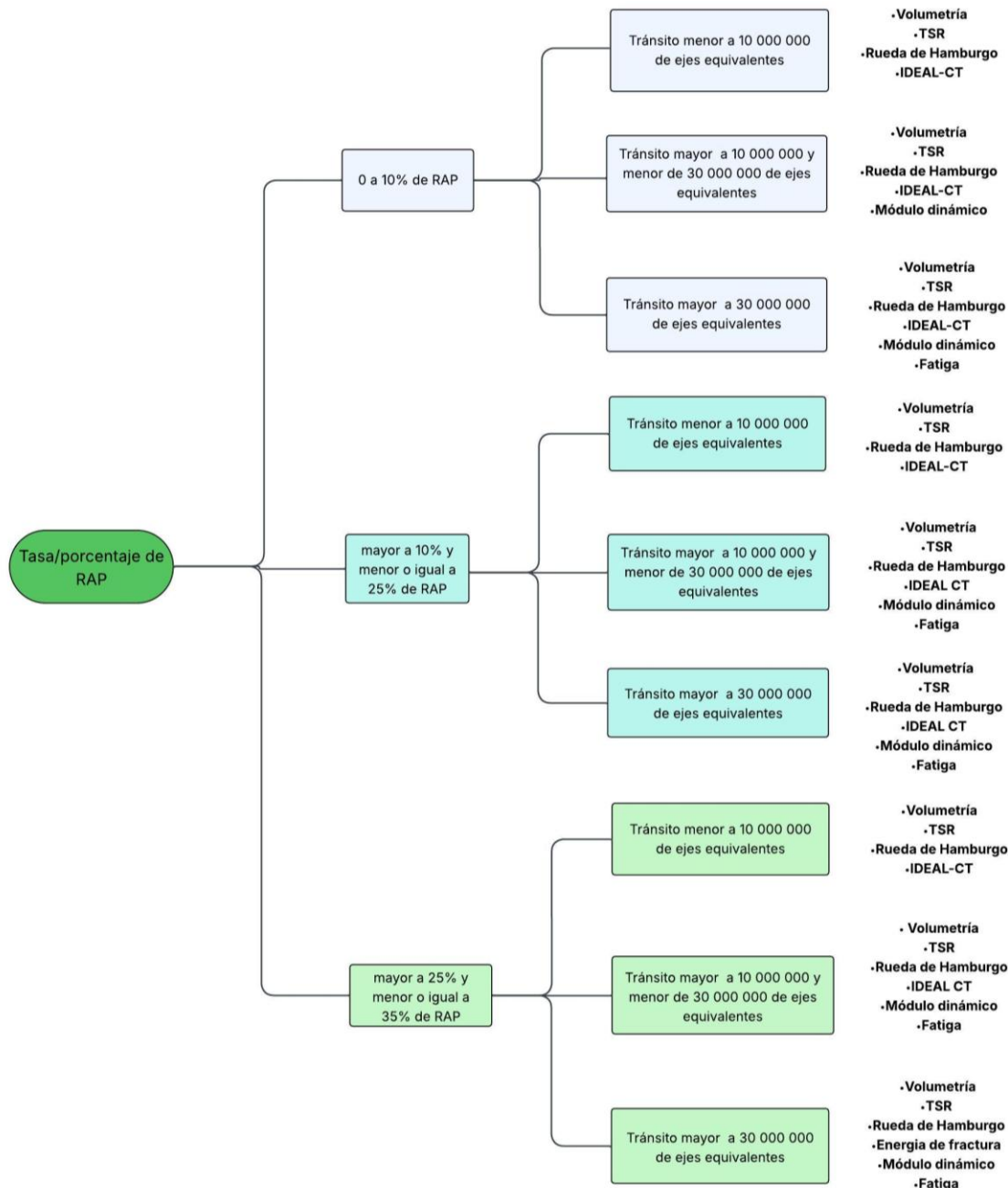
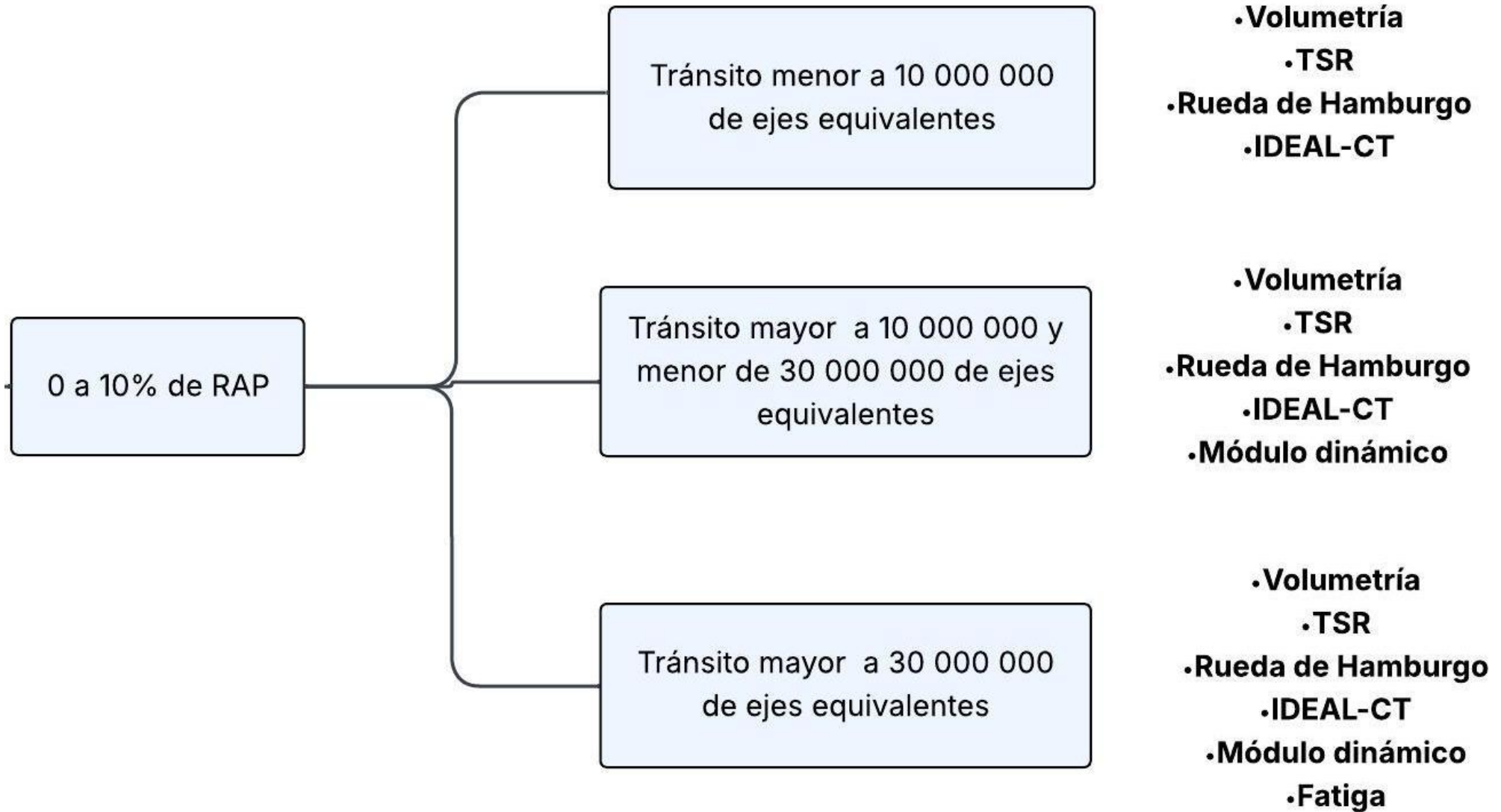
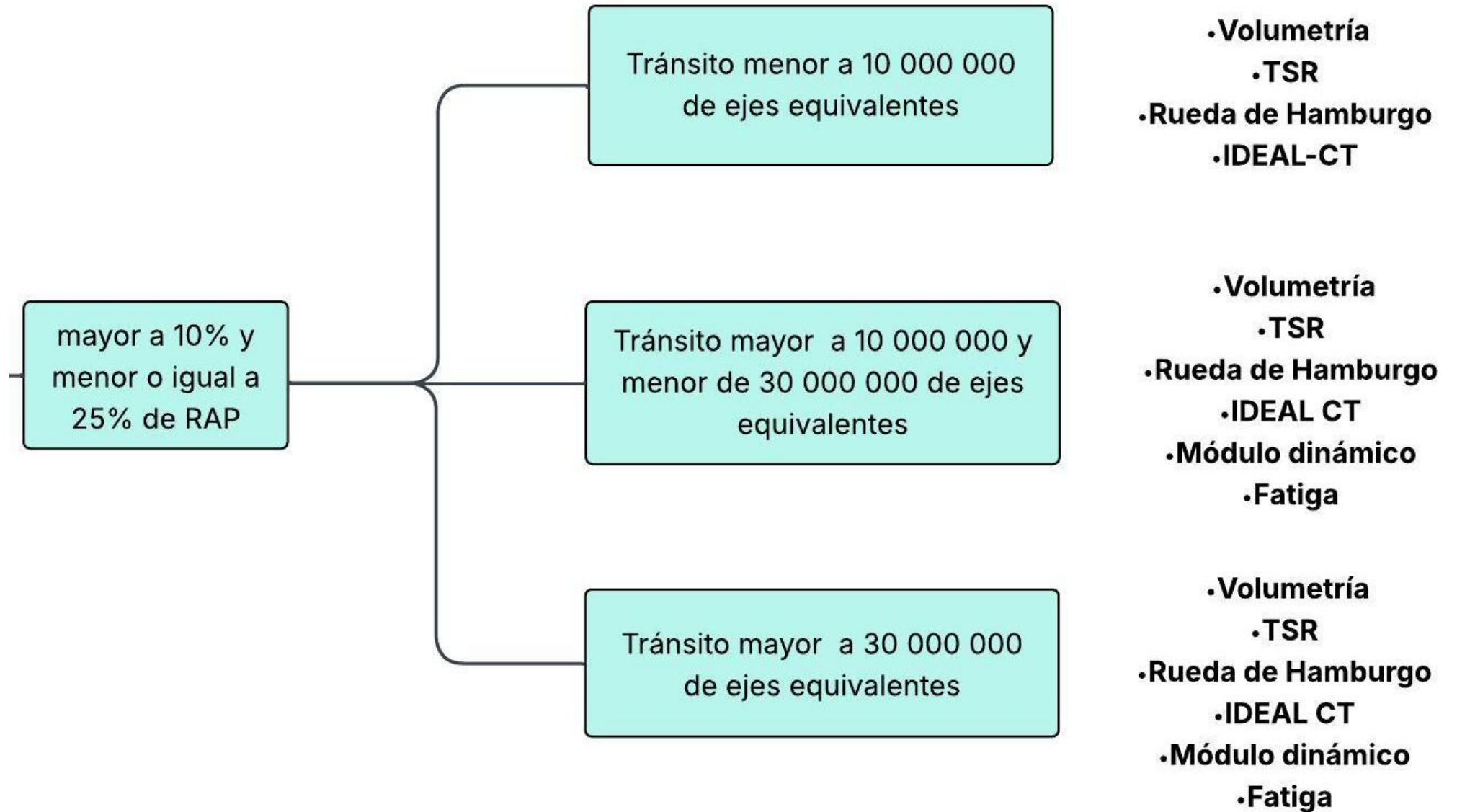
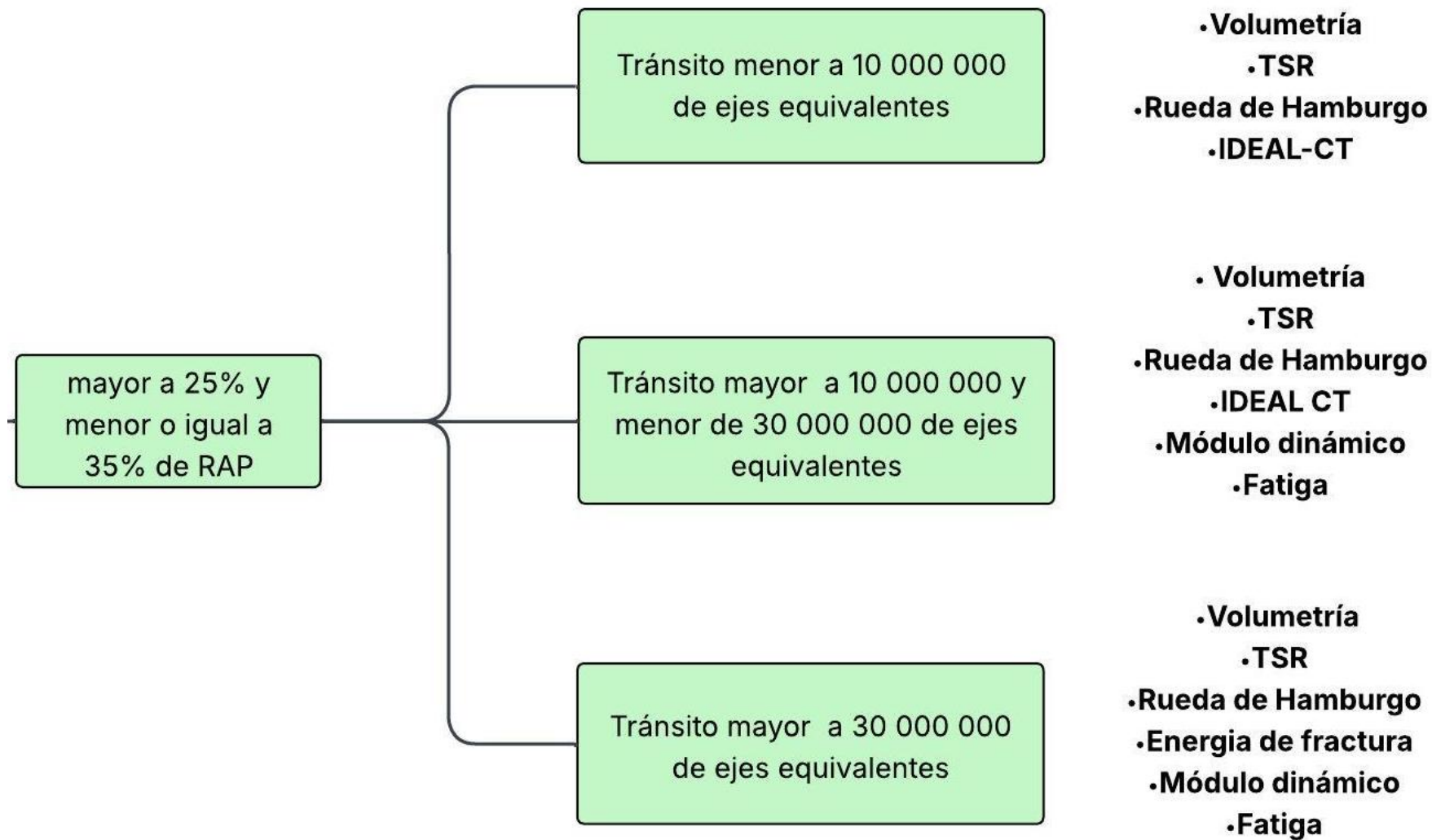


Diagrama de flujo para diferentes tasas o porcentajes de RAP en el que se definen los ensayos recomendados para diferentes niveles de tránsito







DISEÑO VOLUMÉTRICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA

- Energía de compactación considerada durante la determinación del contenido óptimo de asfalto.
- El contenido de asfalto óptimo será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire (V_a) de 4%.

Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica*									
Densidad requerida (% de la gravedad específica teórica máxima-G _{mm})			Vacíos en el agregado mineral mínimo en % - VMA					Vacíos llenos de asfalto en %	Relació n filler asfalto
Nivel de compactación giratoria			Tamaño nominal (mm)						
N-Ini	N-Dis	N-Máx	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5		
≤ 91,5	96.0	≤ 98.0	11	12	13	14	15	65-80	0.6-1.6

Para abordar el uso racional de RAP es importante que la mezcla asfáltica sea simultáneamente resistente tanto al agrietamiento como a la deformación permanente, es decir, un comportamiento balanceado.



**RESISTENCIA AL
AGRIETAMIENTO**



**RESISTENCIA A LA
DEFORMACIÓN
PERMANENTE**

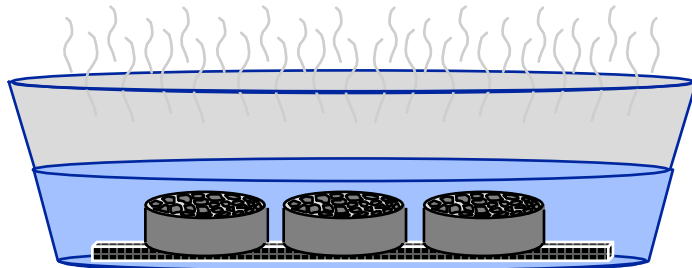


**DISEÑO BALANCEADO
PRUEBAS DE
DESEMPEÑO**

Especificaciones de resistencia al daño inducido por humedad

Propiedad	Estándar de prueba	Especificación	Condición
Resistencia de las mezclas asfálticas al daño inducido por humedad	Recomendación AMAAC RA-04	TSR $\geq 70 \%$	Resistencia a la tracción indirecta mayor a 686 KPa , para pastillas acondicionadas y no acondicionadas
		TSR $\geq 80 \%$	Resistencia a la tracción indirecta mayor a 414 KPa , para pastillas acondicionadas y no acondicionadas

3 especímenes condicionados con vacíos de 7%

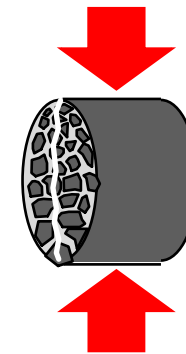


Especímenes saturados al vacío
 Sumergir a 60°C por 24 horas
 Sumergir a 25°C por 2 horas

3 especímenes secos



TSR=

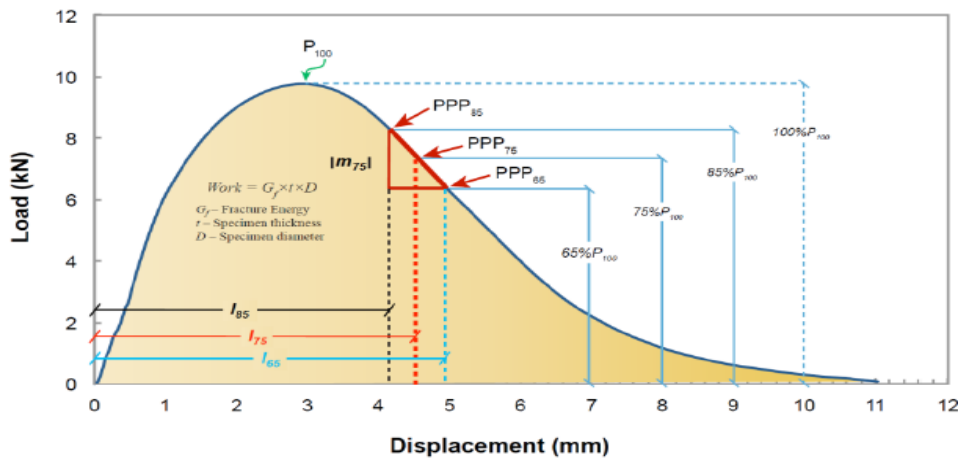


Promedio Resistencia Humeda

Promedio Resistencia Seca

Ideal Cracking Test (Ideal-CT)

- Indicador de si la mezcla es susceptible al agrietamiento ocasionado por las cargas.
- Podemos realizarla a probetas compactadas en laboratorio o extraídas de campo.



ASTM
D8225

Utilizada
en el BMD

7% vacíos
de aire

62 mm
(altura),
150 mm
(diámetro)

Carga de
25 kN a
50
mm/min

Registrar
carga y
desplazamiento
o
@ 25 °C

$$G_f = \frac{W_f}{D * t} * 10^6$$

$$CT_{index} = \frac{t}{62} * \frac{l_{75}}{D} * \frac{G_f}{|m_{75}|} * 10^6$$

Ideal Cracking Test (Ideal-CT)

Para evaluar el potencial de agrietamiento en la mezcla asfáltica deberá emplearse el ensayo de energía de fractura

Propiedad	Estándar de prueba	Especificación
Índice de tolerancia al agrietamiento (IDEAL-CT)	ASTM D8225	80, Mín.

para este ensayo se recomienda realizar una evaluación comparando una mezcla con el 100% de agregados vírgenes (como referencia), y la mezcla con el porcentaje de RAP deseado. La relación de resistencia deberá ser de al menos 70% con respecto al valor obtenido en la mezcla con el 100% de agregados vírgenes.

Ideal Cracking Test (Ideal-CT)

El objetivo de este trabajo es evaluar la repetibilidad y reproducibilidad del método de prueba IDEAL-CT. Analizando sus variables principales como carga pico (KN), pendiente post pico (N/mm), energía de fractura (J/m^2) y el Índice de agrietamiento o Index-CT. Así como la capacidad técnica de los laboratorios participantes para ejecutarla.



Estudio Interlaboratorio de la prueba de agrietamiento IDEAL-CT



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

@AMAACmx

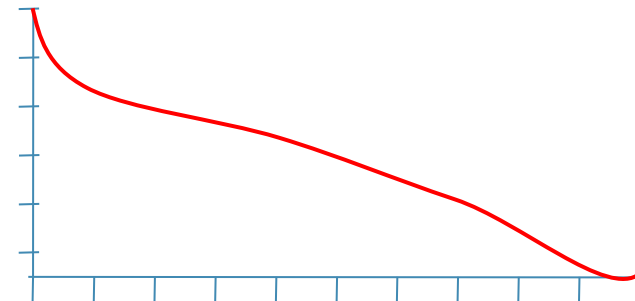
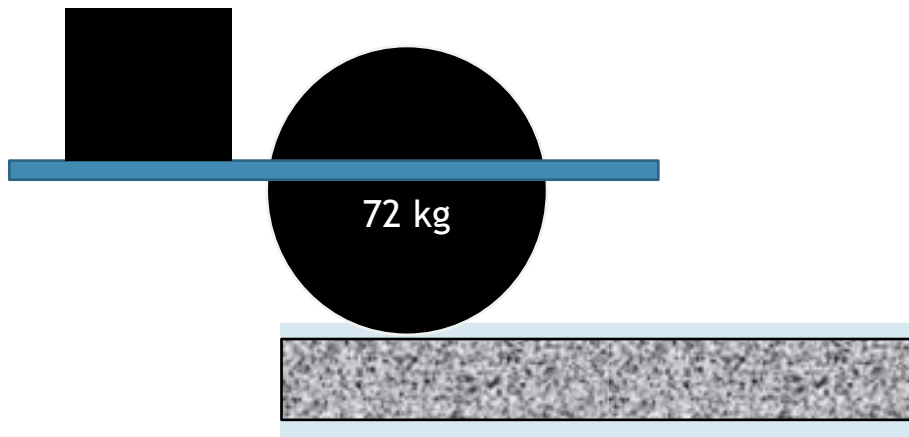
<http://www.amaac.org.mx>



Susceptibilidad a la deformación permanente

Propiedad	Estándar de prueba	Especificación
Pasadas mínimas para la deformación máxima de 10.0 mm en Rueda Cargada de Hamburgo	Recomendación AMAAC RA-01	20, 000

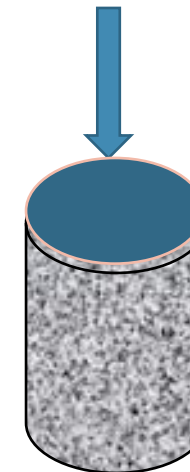
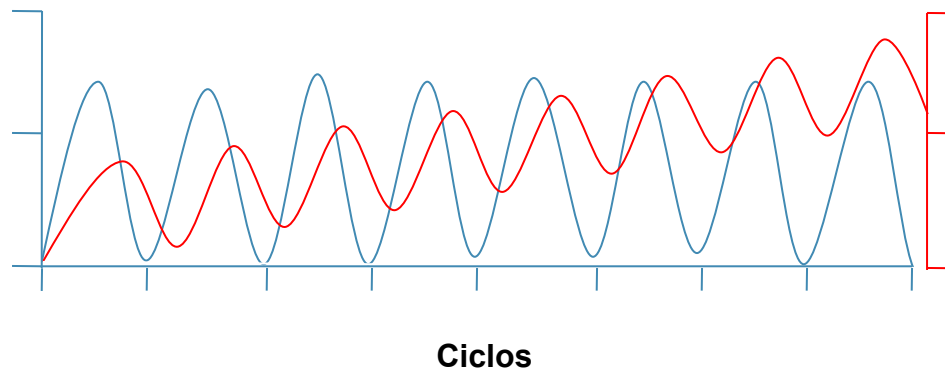
Rueda cargada de Hamburgo



Módulo dinámico

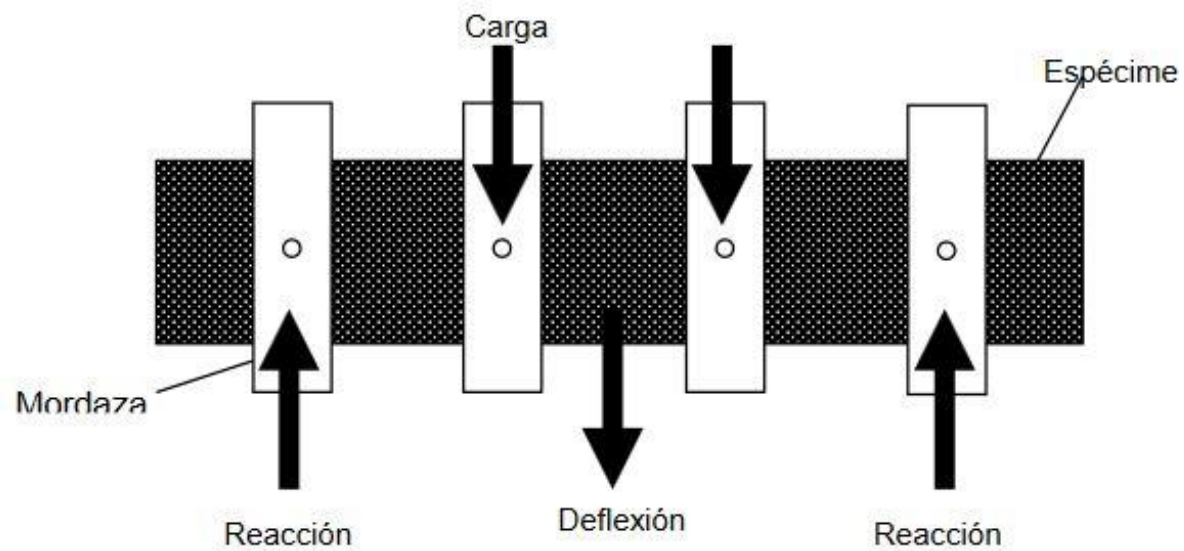
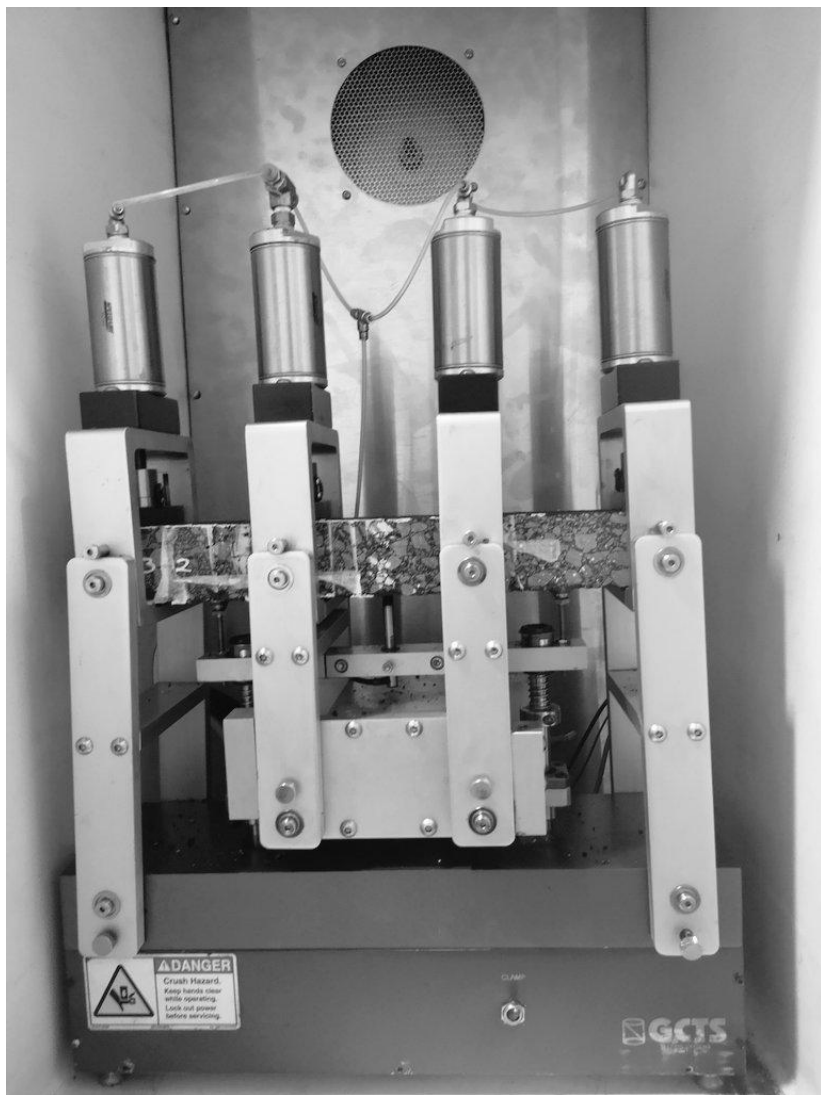
El módulo dinámico (E^*) de una mezcla asfáltica es un parámetro esencial **para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica** en los nuevos métodos de diseño de pavimentos empírico-mecanicista. Se recomienda determinarlo con base en el **procedimiento AASHTO TP62**, debiendo reportarlo sistemáticamente a una **temperatura de referencia de 20°C y frecuencia de 10 Hertz**. Adicionalmente, se deberá complementar el informe con los datos obtenidos a las frecuencias 0.1, 0.5, 1.0, 5.0 Hz

Propiedad	Estándar de prueba	Especificación
Módulo dinámico $ E^* $, MPa	AASHTO T342	5 000, Mín.

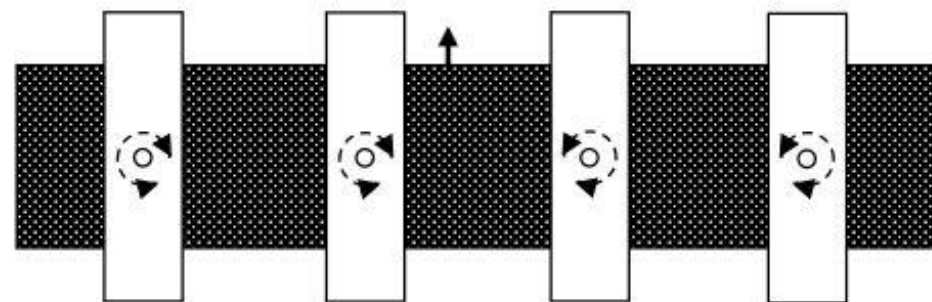


Para determinar la resistencia a fatiga de la mezcla asfáltica reciclada se debe emplear la viga a flexión en cuatro puntos.

Propiedad	Estándar de prueba	Especificación
Ley de fatiga a 20°C y 10 Hz		
Repeticiones de carga a la falla, N_f @400 $\mu\epsilon$	AASHTO T321	1 000 000, Mín.
Repeticiones de carga a la falla, N_f @550 $\mu\epsilon$		150 000, Mín.
Repeticiones de carga a la falla, N_f @700 $\mu\epsilon$		23 000, Mín.
Límite de Resistencia a la fatiga, FEL $\mu\epsilon$ ⁽²⁾		> 180
[1] Utilizando tipo de onda sinusoidal y criterio de falla clásico (50% reducción de rigidez inicial).		
[2] Determinado mediante la recomendación del reporte NCHRP-646, apéndice A		
[3] Se recomienda realizar al menos 3 réplicas para cada nivel de deformación		



Regresa a su posición original



Agradecimientos

Comité técnico de materiales reciclados-AMAAC

Integrantes:

Leonardo Ambrosio Ochoa Ambriz
Alfonso Díaz Pichardo
Eliceth Lljaira Roa Hernández
Carlos Humberto Fonseca Rodríguez
Domingo Pérez Madrigal
Laura Cabello Suarez
Luis Guillermo Diaz Felix
Luis Angel Lio
Alejandro Castellanos

Coordinador

Rey Omar Adame Hernández

Coordinador de apoyo

Pedro Limón Covarrubias



Agradecimientos



Leonardo Ochoa



Pedro Limón



Omar Adame



Alfonso Diaz

¡ muchas gracias!

Ponente: Rey Omar Adame Hernández

Contacto: omar.adame.hdez85@gmail.com