

Evaluación de mezclas con alto contenido

Tema: RAP: análisis comparativo de normas alemanas y las normas estadounidenses



Dr.-Ing. Telma Keppler

xx de agosto 2025



Evaluación de mezclas con alto contenido RAP: análisis comparativo de normas alemanas y las normas estadounidenses

Dr.-Ing. Telma Keppler



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

CONTENIDOS



01

Historia de la reciclaje

02

Reutilización del RAP por país

03

Ventajs y razones para reciclar

04

Problemas y fuentes de errores

05

Estudios de tecnologia: Metodo Alemán y Estadounidense

06

Inversiones/ Conclusiones

Historia da reciclage de asfalto

Economia Linear



- Extracción de materias primas (áridos, betún)
- Producción de asfalto
- Uso en carreteras
- Eliminación en vertederos

Problemas:

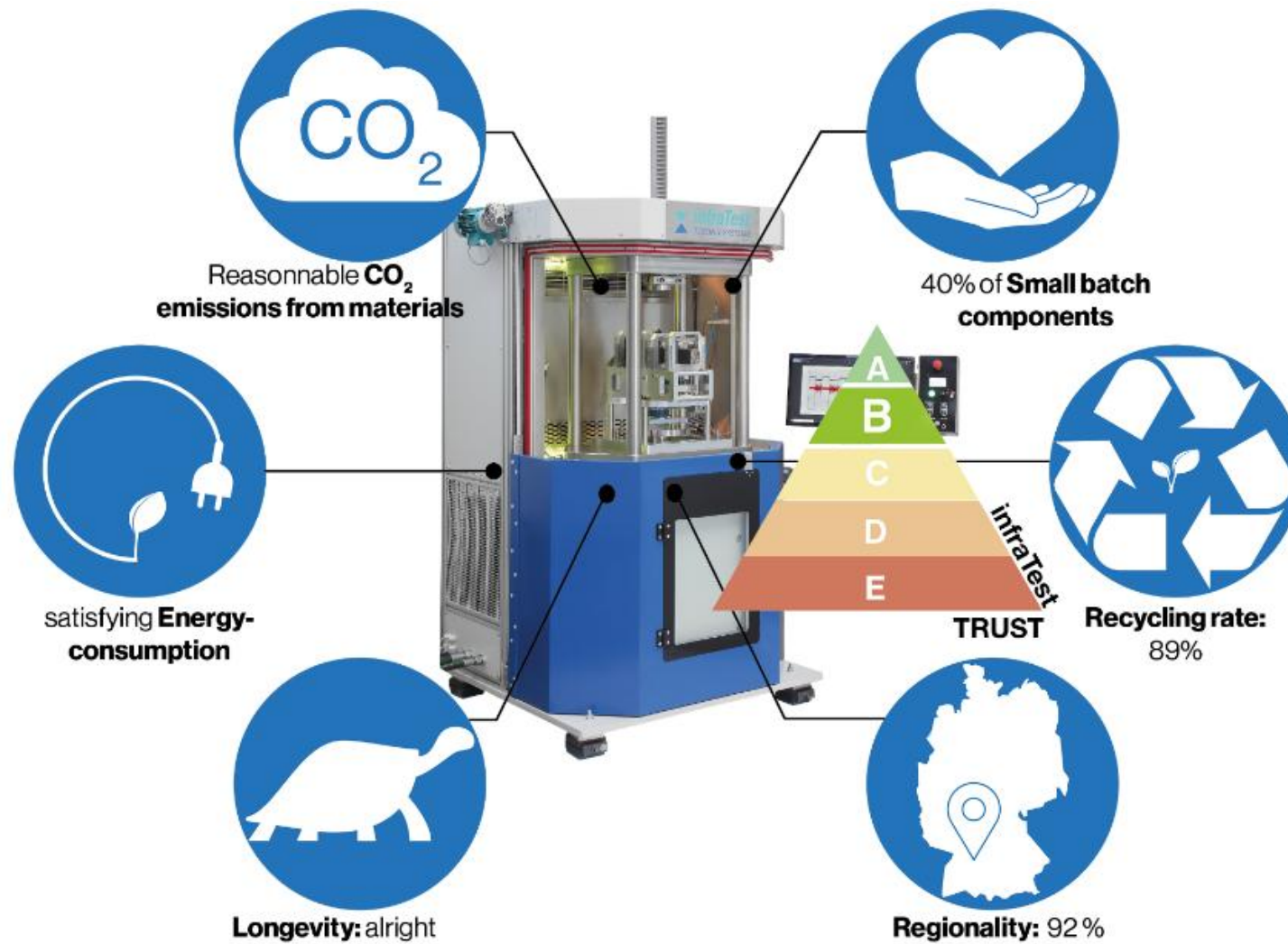
- ! Consumo excesivo de recursos
- ! Generación de residuos
- ! Altos costes y emisiones de CO₂

Economia Circular



-  Extracción y remoción controlada
-  Procesamiento en material granulado reciclado
-  Producción de nuevas mezclas asfálticas
-  Reutilización en pavimentos de alta calidad

Filosofia





En la *década de 1950/60* había más de 50.000 vertederos en Alemania

creación de la eliminación ordenada: Comienzo del fin del vertido

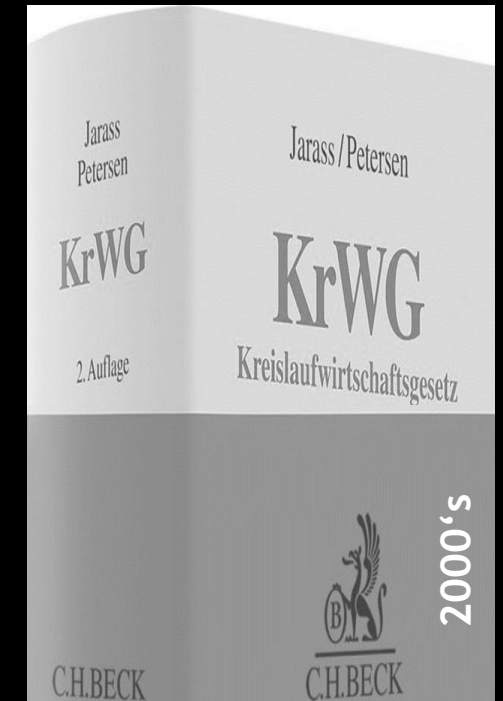
Vertidos - así fue la eliminación de residuos en muchos lugares de Alemania en *la década de 1970*.



1990's La era de la creación de leyes de residuos comienza la historia de la economía circular.

1980's - la edad de separación de residuos:

Comienza la historia del reciclaje!



2000's Clasificación de la nueva jerarquía de residuos de cinco niveles (artículo 6 de la Ley de Economía Circular - KrWG):

Jarass
Petersen
KrWG

2. Auflage

C.H.BECK

Jarass / Petersen
KrWG

Kreislaufwirtschaftsgesetz



2000's

El reciclaje y la reutilización se convierten en *leyes federales*

Kreislaufwirtschaftsfallgesetz

- ✓ ¡Evitar el desperdicio es una necesidad!
- ✓ Los productores que posean residuos están obligados a reciclar sus residuos
- ✓ La valorización de los residuos se lleva a cabo adecuadamente de conformidad con las disposiciones de la presente Ley y otras leyes públicas.
- ✓ Debe cumplirse la obligación de recuperar los residuos.

Historia da reciclage de asfalto



- 1984 - Capas de base con 25% AG
- 1996 - Primera Ley de Economía Circular
- 1996 - Top layers con 15% AG
- 2007 - AC/ SMA top layers con 20% AG
- 2025 - 40 años de tecnologia „State of art “

Adición de asfalto reciclado para cada tipo de asfalto y capa

	1983	1992	1996	2005	2007	2009	2025
AC T	25%	50%	50%	60%	60%	100%	100%
AC B N		20%	20%	40%	40%	50%	50%
AC B S	-	-	20%	40%	40%	50%	50%
AC D	-		15%	40%	40%	40%	40%
MA	-	-	15%	40%	30%	30%	30%
SMA	-	-	-	30%	20%	20%	30%



- AC D - 4 cm - Top layer
- 8 cm - Binder layer
- AC T - 22 cm - Base
- 15 cm - Sub base



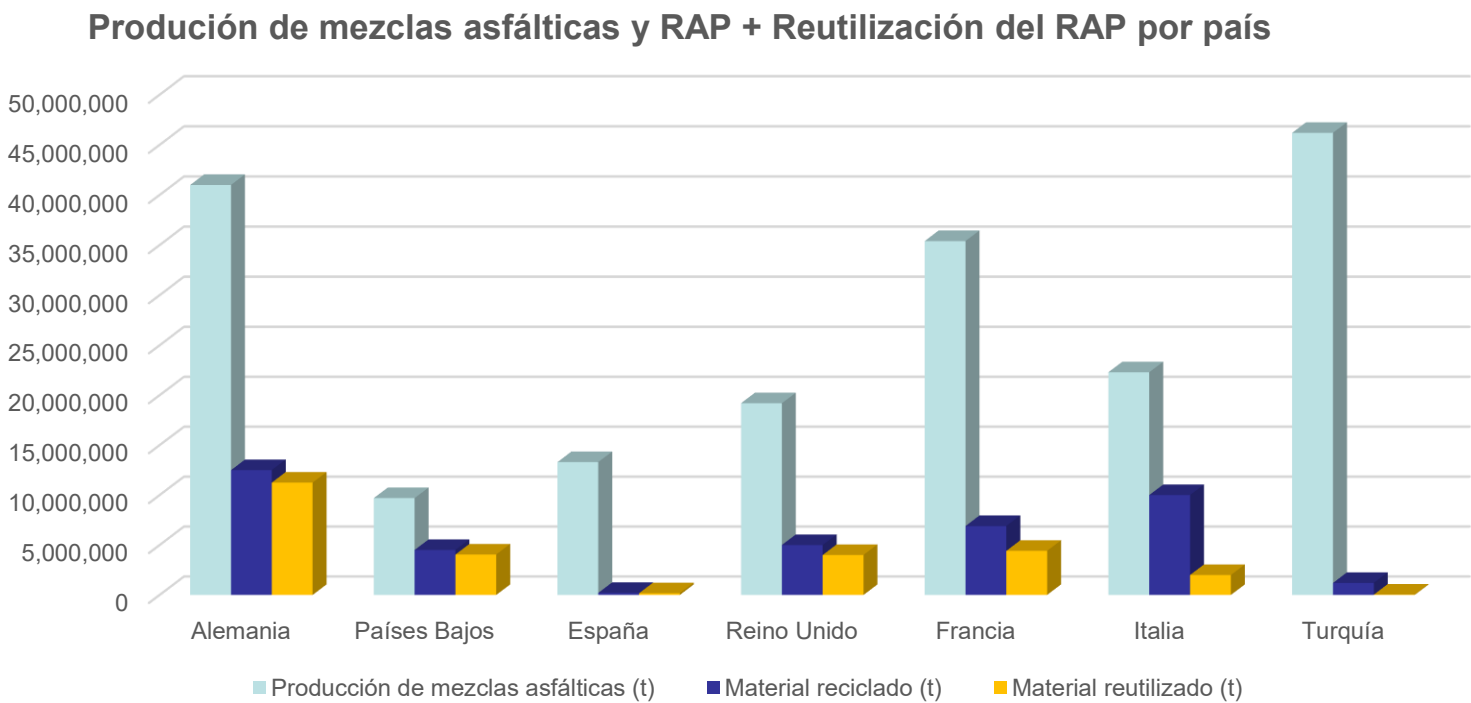
Red alemana de carreteras

Las carreteras en Alemania están muy congestionadas debido al alto nivel de tráfico

~ 2 mil millones de kilómetros recorridos en el año



Reutilización del RAP por país



País	Producción de mezclas asfálticas (t)	Material reciclado (t)	Material reutilizado (t)	%
Alemania	41.000.000	12.500.000	11.250.000	90
Países Bajos	9.700.000	4.500.000	4.050.000	90
España	13.300.000	205.000	174.250	85
Reino Unido	19.200.000	5.000.000	4.000.000	80
Francia	35.400.000	6.900.000	4.416.000	64
Italia	22.300.000	10.000.000	2.000.000	20
Turquía	46.200.000	1.200.000	36.000	3

Alemania y Países Bajos alcanzan ~90% de reutilización del RAP.

Reutilización de Asfalto: (Asphalt re-use) y (Asphalt recycling)



Aspecto	Reutilización de Asfalto (Asphalt re-use)	Reciclaje de Asfalto (Asphalt recycling)
Definición técnica	Incorporación de RAP en mezclas asfálticas nuevas conservando funciones originales.	Uso de RAP en aplicaciones con función estructural diferente o inferior.
Objetivo técnico	Sustitución de materiales vírgenes sin comprometer propiedades mecánicas.	Aprovechamiento volumétrico del material sin requerimientos de mezcla ligada.
Función del ligante	Conserva su papel de ligante cohesivo en la matriz asfáltica.	Ya no actúa como ligante estructural, o lo hace de forma mínima.
Función de los áridos	Actúan como estructura mineral en la mezcla asfáltica ligada.	Funcionan solo como material granular o de relleno.
Relevancia en especificación	Requiere diseño de mezcla, ajuste de ligante y control de calidad estrictos.	Enfoque en clasificación y granulometría, menor control sobre propiedades ligadas.

Ventajas de la reutilización de RAP

✓ Reducción de costes de materiales y de construcción

❖ Agregado total para 41 mio T: $41 \times 0,95 \times 30 = 1.170 \text{ Mio €}$

❖ Ligante total para 41 MioT = $41 \times 0,05 \times 600 = 1.230 \text{ Mio €}$

Producción reciclado = 12,5 MioT

Tasa de reutilización = 90% = ~ 11% MioT

❖ Agregados ~95% a 30 €/T = $11 \times 0,95 \times 30 = \sim 300 \text{ Mio €}$

❖ Ligante ~5% a 550 €/T = $11 \times 0,05 \times 600 = \sim 300 \text{ Mio €}$

❖ Valor del asfalto reciclado : 2 €/ T

❖ Valor total del asfalto reciclado reutilizado = $2 \times 11 = 22 \text{ Mio €}$

ECONOMÍA ANUAL ~ 550 Mio€ o 25%



Ventajas de la reutilización de RAP

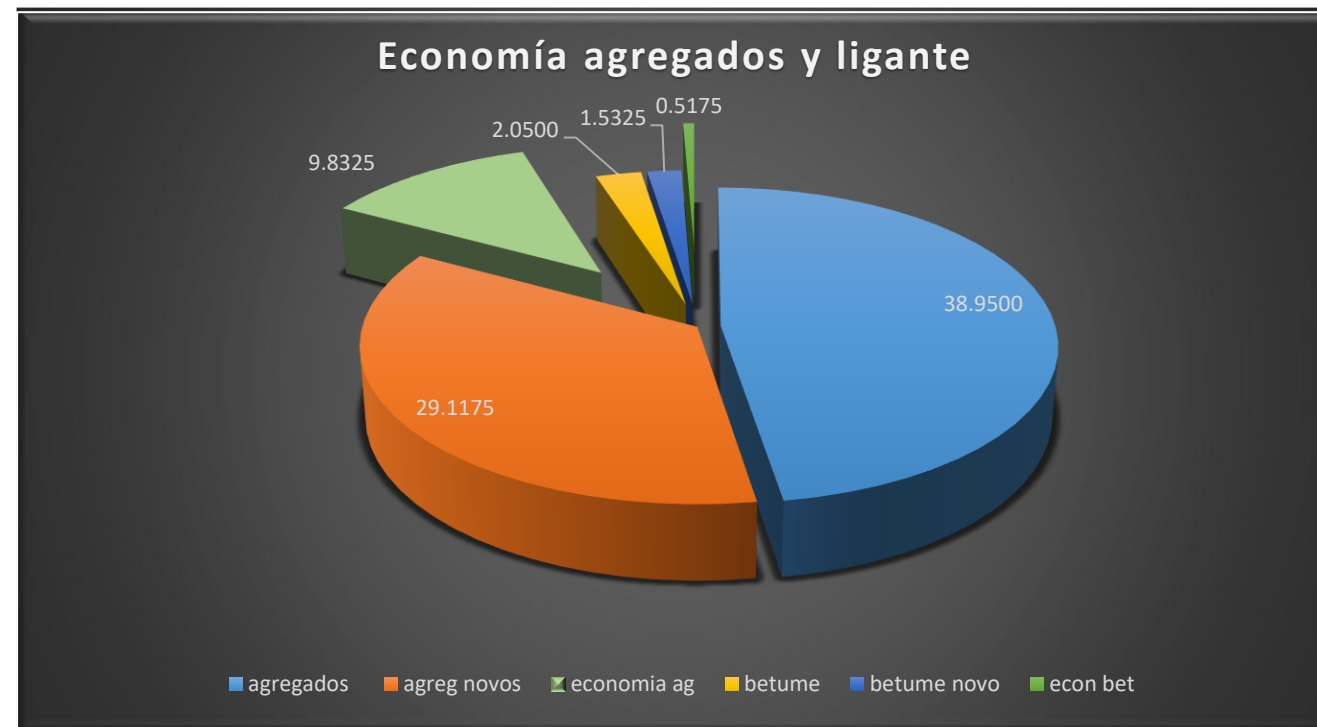
- ✓ Protección y conservación de los recursos naturales

Economía agregados y ligante asfáltico

Producción mezclas = 41 MioT
Producción reciclado = 12,5 MioT

Tasa de reutilización = 90%

Economía Agregados: 10,5 Mio T



Economía Ligante asfáltico: 550.000 T

Razones para reciclar

- Legislación restrictiva (razones medioambientales, eliminación de residuos).
- Mayor restricción en el uso de materiales vírgenes (costo, disponibilidad).
- Costes - reducción y optimización de los recursos



Razones para reciclar

Notas de la Agencia Federal de Medio Ambiente (BMU) sobre el reciclaje de asfalto

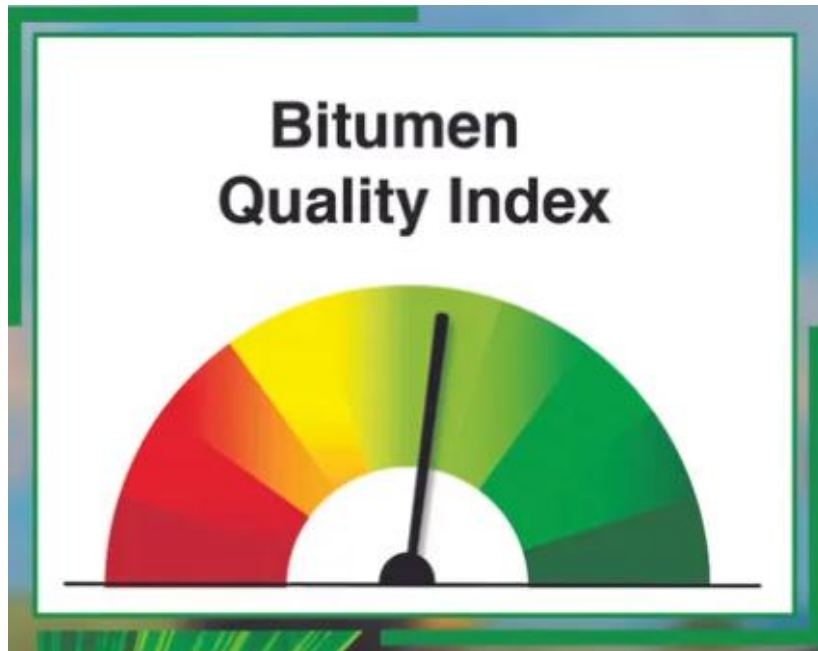
Mezclas asfálticas son 100% reciclables



<https://www.umweltbundesamt.de/asphaltgranulat#hinweise-zum-recycling/>

Desafíos: el largo camino de lo viejo a lo nuevo

¿Y por qué no se utiliza cada vez más el llamado pavimento asfáltico recuperado (RAP, por sus siglas en inglés) para la construcción de nuevas carreteras?



Porque los problemas son desafiantes

Problemas y fuentes de errores

- 1- Las mezclas asfálticas pueden contener alquitrán
- 2- Las mezclas asfálticas son extremadamente complejas
- 3- ¿qué es RAP?
- 4- Adaptaciones en planta
- 5- Almacenamiento (Eficiencia energética)
- 6- Falta de pruebas de calidad

Problemas y fuentes de errores

1- Las mezclas asfálticas pueden contener alquitrán -Limita la reutilización; requiere análisis químicos (fenol, PAH) y pruebas rápidas con fluorescencia UV o lámpara de detección.

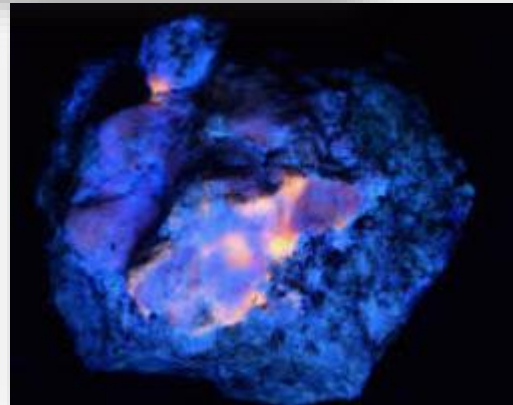


Extractor de núcleo



Análisis químico

Problemas y fuentes de errores



RC-1: PAKEPA16 ≤ 10 mg/kg
RC-2: PAKEPA16 ≤ 15 mg/kg
RC-3: PAKEPA16 ≤ 20 mg/kg

Problemas y fuentes de errores

2- Las mezclas asfálticas se han convertido en mezclas extremadamente complejas -Incluye aditivos, fibras, pigmentos, caucho, polímeros; riesgo de contaminantes como plásticos o metales.



Problemas y fuentes de errores

3- ¿qué es RAP?

Procede de capas con distintas edades y granulometrías; difícil homogeneidad y cumplimiento de requisitos técnicos.



Problemas y fuentes de errores

Celulosa



Plastico



Membrana para tejados autoadhesiva (RUBBER)



Metal



Fibra de vidrio



Guante



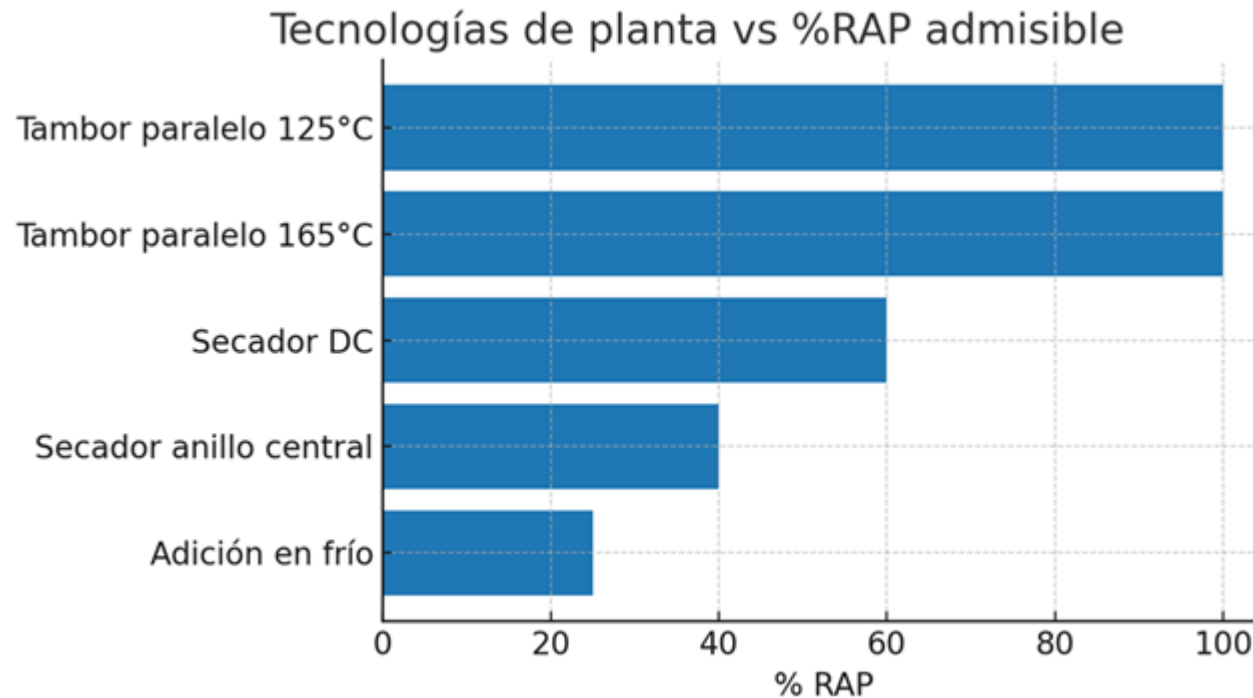
Problemas y fuentes de errores

¿qué es RAP? Diferentes capas:



Problemas y fuentes de errores

4 - Adaptaciones en planta - Cambios tecnológicos para dosificar y calentar RAP sin deteriorarlo ni envejecer el ligante



Adición en frío: hasta ~25%.

Adición en anillo central: hasta ~40%

Adición en secador DC: hasta ~60%



Tambor paralelo optimizado: hasta 100%

Fuente:



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

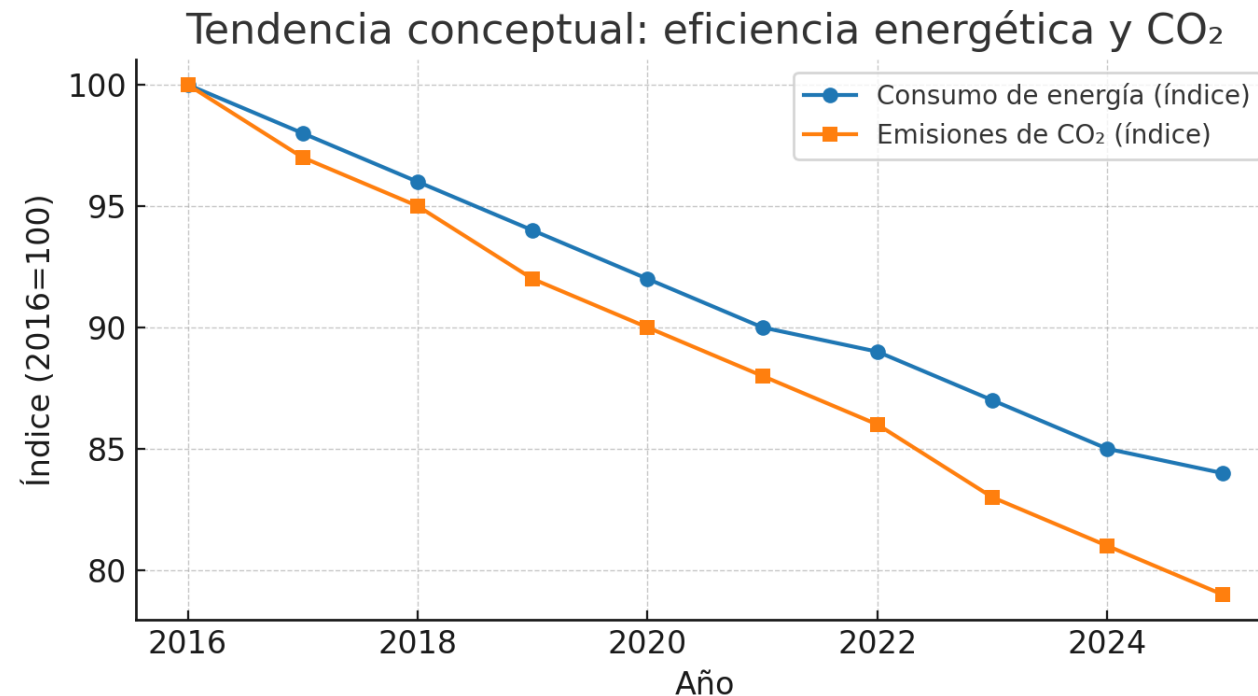
@AMAACmx

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



Problemas y fuentes de errores

5- Almacenamiento (Eficiencia energética y CO₂) - Separar tipos de RAP; controlar granulometría y calidad del ligante; contribuye al ahorro de energía y reducción de CO₂.



Ahorros eléctricos por mejoras de proceso.

Problemas y fuentes de errores

6- Falta de pruebas de calidad

La ausencia de protocolos normalizados para verificar la homogeneidad, el contenido de ligante, la presencia de contaminantes y las propiedades mecánicas genera incertidumbre en el desempeño de la mezcla final.

Controles previos son extremadamente importantes para garantizar que el material reciclado cumpla con los requisitos técnicos y normativos, evitando fallos prematuros en el pavimento.

Estudios de tecnología de los materiales

REUTILIZACIÓN DE ASFALTO Y COMPARACIÓN DE LOS CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE REUTILIZACIÓN DEL RAP EN LA NUEVA MEZCLA

MÉTODO ALEMÁN (HOMOGENIZACIÓN)

Método Alemán (Homogeneización)

Procedimiento:

- Recolección y acopio
- Pretratamiento
- Clasificación
- Control de calidad



tamiz grueso 8/16



tamiz fino 0/8



Reglamentos técnicos

Resumen técnico - Normas y guías para mezclas asfálticas (Alemania / UE)

- **EN 13108-1:** Norma europea para mezclas asfálticas tipo **AC (asphalt concrete)**.
- **EN 13108-8:** Norma europea para el uso de **RAP (asfalto reciclado)** en mezclas nuevas.
- **TL Asphalt-StB:** Requisitos técnicos para el suministro de mezclas asfálticas.
- **TP Asphalt-StB:** Métodos de **ensayo y verificación** de mezclas y materiales.
- **MWA:** Guía técnica alemana para la **reutilización segura del RAP**, con criterios técnicos y ambientales.
- **ZTV Asphalt-StB:** Directrices para la **ejecución en obra** (colocación, compactación, control).



Método de homogeneización

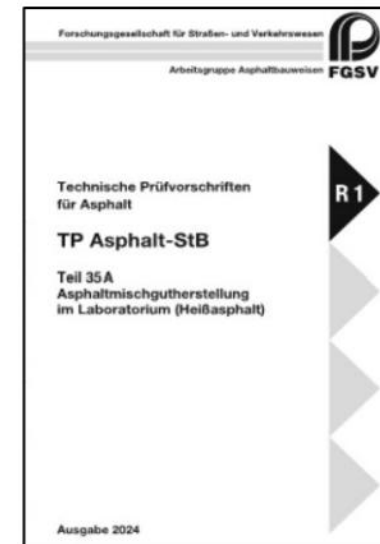
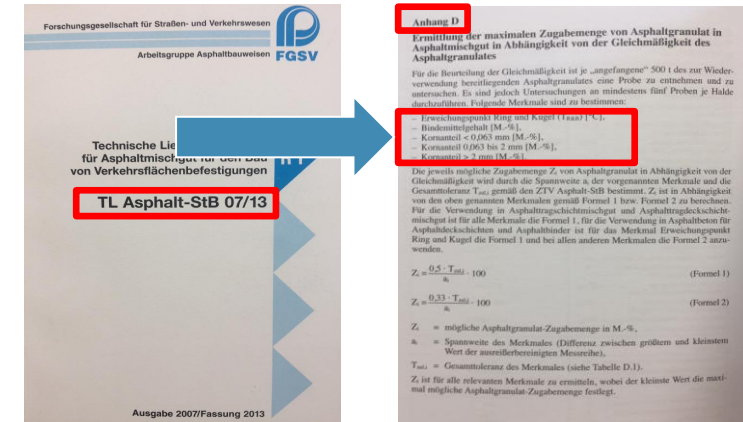
Método de homogeneización

1. Caracterización de RAP (TL y TP Asphalt StB)

TL define los requisitos de suministro - el RAP debe clasificarse por fracciones granulométricas y almacenarse por separado para garantizar la homogeneidad

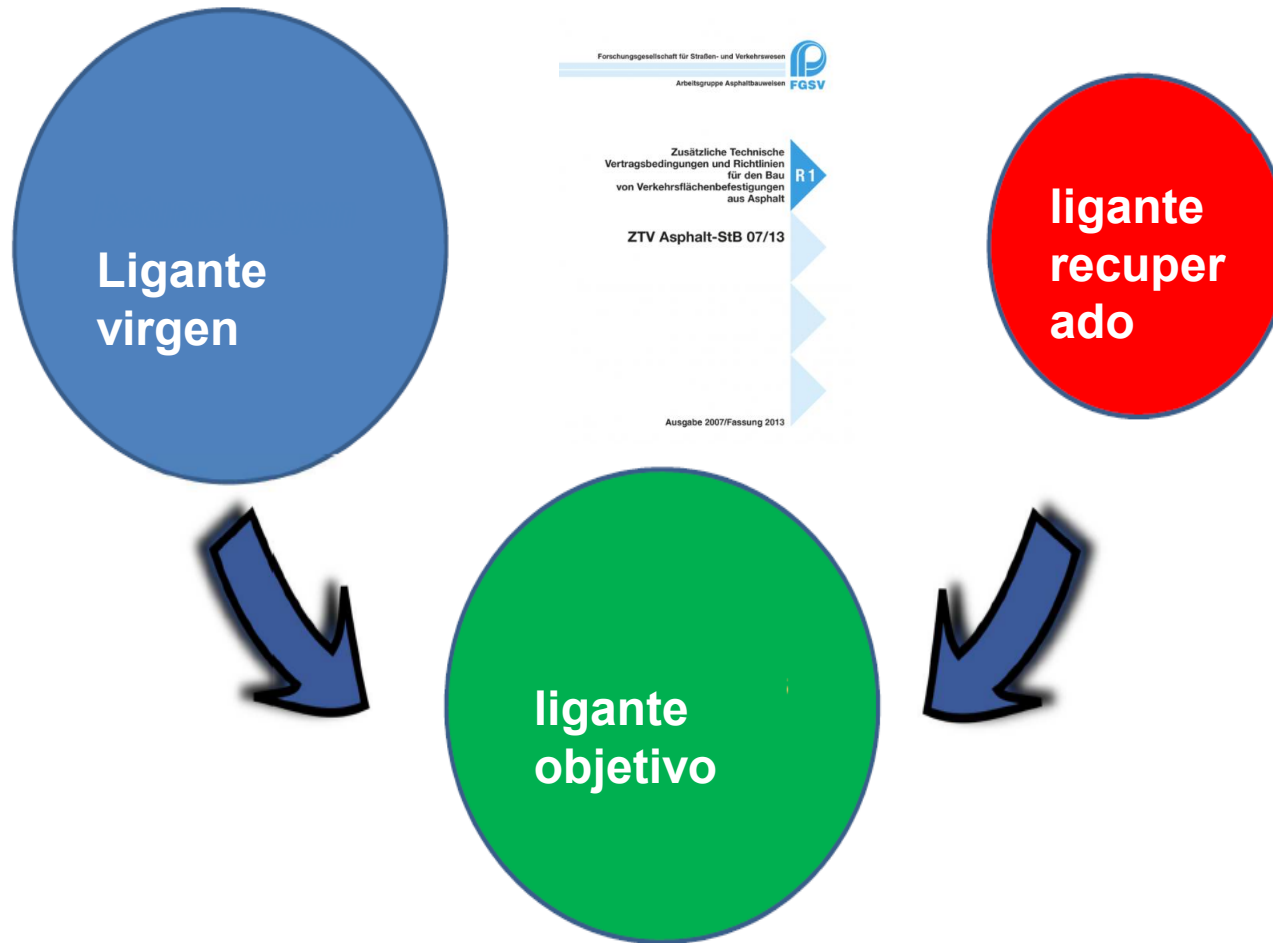
TP establece como ensaiar:

Determinación de la granulometría
Extracción y recuperación de ligante del RAP
Ensayos de ligante recuperado (penetración, punto de ablandamiento, DSR)



Método de homogeneización

2. ZTV - Asphalt- StB + TL - Definición del ligante objetivo



ZTV - Asphalt- StB + TL - exige que la mezcla final cumpla con los requisitos de la capa prevista
Define el ligante objetivo que debe resultar de la combinación del ligante virgen con el ligante del RAP

Cáculo de compatibilidad:
La proporción de RAP se ajusta de modo que el ligante final recuperado de la mezcla esté dentro del rango de especificación exigido en la TL

Punto de ablandamiento del ligante resultante

TL Asphalt-Stb 07

$$TR\&B_{mix} = a \cdot TR\&B1 + b \cdot TR\&B2$$

dónde

TR&Bmix = Punto de ablandamiento del ligante en la mezcla final (definido en el proyecto).

TR&B1 = Punto de ablandamiento del ligante recuperado del RAP (debe ser calculado).

TR&B2 = Punto de ablandamiento de referencia del ligante nuevo (que puede ser el valor promedio del rango de calidad previsto para el ligante, o El punto de ablandamiento determinado para el uso previsto del ligante modificado (PvB)).

a y b = proporciones de masa del ligante del RAP (a) y el ligante deseado (b),
donde $a + b = 1$.



Método de homogeneización

3. Determinación del porcentaje de RAP



$$Z_{\text{mög}} = \frac{\text{const} \cdot T_{\text{zul}}}{a_{\text{max}}} \cdot 100$$

Zusätzliche Technische
Vertragsbedingungen und Richtlinien
für den Bau
von Verkehrsflächenbefestigungen
aus Asphalt

R 1

ZTV Asphalt-StB 07/13

Ausgabe 2007/Fassung 2013

Z_{mög}: porcentaje máximo posible de RAP

T_{zul}: tolerancia total permitida de acuerdo con el Standard **ZTV Asphalt-StB**

a_{max}: intervalo (contenido de ligante, fracciones de áridos <0,063 mm(filler); 0,063 - 2 mm (arena); > 2 mm (grava); anillo y bola

const = 0,5 para capas de base intermedia (*binder*), base y subbase

const = 0,33 para capas de rodadura (*revestimiento*)

Muestras

Al menos 5 (AC T) o 9 (AC D) muestras de cada 500 toneladas de un "iniciado"

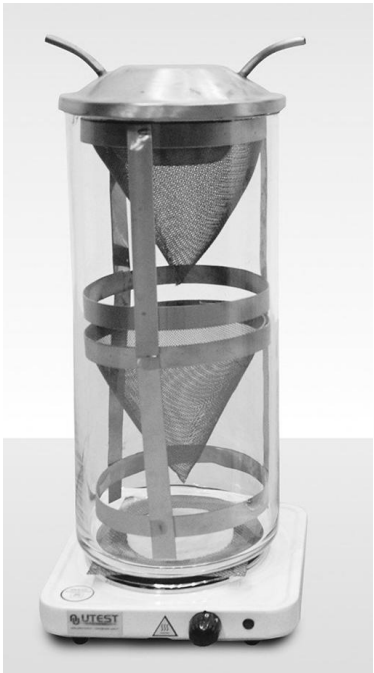


RAP: extraer para saber

Estimar las propiedades de RAP y ligante envejecido en RAP.



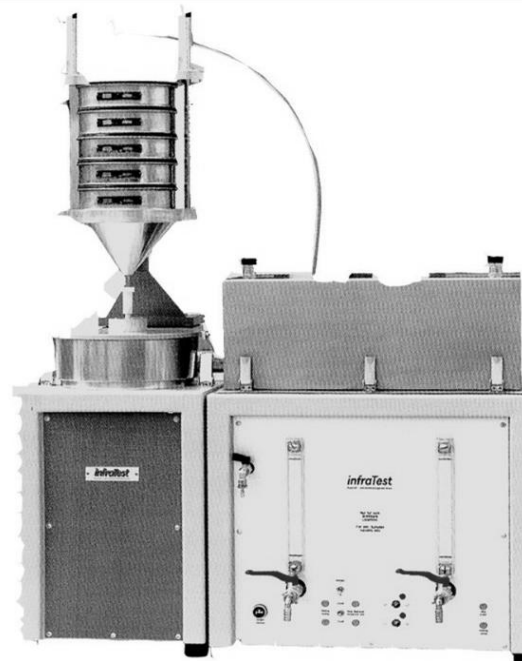
Recuperación el ligante del RAP - Diferentes tecnologías



1929



1986



1996



1997

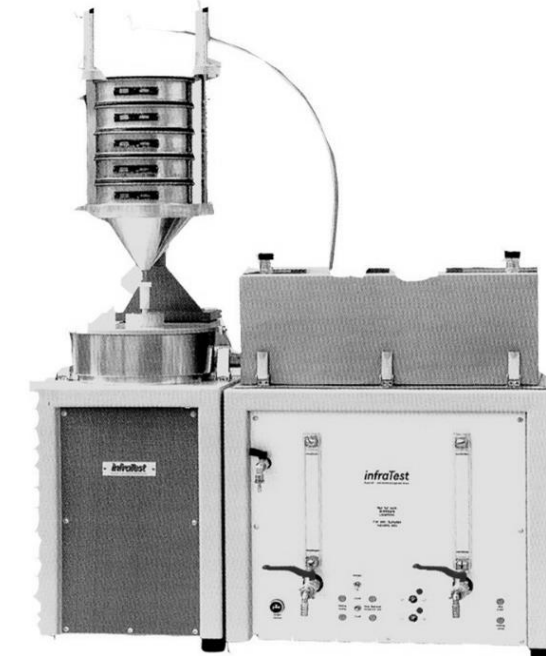
Recuperación el ligante del RAP - Diferentes tecnologías



1929



1986



1996



1997

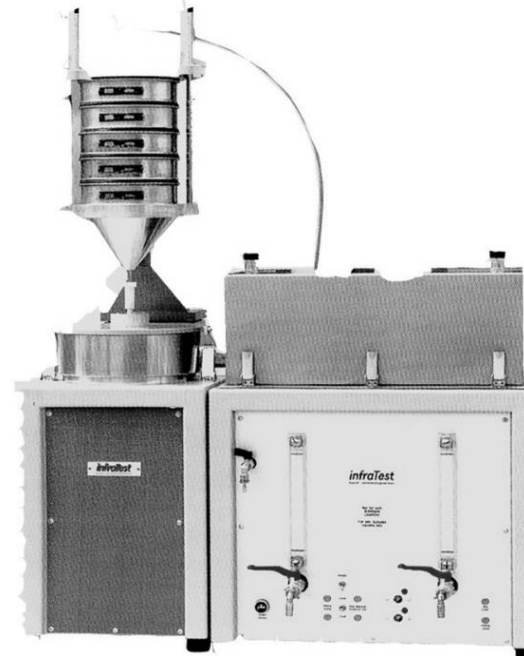
Recuperación el ligante del RAP - Diferentes tecnologías



1929



1986



1996



1997

DIN 1996 T6

AASHTO T 164

Recuperación el ligante del RAP - Diferentes tecnologías



1929



1986



1996



1997

DIN 1996 T6

AASHTO T 164

EN 12697-1 Comité Técnico CEN/TC TC

2018
ASTM D8159

Recuperación el ligante del RAP - Diferentes tecnologías



DIN 1996 T6

AASHTO T 164

EN 12697-1 Comité Técnico CEN/TC TC

2018
ASTM D8159

Recuperación el ligante del RAP - Diferentes tecnologías

AASHTO T 164: Método de prueba estándar para la extracción cuantitativa del ligante asfáltico de mezcla asfáltica en caliente (HMA)

Peligroso para la salud - contacto directo con disolvente

Peligroso para el ambiente

Grandes costos de solventes

Resultados inexactos

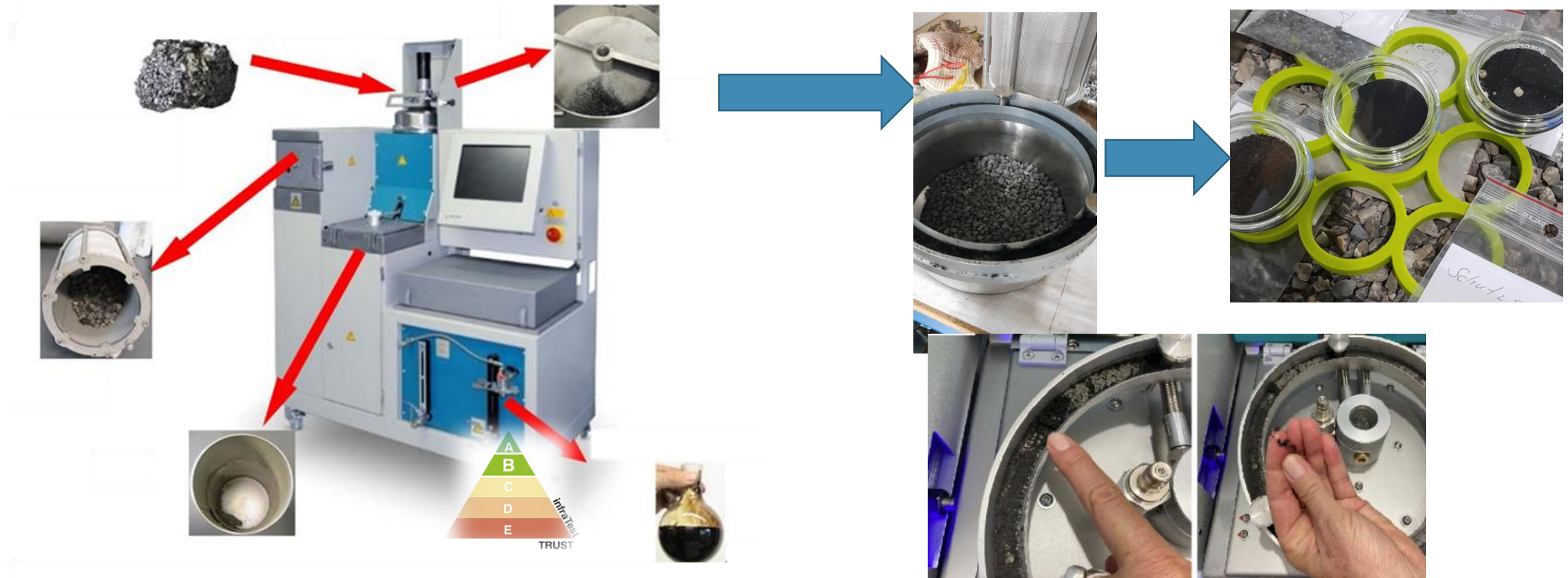
Valores aproximados

Pérdida de tiempo



Proceso automatizado de extracción y recuperación

ASTM D8159 describe un método automatizado para extraer y cuantificar el ligante asfáltico de mezclas o pavimentos, reduciendo el tiempo de ensayo y la exposición a disolventes peligrosos.



Proceso automatizado de extracción y recuperación

Analizador de Asfalto – Secuencia de Tiempo



- Gran ahorro de disolventes: reutilización por destilación
- Mezcla asfáltica de hasta 350 kg con depósito de 25L
- Pérdida mínima de retiro
- Carpeta totalmente recuperada
- Reducir las emisiones a cero
- Resultados precisos y ahorro de carpetas
- Gran ahorro de tiempo: extracción completa en 45 minutos

Proceso automatizado de extracción y recuperación

* Los costos asociados con cada método se basan en **125 pruebas** por año. :

T164

Uso de solventes de aproximadamente 220 galones por año (incluida la eliminación)	\$8,000/año
Equipo de prueba, centrífugas \$8.000 con una vida útil de 10 años	\$800/año
Horas del personal 50 % a \$16/ hora, 50 % a \$27/ hora, 2,5 horas/ prueba	\$6,720/año

Total \$ 15,520/ año

Analizador de asfalto PG , con 2 cámaras de lavado

Uso de solvente de aproximadamente 15 galones por año (incluida la eliminación)	\$400/año
Estabilizador, 1L	\$350/año
250 recambios de kit de prueba/año	
Equipo de prueba, analizador de asfalto \$70,000 con una vida útil de 10 años	\$7,000/año
Horas del personal 50% a \$16/hora, 50% a \$27/ hora, 0,5 horas/prueba	\$1,345/año

Total \$9,345/ año



Proceso automatizado de extracción y recuperación

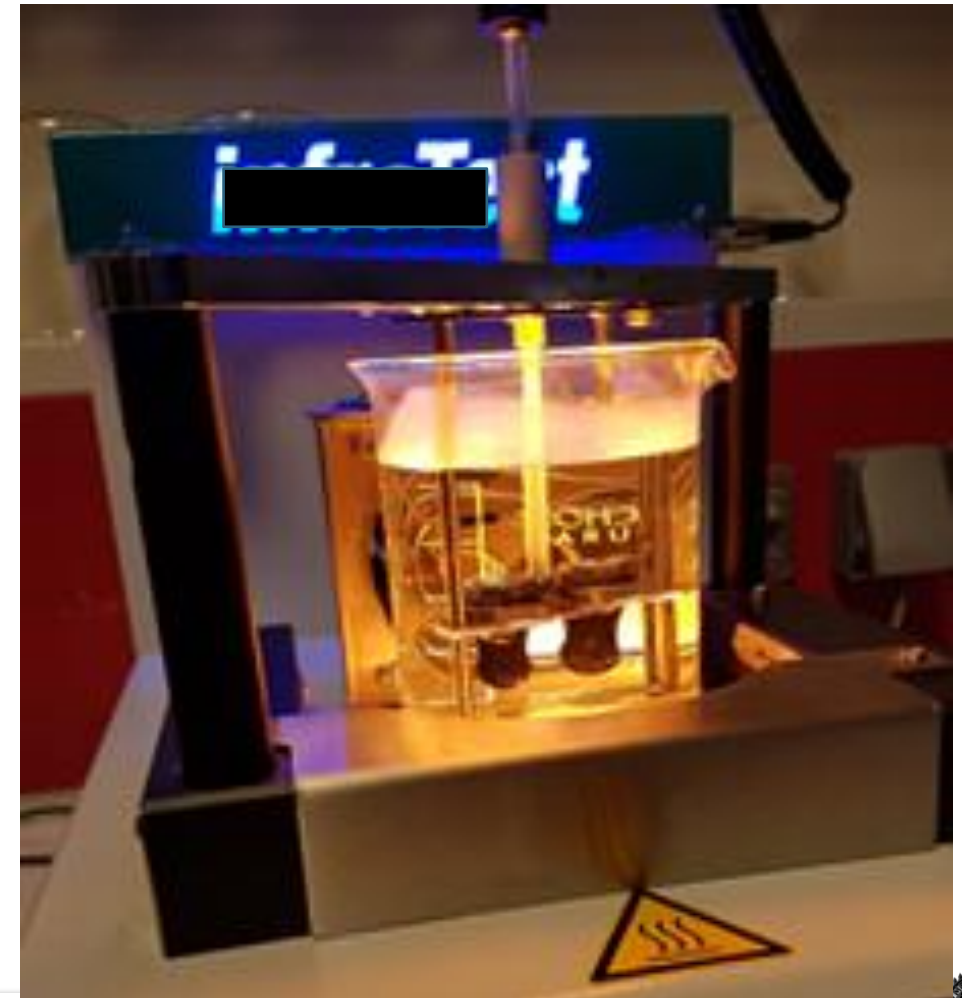
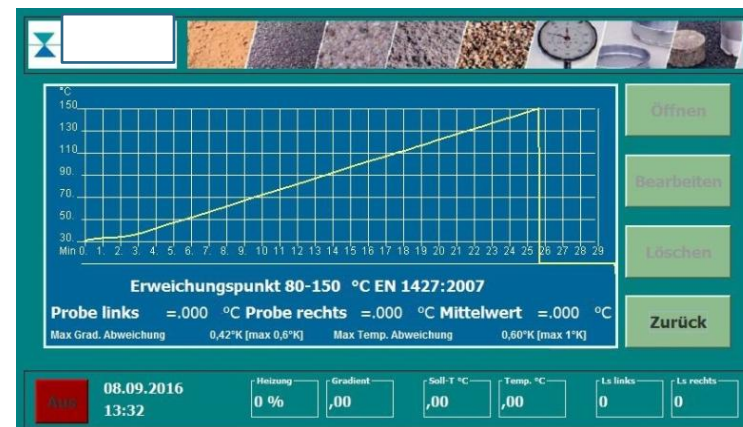


Método de homogeneización

Caracterización cualitativa del ligante asfáltico

✓ *Punto de ablandamiento de anillo y bola (TR & B) [° C]*

Según el estándar DIN EN 1427



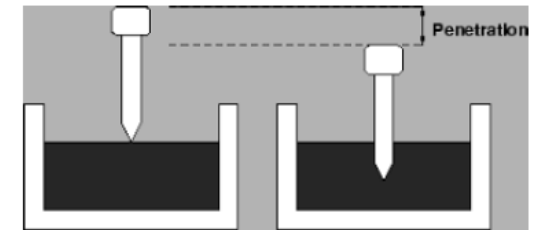
Método de homogeneización

Caracterización cualitativa del ligante asfáltico

✓ *Punto de ablandamiento de anillo y bola (TR & B) [° C]*



Penetración de la aguja



Por lo general, se excluyen los gránulos con un punto de reblandecimiento TR&B de anillo y bola > 70 °C (valor medio) o > 77 °C (valor único) o una penetración de la aguja ≤ 15 mm.

Método de homogeneización

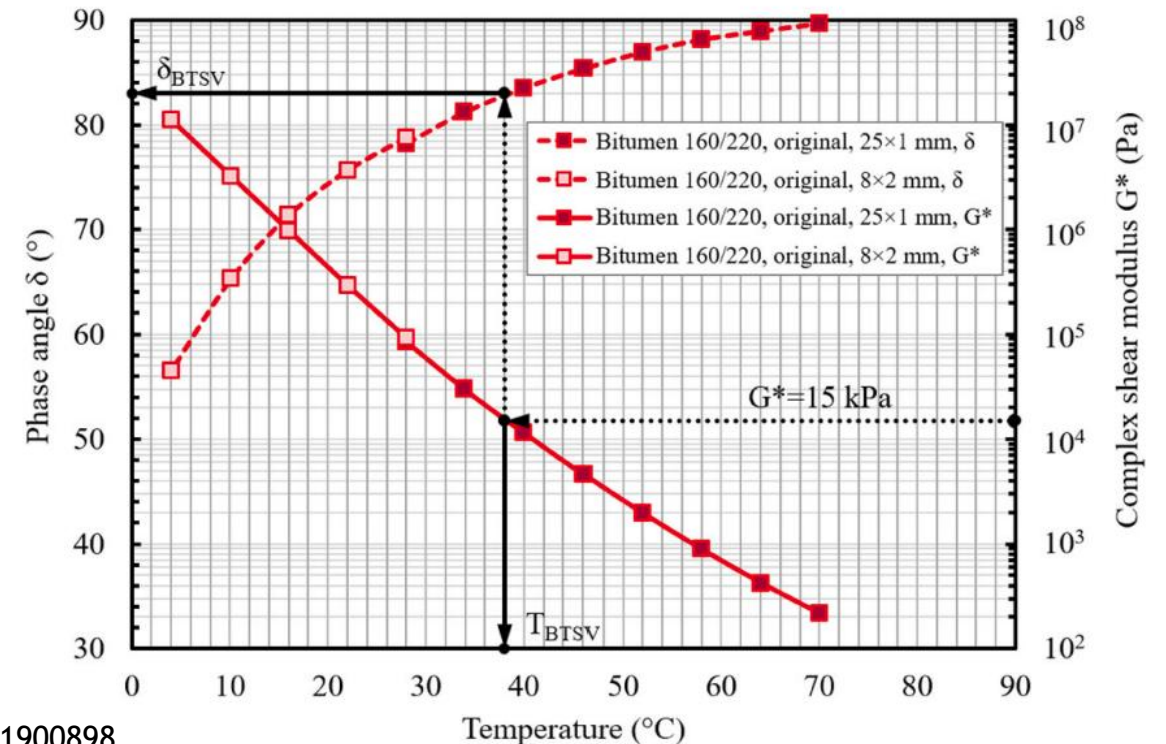
TP – Asphalt – Teil 4 – Binder Fast Characterisation Test (BTSV)

La norma es un metodo aleman de caracterizacion rapida de ligantes con el DSR.

Consiste en medir como cambia la rigidez de lligante con la temperatura (G^* y δ) y definir el punto clave: la temperatura donde el modulo complejo G^* llega a 15 kPa.

Los ingenieros alemanes descubrieron que este valor esta relacionado con el punto de ablandamiento Anillo y Bola. Aun que puede diferir, siguen siendovun util parametro comparativo.

- Barrido de temperatura de 20 °C a 90 °C con 1,2 K/min.
- Determinación de la temperatura de rigidez equivalente en **$G^* = 15 \text{ kPa}$** , frecuencia angular = 10 rad/s, la cual se relaciona con el punto de ablandamiento de ligantes.



Determinación de TBTSV y δ BTSV para betún original 160/220

Fuente: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2021.1900898>

Método de homogeneización

♦ Comparación entre Anillo y Bola y BTSV		
Criterio	Anillo y Bola (EN 1427)	BTSV (DSR, FGSV/TP Asphalt-StB)
Principio del ensayo	Mide la temperatura en la que una esfera de acero atraviesa una película de betún calentada en un anillo estándar.	Mide el módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) del ligante en función de la temperatura, utilizando un reómetro de corte dinámico.
Parámetro característico	Punto de reblandecimiento ($^{\circ}\text{C}$) = temperatura en la que la esfera toca la base, indicando suficiente fluidez.	Temperatura BTSV ($^{\circ}\text{C}$) = temperatura en la cual $G^* = 15$ kPa, que representa el límite de rigidez.
Tipo de resultado	Valor empírico, no directamente vinculado al comportamiento reológico real.	Valor reológico (basado en módulo de corte dinámico), relacionado con propiedades viscoelásticas.
Tiempo de ensayo	Rápido (30-45 min), pero requiere preparar muestras fundidas en anillos.	Rápido (~15-20 min) si el DSR ya está calibrado; no necesita moldes especiales.
Aplicación normativa	Método clásico y aún exigido en normas EN/ISO para caracterizar ligantes.	Utilizado en Alemania (TP Asphalt-StB, ZTV) como alternativa para una caracterización rápida en control de obra.
Limitaciones	No diferencia bien ligantes modificados; resultado puramente empírico.	Requiere equipo sofisticado (DSR); la correlación depende del tipo de ligante.
Relación entre métodos	Valor de referencia tradicional.	La temperatura BTSV ($G^* = 15$ kPa) se correlaciona fuertemente con el punto de reblandecimiento Anillo y Bola, sirviendo como equivalente rápido.

•**Anillo y Bola** → entrega un número empírico tradicional (punto de reblandecimiento).

•**BTSV** → entrega un número reológico equivalente (temperatura a $G^* = 15$ kPa), que puede sustituir al Anillo y Bola, sobre todo en control de calidad de ligantes para mezclas asfálticas.

Método de homogeneización

Caracterización de áridos

Determinación de la distribución granulométrica
según TL Asphalt-StB 07, apartado 4.1.2.

- **Fracción de áridos $< 0,063$ mm [M-%]** → *Fracción de áridos finos o filler mineral*
- **Fracción de áridos de 0,063 a 2 mm [M-%]** → *Fracción de áridos finos (arena)*
- **Fracción de áridos > 2 mm [M-%]** → *Fracción de áridos gruesos (grava)*



Método de homogeneización

Ejemplo de capa rodadura AC D

	Contenido de ligante [M .-%]	Filler Fracción de gránulos <0,063 mm [M .-%] - Filler	Arena Fracción de gránulos de 0,063 a 2 mm [M. -%] - Arena	Grava Fracción de gránulos > 2 mm [M .- %] - Grava	Anillo y Bola (TR & B) [° C]
Muestra 1	6,3	11,1	32,7	56,2	60,2
Muestra 2	6,2	14,7	43	42,3	58,6
Muestra 3	5,9	10,4	35,9	53,7	59
Muestra 4	6,2	11	36,3	52,7	59,2
Muestra 5	5,9	10,8	37,6	51,6	60,2
Muestra 6	5,9	14,2	36,4	49,4	62
Muestra 7	6	12	34	54	62
Muestra 8	6,1	10,5	37,2	52,3	60,4
Muestra 9	6	10,6	38,6	50,6	59
Media	6,1	11,7	36,9	51,4	60,1
Minimo	5,9	10,4	32,7	42,3	58,6
Maximo	6,3	14,7	43	56,2	62
Envergadura	0,4	4,3	10,3	13,9	3,4

Al menos 9 muestras de cada 500 toneladas de un lote “iniciado”

Método de homogeneización

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen



Zusätzliche Technische
Vertragsbedingungen und Richtlinien
für den Bau
von Verkehrsflächenbefestigungen
aus Asphalt

R 1

ZTV Asphalt-StB 07/13

Ausgabe 2007/Fassung 2013

$$Z_{\text{mög}} = \frac{\text{const} \cdot T_{\text{zul}}}{a_{\text{max}}} \cdot 100$$

Z_{mög}: porcentaje máximo posible de RAP

T_{zul}: tolerancia total permitida de acuerdo con el Standard **ZTV Asphalt-StB**

a_{max}: intervalo (contenido de ligante, fracciones de áridos <0,063 mm(filler); 0,063 - 2 mm (arena); > 2 mm (grava); anillo y bola

const = 0,5 para capas de base intermedia (*binder*), base y subbase

const = 0,33 para capas de rodadura (*revestimiento*)



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

@AMAACmx

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



Método de homogeneización

Tolerancia total permitida Tzul		
	Mezcla para capas de Rodadura y Binder	Mezcla para capa de base
Contenido de ligante [M.-%]	1	1,2
Fracción < 0,063 mm [M.-%]	6	10
Fracción 0,063 - 2 mm [M.-%]	16	16
Fracción > 2 mm [M.-%]	16	16
Punto de ablandamiento anillo y bola [°C]	8	8

$$Z_{mög} = \frac{\text{const} \cdot T_{zul}}{a_{max}} \cdot 100$$

Tzul: tolerancia total permitida de acuerdo con la ZTV

amax: intervalo (anillo y bola, contenido de ligante, fracciones de áridos <0,063 mm; 0,063 - 2 mm; > 2 mm)

const = 0,5 para capas de base intermedia (*binder*), base y subbase

const = 0,33 para capas de rodadura (*revestimiento*)

Método de homogeneización

$$Z_{mög} = \frac{\text{const} \cdot T_{zul}}{a_{max}} \cdot 100$$

$$a_{max} = 0,33$$

Envergadura 0,4 4,3 10,3 13,9 3,4

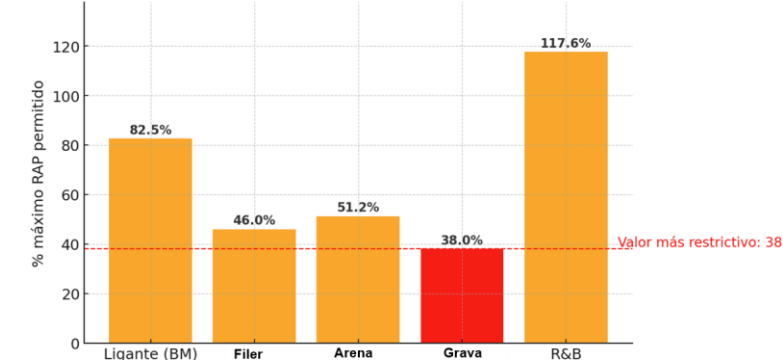
Ligante	Filler	Arena	Grava
$Z_i = (0,33 \times T_{zul,i} / a_i) \times 100$	$Z_i = (0,33 \times T_{zul,i} / a_i) \times 100$	$Z_i = (0,33 \times T_{zul,i} / a_i) \times 100$	$Z_i = (0,33 \times T_{zul,i} / a_i) \times 100$
$Z_i = (0,33 \times 1,0 / 0,4) \times 100$	$Z_i = (0,33 \times 6,0 / 4,3) \times 100$	$Z_i = (0,33 \times 16,0 / 10,3) \times 100$	$Z_i = (0,33 \times 16,0 / 13,9) \times 100$
$Z_i = 82,5 \%$	$Z_i = 46,0 \%$	$Z_i = 51,2 \%$	$Z_i = 38,0 \%$
Anillo y Bola			
$Z_i = (0,5 \times T_{zul,i} / a_i) \times 100$			
$Z_i = (0,5 \times 8,0 / 3,4) \times 100$			
$Z_i = 117,6 \%$			

Fuente: DEUTAG NL Ost

Tolerancia total permitida Tzul

	Mezcla para capas de Rodadura y Binder	Mezcla para capa de base
Contenido de ligante [M.-%]	1	1,2
Fracción < 0,063 mm [M.-%]	6	10
Fracción 0,063 - 2 mm [M.-%]	16	16
Fracción > 2 mm [M.-%]	16	16
Punto de ablandamiento anillo y bola [°C]	8	8

Porcentaje máximo teórico de RAP por parámetro (el valor final es el más bajo)



Estudios de tecnología de los materiales

REUTILIZACIÓN DE ASFALTO Y COMPARACIÓN DE LOS CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE REUTILIZACIÓN DEL RAP EN LA NUEVA MEZCLA

MÉTODO AMERICANO (PG-GRADE)

Regulamentos para utilização de asfalto reciclado

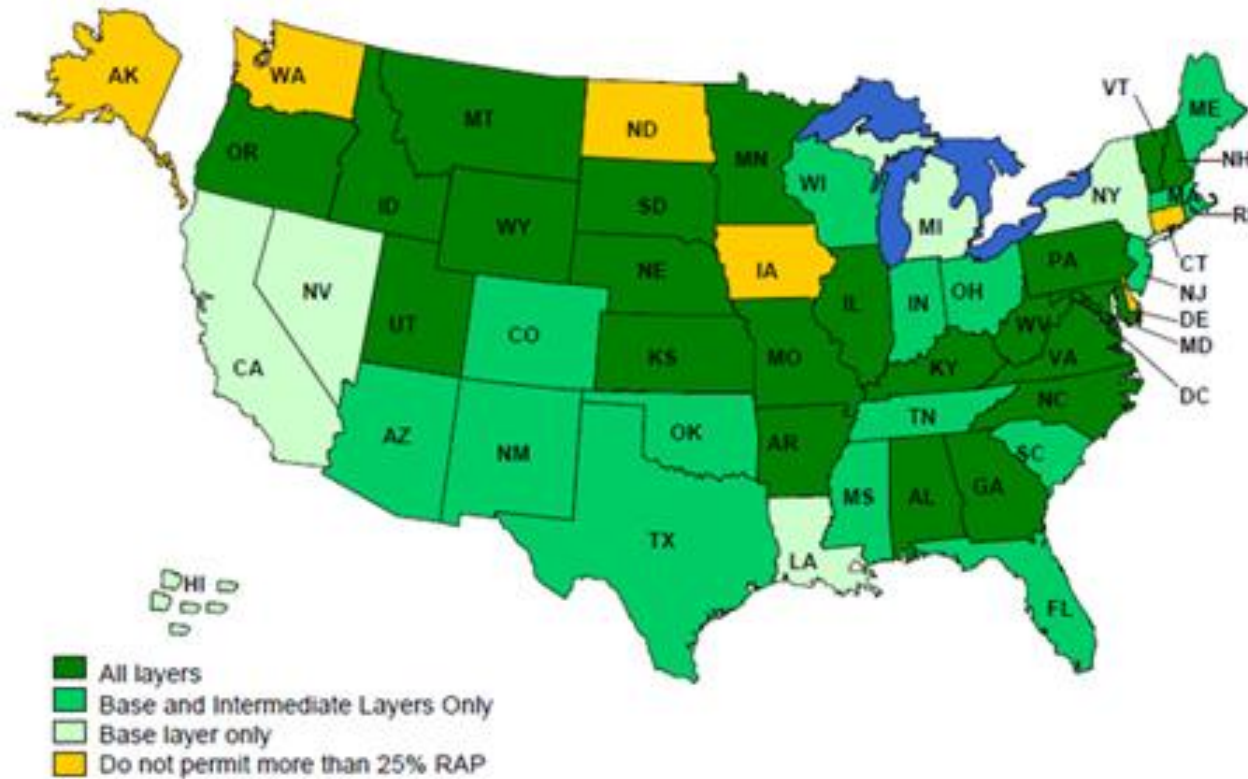
En el Estados Unidos

Apoyar y promover prácticas sustentables es un objetivo compartido de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) y la Asociación Nacional de Pavimentos de Asfalto (NAPA).



Regulamentos para utilização de asfalto reciclado

Reglas y regulaciones regionales: generalmente, los departamentos de transporte estatales deciden cuánta cantidad de RAP se puede utilizar..



Fuente: Federal Highway Administration Research and Technology

Caracterización según el sistema de clasificación PG

En el sistema Superpave (ASSHTO M320 / ASTM D 6373) los ligantes se clasifican por grado PG, que indica la temperatura máxima y mínima de desempeño.

1. El método americano permite umbrales de contenido de RAP:

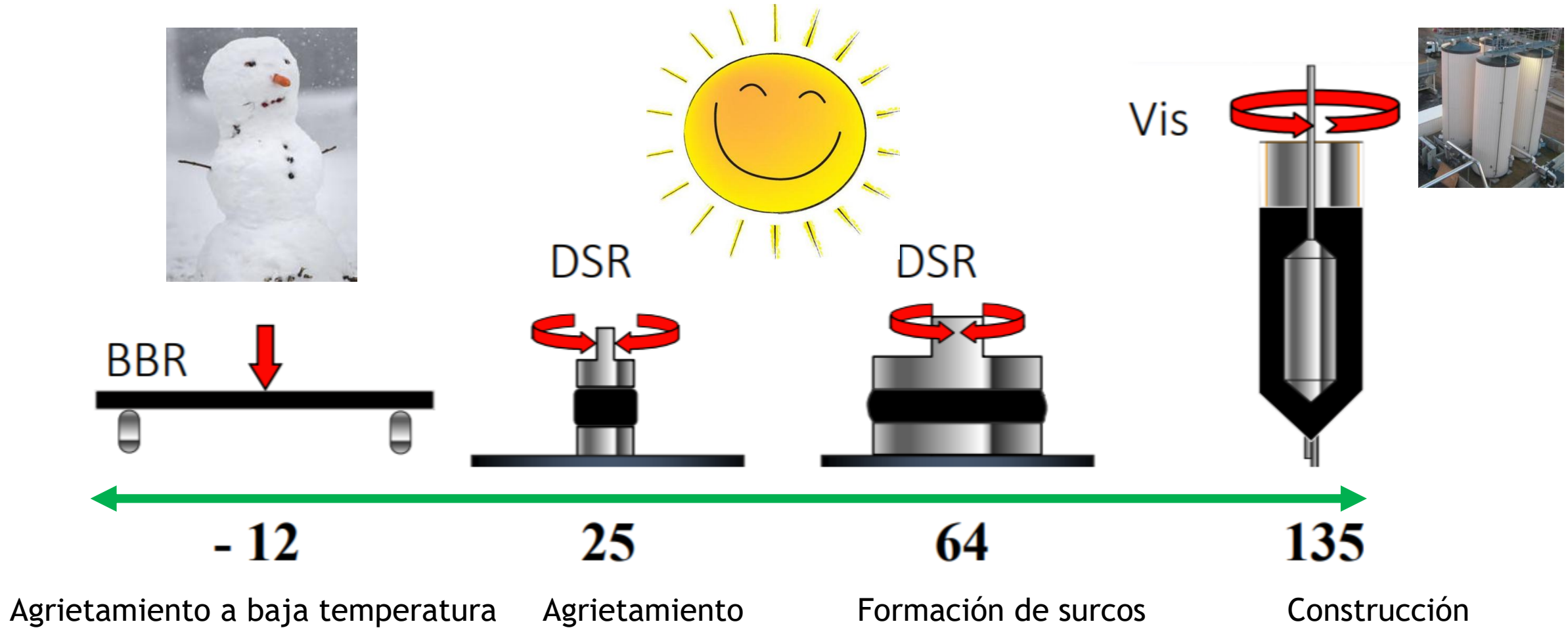
Hasta 15% - sin ajustes

15-25% - ajustar PG del ligante virgen

Pero para Más de 25% :

- Caracterización obligatorio: clasificación PG del ligante virgen y del RAP y interpolación de propiedades reológicas para determinar si el ligante combinado cumple el PG objetivo de proyecto.
- El ligante extraído del RAP debe ser ensayado para conocer su PG.
- Se calcula la proporción del ligante de RAP y del Reglas y regulaciones regionales: generalmente, los departamentos de transporte estatales deciden cuánta cantidad de RAP se puede utilizar.

Caracterización según el sistema de clasificación PG



Temperaturas en °C

Caracterización según el sistema de clasificación PG

Performance Grades																																					
Max. Design Temp.	PG 46				PG 52				PG 58				PG 64				PG 70				PG 76				PG 82												
Min. Design Temp.	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34					
Original																																					
$\geq 230\text{ }^{\circ}\text{C}$	Flash Point																																				
$\leq 3\text{ Pa}\cdot\text{s @ }135\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rotational Viscosity																																				
$\geq 1.00\text{ kPa}$	DSR $G^*/\sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer)																																				
	46				52				58				64				70				76				82												
(Rolling Thin Film Oven) RTFO, Mass Change $\leq 1.00\%$																																					
$\geq 2.20\text{ kPa}$	DSR $G^*/\sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer)																																				
	46				52				58				64				70				76				82												
(Pressure Aging Vessel) PAV																																					
20 hours, 2.10 MPa	90				90				100				100				100(110)				100(110)				100(110)												
$\leq 5000\text{ kPa}$	DSR $G^*\sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer) Intermediate Temp. = [(Max. + Min.)/2] + 4																																				
	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
$S \leq 300\text{ MPa}$ $m \geq 0.300$	BBR S (creep stiffness) & m-value (Bending Beam Rheometer)																																				
	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
If BBR m-value ≥ 0.300 and creep stiffness is between 300 and 600, the Direct Tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement.																																					
$\epsilon_f \geq 1.00\%$	DTT (Direct Tension Tester)																																				
	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

ASTM D 6373 AASHTO M320

Normas ASTM D6373 y AASHTO M320: especificaciones que clasifican los ligantes asfálticos según el sistema PG, evaluando su desempeño en temperaturas extremas y condiciones de servicio.

Caracterización según el sistema de clasificación PG

AASHTO M 323- 7

$$\%RAP = \frac{T_{Blend} - T_{Virgin}}{T_{RAP} - T_{Virgin}}$$

Donde:

- **TBlend** → valor de la propiedad medida en el ligante recuperado de la mezcla diseñada (*blend*).
- **TVirgin** → valor de la propiedad del ligante nuevo (virgen).
- **TRAP** → valor de la propiedad del ligante recuperado del asfalto reciclado (RAP).

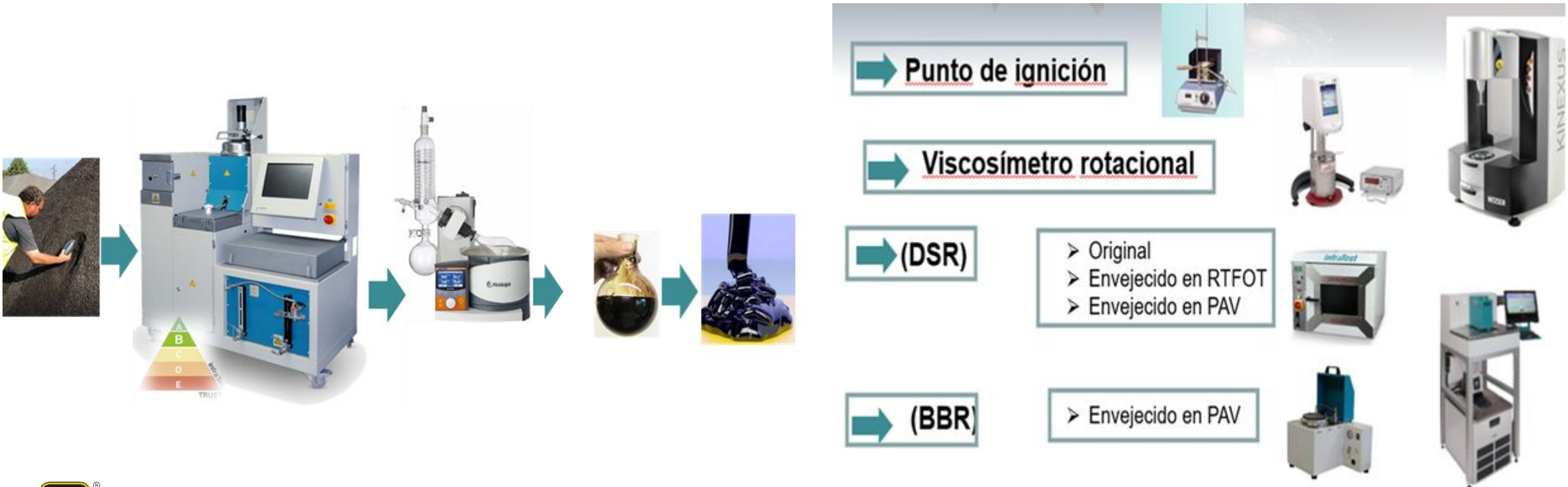
Interpretación:

- El numerador ($T_{Blend} - T_{Virgin}$) indica **cuánto la mezcla diseñada se aleja del ligante virgen**.
- El denominador ($T_{RAP} - T_{Virgin}$) indica **cuánto el RAP se aleja del ligante virgen**.
- El cociente es la **fracción del ligante total que proviene del RAP**, y por lo tanto, sirve para estimar el **porcentaje de RAP en la mezcla**.

Caracterización según el sistema de clasificación PG

Determinar el PG del RAP

- Primero se extrae y se recupera el ligante del RAP y se determina su **PG** mediante ensayos.
- Ejemplo: el ligante recuperado puede tener **PG 88-10** (muy rígido debido al envejecimiento).



Caracterización según el sistema de clasificación PG

Evaluación del ligante asfáltico

Flash Point

Evalúa el punto de inflamación del ligante asfáltico como medida de seguridad

230 °C mínimo



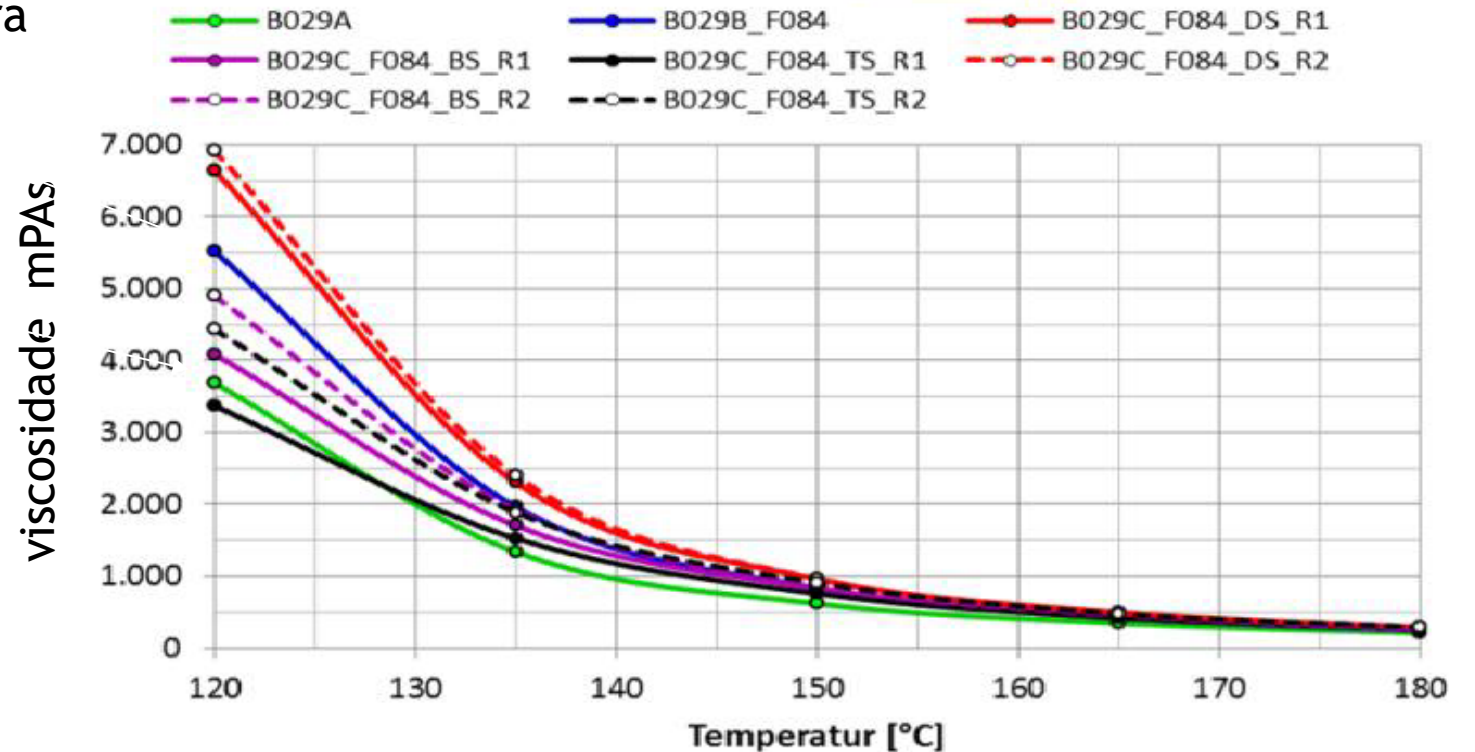
Caracterización según el sistema de clasificación PG

Evaluación del ligante asfáltico

Prueba de viscosímetro rotacional:
evalúa la trabajabilidad del asfalto para mezclarlo y colocarlo.



Viscosidad dinámica



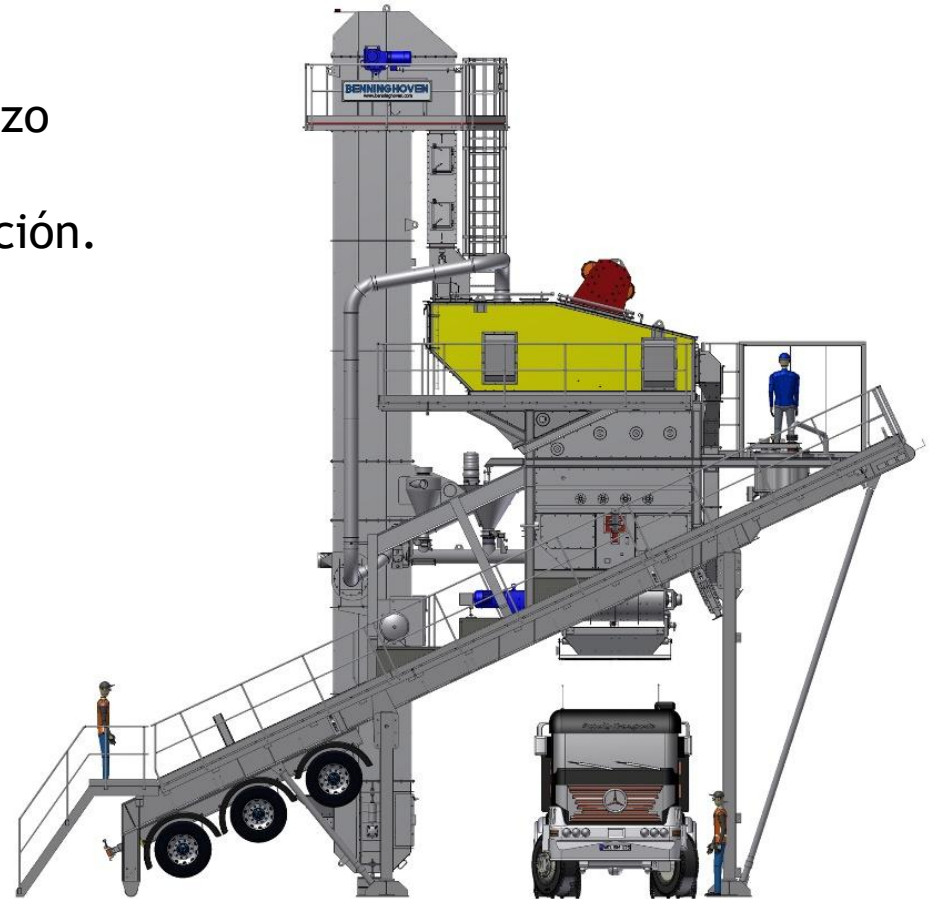
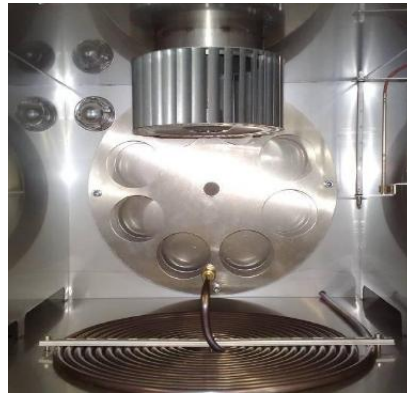
límite de 3000 mPa*s a una temperatura de 135 °C

Caracterización según el sistema de clasificación PG

Evaluación del ligante asfáltico

RTFOT - *RollingThinFilm Oven*- Envejecimiento a corto plazo

Simula el envejecimiento durante la producción y la instalación.

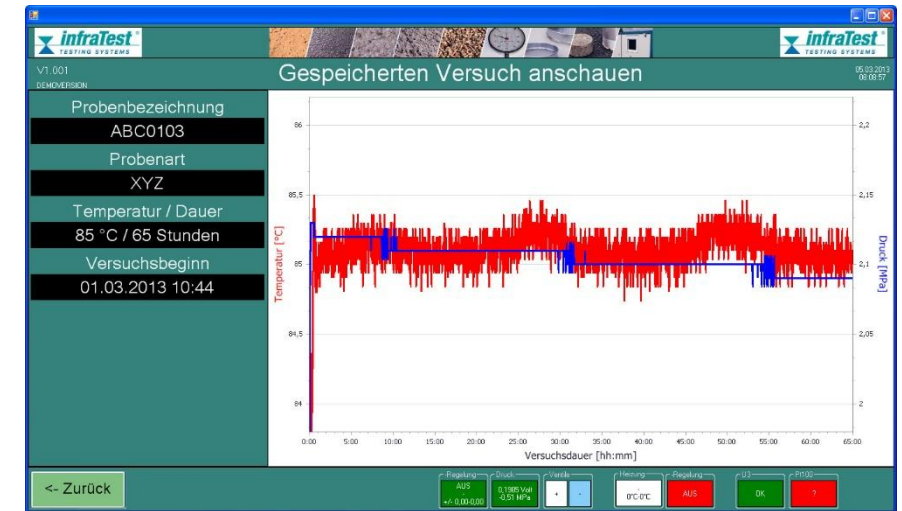


Caracterización según el sistema de clasificación PG

Evaluación del ligante asfáltico

PAV - Pressure Aging Vassel - Envejecimiento a largo plazo

Simula el envejecimiento tras 10-15 años de uso.



variantes estandarizadas

85 °C / 65 oras

90 °C / 20 oras

100 °C / 20 oras

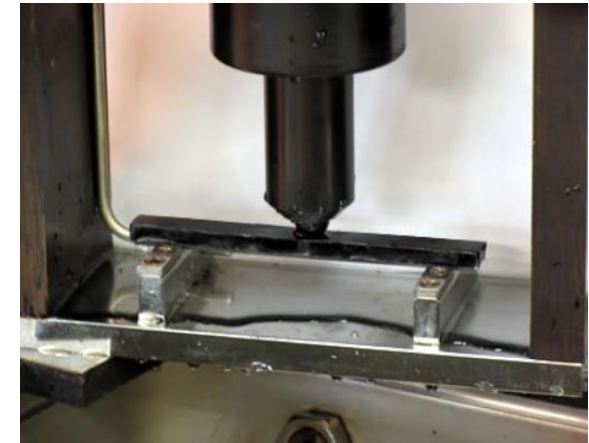
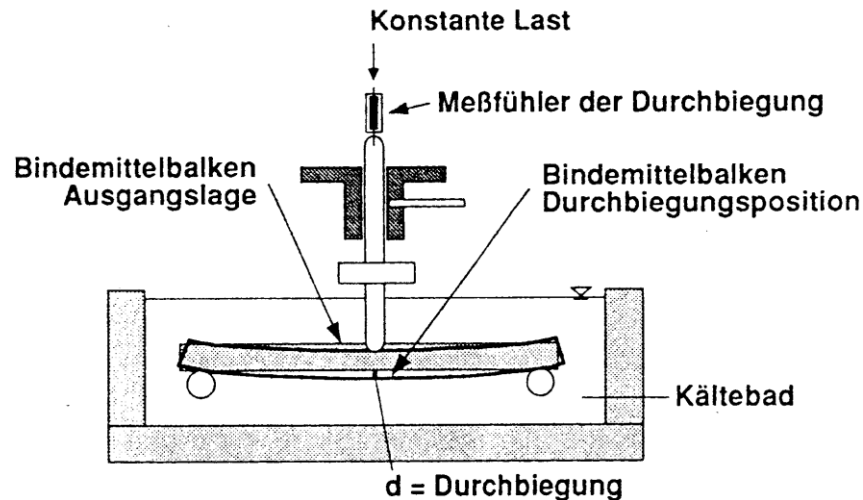
110 °C / 20 oras

Caracterización según el sistema de clasificación PG



Evaluación del ligante asfáltico

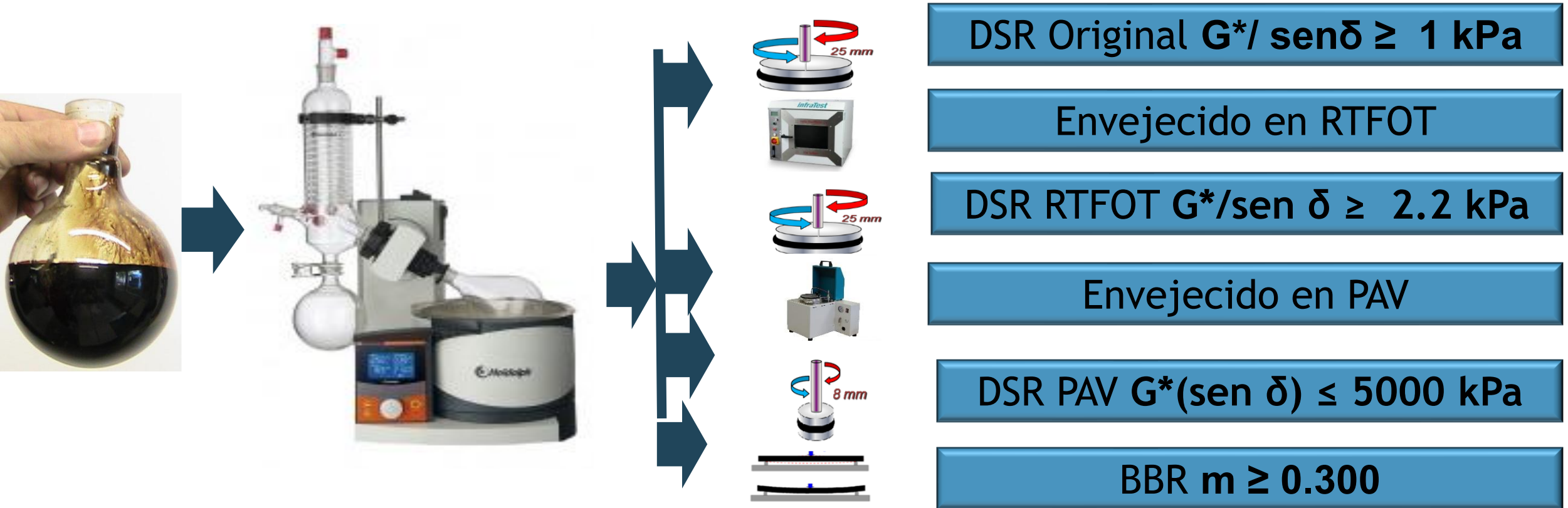
Ensayo de reómetro de viga de flexión (BBR) Evalúa la resistencia del ligante asfáltico a bajas temperaturas bajo la aplicación de un esfuerzo normal y constante..



$$S \leq 300 \text{ Mpa}$$
$$m \geq 0.300$$



Caracterización según el sistema de clasificación PG



Caracterización según el sistema de clasificación PG

Interpolación: Grado PG de asfalto extraído de RAP a temperaturas críticas T_c

$$T_c (\text{AltaOrig}) = \{[\log(1.0) - \log(G1)]/a\} + T1$$

T_c para DSR Original

$$T_c (\text{AltaRTFOT}) = \{[\log(2,2) - \log(G1)]/a\} + T1$$

T_c para DSR RTFOT

$$T_c (\text{AltaPAV}) = \{[\log(5000) - \log(G1)]/a\} + T1$$

T_c para DSR PAV

$$T_c (\text{AltaBaixa S}) = \{[\log(300) - \log(G1)]/a\} + T1$$

T_c para BBR

$$T_c (\text{AltaBaixa m}) = \{[\log(0,300) - \log(G1)]/a\} + T1$$

T_c para BBR

Caracterización según el sistema de clasificación PG

Grado PG del ligante recuperado del RAP ajustado a temperaturas críticas

Ligante	Propriedad	Temp TC
RAP Original	DSR $G^*/\sin \delta$ (kPa)	86,6
RAP RTFOT	DSR $G^*/\sin \delta$ (kPa)	88,7
RAP PAV	DSR $G^*/\sin \delta$ (kPa)	30,5
	BBR S	-4,5
	BBR m	-11,7

PG actual a Tc: PG 86,6 - 11,7

PG ajustado: PG 82 -10

Caracterización según el sistema de clasificación PG

Para lograr una **PG de 64-22** en la mezcla final -> Calcular el PG de tres ligantes distintos :

$$\text{PG del ligante del RAP (PG}_R\text{)} + \text{PG del ligante virgen (PG}_N\text{)} =$$

PG del ligante RAP recuperado: 82-10 -
fue calculado

PG del ligante virgen: 58-28

Temperatura alta más baja que la del PG de proyecto (64 → 58) para
contrarrestar la rigidez del RAP.

Temperatura baja igual o más baja dependiendo de la evaluación (-22
→ -28) para mejorar el desempeño a bajas temperaturas.

PG del ligante requerido (PG_M)

PG 64-22 - PG requerido para la mezcla final, según las condiciones
climáticas y de tránsito del proyecto, se define el PG_m.

Caracterización según el sistema de clasificación PG

Ejemplo

AASHTO M 323- 7

PG de la mezcla: PG 64-22

PG del ligante RAP recuperado: PG 82-10

PG del ligante virgen: PG 58-28

$$\%RAP = \frac{T_{Blend} - T_{Virgin}}{T_{RAP} - T_{Virgin}}$$

$$\% \text{ RAP} = \frac{64-58}{82-58} = 25\%$$

Caracterización según el sistema de clasificación PG

AASHTO M 323- 7

$$\%RAP = \frac{T_{Blend} - T_{Virgin}}{T_{RAP} - T_{Virgin}}$$

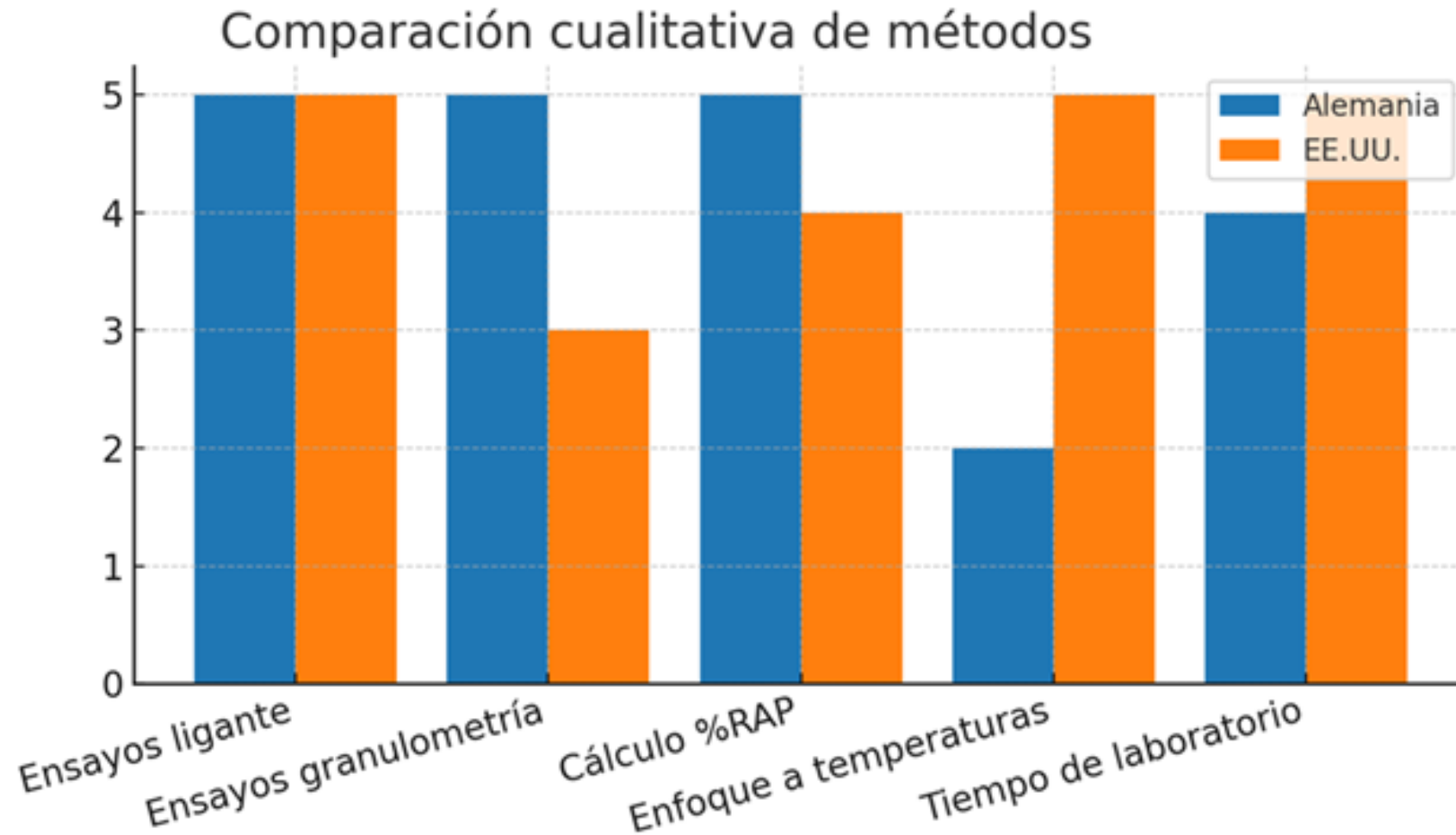
dónde

T_{Virgin} = temperatura crítica del asfalto virgen

T_{blend} = temperatura crítica del asfalto de la mezcla asfáltica final

T_{RAP} = temperatura crítica del asfalto contenido en el RAP

Comparación cualitativa



Ambos metodos buscan que el ligante combinado (Virgen+RAP) cumpla con las especificaciones, pero el sistema americano se apoya en el PG GRADE y las reglas escalonadas, mientras que el alemán se basa en la compactibilidad directa con el ligante objetivo

Inversiones

- ❖ Implementación de la economía circular como ley federal
 - ❖ Reglamentos técnicos
- ❖ Inversión en estudios e investigación y aumento del esfuerzo del análisis y ensayos
 - ❖ Estudios de tecnología de materiales de construcción
 - ❖ Tipo de naturaleza del RAP
- ❖ Inversiones en adaptación técnica
 - ❖ Tipo de capa de asfalto
 - ❖ Criterios mecánicos y en la planta

Conclusiones

1. **Técnicamente viable:** es posible alcanzar **altas tasas de RAP** — incluso **hasta 100%** — cuando se dispone de tecnología adecuada de planta y buena gestión del material.
2. **Calidad asegurada por normas:** el **cumplimiento normativo** exige **ensayos estandarizados** y **control de calidad robusto** en toda la cadena (muestreo representativo, extracción y caracterización del ligante, verificación granulométrica y diseño de mezcla).
3. **Valor económico y ambiental:** los **ahorros en ligante y áridos** y la **reducción de emisiones y de recursos vírgenes** tornan el RAP una decisión estratégica y sostenible, que hoy en día cuenta mucho a la hora de implementar un proyecto.

¡muchas gracias!

Please support the
infraTest campaign:

And give away a smile today!

Ponente: Dr.-Ing. Telma Keppler

Contacto: t.keppler@infratest.net
Whatsapp: +491727955533
www.infratest.net



Preguntas?

