

# Tecnología de los materiales viales.

Ignacio Zapata Ferrero  
Adrián Segura  
Demian Daniel Palumbo  
Federico Ortiz de Zárate  
Ramiro Nosetti  
Nidia Nilda Estefanía Fretes  
Verónica Mechura



# Tecnología de los materiales viales.

Ignacio Zapata Ferrero

Adrián Segura

Demian Daniel Palumbo

Federico Ortiz de Zárate

Ramiro Nosetti

Nidia Nilda Estefanía Fretes

Verónica Mechura

LEMaC Centro de Investigaciones Viales  
UTN FRLP – CIC PBA

edUTecNe  
Buenos Aires, 2023

Tecnología de los materiales viales / Ignacio Zapata Ferrero... [et al.]; compilación de Ignacio Zapata Ferrero; editado por Fernando Cejas. - 1a ed.- Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-8992-35-8

1. Reciclaje. 2. Asfalto. 3. Neumático. I. Zapata Ferrero, Ignacio, comp. II. Cejas, Fernando, ed.

CDD 625.7028

Diseño de Tapa e interior: Fernando Cejas



Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: Ing. Rubén Soro

Vicerrector: Ing. Haroldo Avetta

Secretaria Cultura y Extensión Universitaria: Ing. Federico Olivo Aneiros



Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata

Decano: Mg. Ing. Luis Agustín Ricci

Vicedecano: Ing. Sergio Darío Ramos

Director LEMaC: Dr. Ing. Julián Rivera



edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Coordinador General a cargo: Fernando Cejas

Dirección General: Mg. Claudio Véliz

Dirección de Cultura y Comunicación: Ing. Pablo Lassave

Queda hecho el depósito que marca la Ley N° 11.723

© edUTecNe, 2023

Sarmiento 440, Piso 6 (C1041AAJ)

Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina – Published in Argentina

ISBN 978-987-8992-31-0



*Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.*

---

# Prólogo

**Por el Dr. Ing. Julián Rivera, Director del LEMaC**

---

Desde antes incluso de su reconocimiento en 2002 como Centro UTN, en el LEMaC se instrumentan instancias de capacitación para sus Becarios de Investigación de grado, abiertas al resto de la comunidad, adicionales al entrenamiento que recibe cada uno de ellos respecto de su Tutor de Beca.

Parte de estas actividades se concentran en su Ciclo de Conferencias LEMaC, que año a año reúne exposiciones de sus integrantes y de profesionales del medio local e internacional.

Otra parte, pasando por diferentes versiones desde su primera aplicación, se da mediante el Programa de Entrenamiento Mínimo Indispensable, por el cual a través de clases teórico-prácticas todos los años se introduce a los Becarios en las temáticas fundamentales relacionadas con la actividad del LEMaC (suelos viales, mezclas asfálticas, hormigones, geosintéticos, etc.).

Con las restricciones por la pandemia por COVID-19, sin la posibilidad de ingresar a las instalaciones, en el año 2020 se decide reunir estas acciones en una única capacitación, abierta también a Becarios de otros grupos y laboratorios de las demás Facultades Regionales de la UTN, aprovechándose la virtualidad instrumentada para el dictado. Dicha capacitación en "Tecnología de los Materiales Viales" se materializa por clases semanales entre septiembre y noviembre de ese año, estando a cargo de los profesionales del LEMaC relacionados con cada área temática.

El segundo semestre del año 2021 se da la posibilidad de acceso a los laboratorios por parte de los Docentes Investigadores, pero no así de los Becarios de Investigación de grado. Por ello, se decide generar una nueva versión de la capacitación virtual, pero esta vez con la totalidad de sus clases dictadas por los Tesistas Doctorales relacionados con cada temática; que realizan sus actividades, o parte de ellas, en el LEMaC. Se busca de ese modo la triple finalidad de capacitar a los Becarios de grado, posibilitar que los Tesistas doctorales se ejerciten en el dictado de clases, y de que todos los miembros del LEMaC y la comunidad asistente se enteren de los trabajos que se realizan en torno a esas Tesis.

Las memorias de las clases constituyentes de esta capacitación, dictada en forma semanal desde septiembre a noviembre de ese año, se reúnen para conformar la presente publicación.

Vayan las felicitaciones a cada uno de los Tesistas encargados del dictado de las unidades y al Ing. Ignacio Zapata Ferrero, por la edición de este libro que sirve de soporte al curso dictado.

## Nota:

Los videos de las clases se encuentran disponibles en el canal de YouTube del LEMaC en el enlace

<https://www.youtube.com/watch?v=sSSylqGhD7o&list=PLDCCj1xjlutnrTcXWkrDsHwWBhZd6AbOc>



## **Prólogo**

*Dr. Ing. Julián Rivera, Director del LEMaC*

## **Diseño estructural de pavimentos**

*Ing. Ignacio Zapata Ferrero*

## **Asfalto modificado con polvo de neumático fuera de uso**

*Mg. Ing. Adrián Segura*

## **Producción de agregados para uso vial**

*Ing. Demian Daniel Palumbo*

## **Nanomodificación de asfalto**

*Ing. Federico I. Ortiz de Zárate*

## **Riegos asfálticos**

*Ing. Ramiro A. Nosetti*

## **Reciclado en caliente de mezcla asfáltica modificada para uso vial**

*Ing. Nidia Nilda Estefanía Fretes*

## **Demarcación horizontal**

*Ing. Verónica Mechura*



## CAPÍTULO 1

# Diseño estructural de pavimentos

Ing. Ignacio Zapata Ferrero

### Introducción

Las estructuras se pueden definir como un conjunto de elementos unidos entre sí, con la misión de soportar las fuerzas que actúan sobre ellos. La estructura de un edificio, por ejemplo, debe poder soportar las cargas solicitantes que se le impongan. Por mencionar algunas se puede citar el peso propio, la sobre carga de uso, los vientos, la nieve, etc. Todos los elementos intervinientes en su composición deben tener la capacidad necesaria para estar por encima de los efectos que produzcan las acciones.



*Figura 1-1. Estructura de un edificio*  
*Fuente: [www.estructurasmiguez.es](http://www.estructurasmiguez.es)*

Si bien desde un punto de vista netamente ingenieril, la resistencia de la estructura tiene que ser capaz de soportar las acciones intervinientes, también hay cuestiones no menores a tener en cuenta. El confort y la seguridad que se le brinda al usuario son puntos más que influyentes a la hora de dimensionar la estructura.

Si hablamos específicamente de una estructura vial, se sigue la misma lógica. Los materiales intervinientes en cada capa del pavimento deben trabajar en conjunto para resistir al paso del tránsito. Los materiales de mejor calidad y más costosos, se colocan en la parte superior, y se deja para los espesores inferiores los materiales más económicos, pero en mayor espesor. De esta forma se permite llegar al sustrato más profundo con tensiones muy bajas en comparación



a las aplicadas por el tránsito en la capa de rodadura. Más allá de que los materiales intervinientes en sus variados espesores pueden cumplir con los requisitos mencionados, también deben cumplir los requisitos de seguridad y confort al usuario.

## Métodos de diseño de pavimentos empíricos

Los métodos de diseño de pavimentos deben cumplir con determinados objetivos para brindarle al usuario. Los mismos los podemos enunciar como capacidad estructural y capacidad funcional.

**Capacidad estructural:** Referido a la aptitud que tiene un pavimento de resistir las sollicitaciones impuestas.

- **Tránsito.** Es de los factores que más influyen en las propiedades de resistencia de los pavimentos. Los métodos de diseño usan como dato de entrada el Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) junto con el porcentaje de vehículos pesados que transitan o se estima que transiten por ese sector. Los programas de cálculo actuales utilizan el concepto espectros de carga, medio por el cual se caracteriza el tránsito en forma más confiable
- **Clima.** El diseño de los espesores y calidad de materiales está fuertemente influenciado por el clima reinante en la zona de proyecto. En función de las temperaturas diarias, lluvias, calidad de drenaje, altura de napa freática, se seleccionan los materiales que mejor se comporten en esas condiciones. Uno de los condicionantes, es la elección del asfalto que se utilice. Asfaltos de viscosidades altas son utilizados en las zonas frías para su diseño.

**Capacidad funcional:** Se refiere al conjunto de características superficiales que vinculan la seguridad y la comodidad de los usuarios.

- **Rodadura.** Se debe presentar un paso al tránsito lo más placentero posible.
- **Fricción superficial.** Se debe garantizar una rugosidad adecuada que permita el frenado de los vehículos que lo transiten.
- **Geometría adecuada.** No debe presentar desniveles apreciables al pasaje de los vehículos
- **Estética adecuada.** Visualmente debe presentar un pavimento que no evidencie imperfecciones a simple vista.

### Método CBR (1929)

El método CBR es uno de los primeros utilizados para el diseño. En el mismo se relaciona el valor soporte del suelo (Figura 1-2) de la subrasante con los espesores de capas superiores en forma netamente empírica. De esta forma a partir de un ensayo se analiza la respuesta del pavimento a partir de un tránsito dado. Aunque primitivo y netamente empírico (basado solamente en ensayos y evaluando su respuesta), fue allanando el camino hacia métodos de diseño más sofisticados.

El ensayo de CBR (por sus siglas en inglés de California Bearing Ratio) evalúa en forma porcentual la resistencia de un suelo a ser penetrado por un pistón a una determinada velocidad. Se considera en forma porcentual debido a que se lo compara con una muestra patrón que tiene un CBR del 100%.



Si bien en un principio fue considerado como un método de diseño, en las técnicas que le sucedieron, siguieron utilizando el valor de CBR de la subrasante como dato fundamental de entrada al diseño, pero considerando propiedades más avanzadas de las capas que lo cubren.



*Figura 1-2. Ensayo Valor Soporte Relativo (VSR)  
Fuente: elaboración propia*

#### Maryland Road Test (1950)

La pista de prueba de Maryland es considerada una de las primeras en evaluar en campo el desempeño de los materiales sometido a una carga de tránsito controlada. En dicha pista (y en las que le siguieron) se conocen los espesores intervinientes, el clima, la calidad de los materiales colocados y el control del tránsito que la prueba. Se hicieron variaciones entre espesores de pavimentos y también se confeccionaron distintas distancias de tomado de juntas.

De esta forma se generan modelos de regresión, entre los datos de entrada (mencionados previamente) y los datos de salida recopilados como resultado del paso del tiempo.

Algunas de las propiedades de esta pista de prueba eran:

- 1,8 km de pavimento rígido
- Espesores de pavimento variables (22,9 cm, 17,8 cm, 22,9 cm)
- Cuatro tipos de cargas del tránsito (80kN – 100kN-142kN y 200kN)
- Subrasantes de suelos plásticos y granulares

#### WASHO Road Test (1953-1954)

Fue confeccionada por la Western Association of State Highway Officials en las cercanías de la ciudad de Idaho. En la misma se pudieron extraer conclusiones entra las combinaciones de pavimento rígido y flexible. También se extrajeron conclusiones acerca del impacto de las cargas en el pavimento y cual era más perjudicial.

Algunas de las propiedades de esta pista de prueba eran:

- Dos pistas de 580 m con 5 secciones de ensayo de 90 m con transiciones de 30 m.
- Espesores variables (15 a 56 cm)



- Cuatro tipos de cargas (80kN – 100kN - 142kN - 178kN)
- Subrasantes de suelos plásticos y granulares

### AASHO Road Test (1958-1960)

Es de las más importantes pistas de pruebas realizadas en Estados Unidos para recopilar datos. Realizada en la ciudad de Ottawa, Illinois (Figura 1-3), se utilizó para extraer datos de climas y materiales que eran muy representativos de las condiciones del norte del país.

Como punto representativo de esta pista de ensayo, se introdujo el concepto de serviciabilidad. El mismo establece un orden en la calidad en la que se encuentra el pavimento. Se estableció una escala de 5 (muy buena calidad de tránsito) a 0 (intransitable).

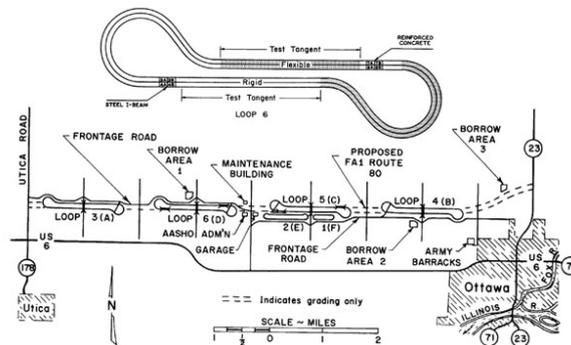


Figura 1-3. AASHO Road Test

Fuente: AASHTO Guide 1993

Algunas de las propiedades de esta pista de prueba eran:

- Concepto de Serviciabilidad
- Seis pistas que contenían un tramo recto de cuatro trochas con curvas de retorno
- Los tramos rectos tenían una longitud de 2 km
- Cinco pistas solicitadas a acciones dinámicas (tránsito)
- Variables de espesores, magnitud de cargas, efectos ambientales

### Objetivos de la AASHO Road Test

La pista de prueba de la AASHO fue un poco más lejos con los objetivos tradicionales que tenían las pistas de ensayo previas. Algunos de los objetivos prioritarios de la AASHO fueron:

- Determinar relaciones entre número de repeticiones de tránsito y espesores necesarios de los materiales colocados que se apoyan sobre la subrasante
- Considerar efectos sobre banquetas, tipos de base, fatiga, dimensiones y presión de neumáticos.
- Mantener las secciones lo más estables posibles.
- Desarrollar instrumentos, tablas, gráficos, métodos de ensayo para caracterizar materiales.



### Materiales de la AASHO Road Test

- Suelo tipo A-6
- CBR: 2-4%
- Profundidad de roca: 3 a 9m

#### Cond. Ambientales

- Lluvia anual: 762mm
- Ciclos de congelación y deshielo: 12 por año
- T° media en verano: 24°C
- T° media en invierno: -3°C

### Guía de diseño de pavimentos AASHTO 93

El avance más significativo sobre las pistas de prueba y los ensayos realizados fue la de confeccionar la guía de diseño de pavimentos AASHTO 93. Si bien es la más reconocida, la versión original fue de 1986 y se incluyeron y modificaron ecuaciones de regresión para la versión de 1993.

La guía consiste en varios capítulos en los que se detallan cuestiones de ensayos de materiales, métodos constructivos, probabilidad y confiabilidad de los datos, propiedades del tránsito, evaluaciones superficiales, construcción de refuerzos entre otras cuestiones.

La guía propone, en función de los datos de entrada de un proyecto, el espesor total que se requiere en un pavimento para cumplir con dichos requerimientos. Los datos de entrada se pueden enumerar en:

- W18: Numero de cargas de 18kips (80kN) Considera al tránsito compuesto por vehículos de distinto peso y numero de ejes y para el cálculo se lo transforma en ejes equivalentes de 80 kN o 18 kips (Figura 1-4).



Figura 1-4. Tránsito pesado considerado en los métodos de diseño

Fuente: <https://transporteylogistica.com.ar>

- $\Delta$ PSI: Perdida de serviciabilidad: La capacidad de servir al tipo de tránsito para el cual fue diseñado (Figura 1-5 y 1-6).





Figura 1-5. Estado del pavimento muy bueno (izq.) y muy malo (der.)

Fuente: <https://www.emb.cl>

| Índice de serviciabilidad | Calificación |
|---------------------------|--------------|
| 0 - 1                     | Muy Mala     |
| 1 - 2                     | Mala         |
| 2 - 3                     | Regular      |
| 3 - 4                     | Buena        |
| 4 - 5                     | Muy Buena    |

Figura 1-6. Índice de serviciabilidad.

Fuente: AASHTO Guide 1993

- ZR: Confiabilidad en la curva de distribución normal. La probabilidad de que el sistema estructural propuesto que forma el pavimento cumpla su función dentro del periodo de vida previsto bajo las condiciones estipuladas. La probabilidad de que el sistema estructural propuesto que forma el pavimento cumpla su función dentro del periodo de vida previsto bajo las condiciones estipuladas (Figura 1-7).

| Tipo de carretera                   | Nivel de confiabilidad R [%] |             |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------|
|                                     | Urbana                       | Interurbana |
| Autopistas y carreteras importantes | 85.0 – 99.9                  | 80.0 – 99.9 |
| Arterias principales                | 80.0 – 99.0                  | 75.0 – 95.0 |
| Colectoras                          | 80.0 – 95.0                  | 75.0 – 95.0 |
| Locales                             | 50.0 – 80.0                  | 50. – 80.0  |

Figura 1-7. Confiabilidad de diseño.

Fuente: AASHTO Guide 1993

- $S_0$ : Desvío estándar: Medida del desvío de los datos de entrada con respecto al valor medio (Figura 1-8).



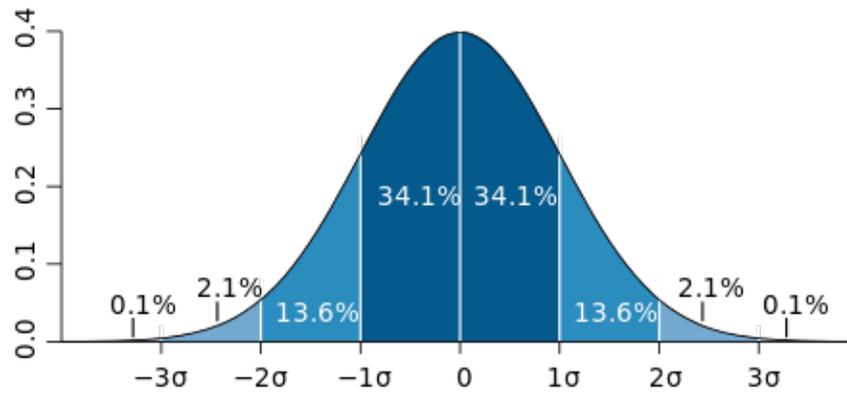


Figura 1-8. Distribución normal de los datos de entrada.

Fuente: AASHTO Guide 1993

- Módulo resiliente de la subrasante. Bajo este ensayo se consideran las propiedades de resistencia del suelo colocado en la subrasante. Este parámetro viene a reemplazar el de CBR (aunque se siga utilizando para correlacionar con el módulo resiliente). El ensayo consiste en someter a una probeta cilíndrica de suelo a cargas dinámicas en forma uniaxial y una presión de confinamiento a lo largo del perímetro de la muestra (Figura 1-9).

A partir de los resultados del ensayo, se conforman modelos de regresiones de ecuaciones constitutivas del material. Dichas ecuaciones, representan de una forma más adecuada el confinamiento y las diferentes tensiones que se pueden tener en el pavimento a la altura de la subrasante.

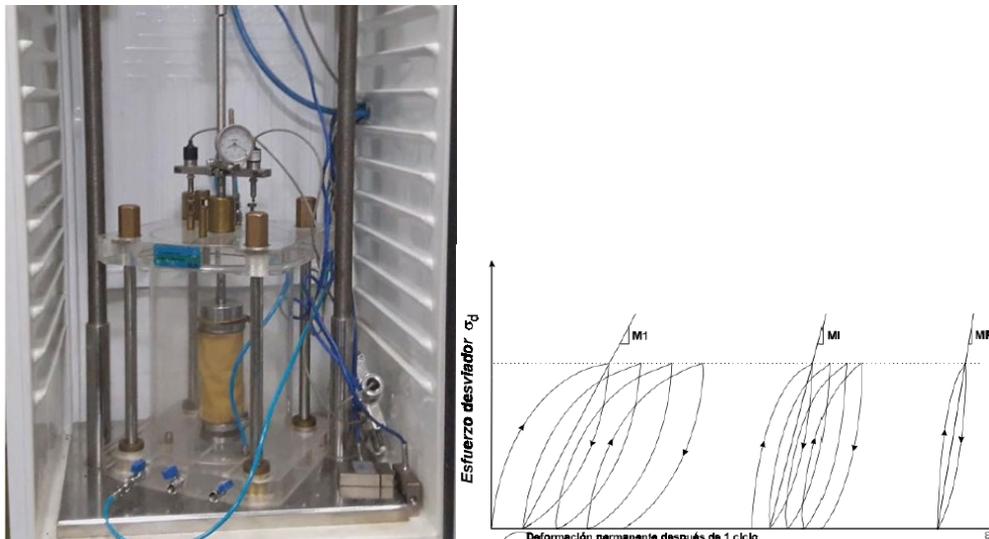


Figura 1-9. Ensayo de módulo resiliente (izq.) y resultado obtenido (der.)

Fuente: Rivera et. al.

Debido a la complejidad y costos de un equipo de estas características, numerosos investigadores buscaron relacionar los valores del módulo resiliente de la subrasante con parámetros más fáciles de obtener como el CBR para distintas clases de suelos. Algunos de los mismos se pueden apreciar en la Figura 1-10.



| Correlación $M_R - CBR$  | Tipo de material               | Referencia              |
|--|--------------------------------|-------------------------|
| $M_R = 10 \cdot CBR$   | A-1-b(0), A-4(8), A-6(9)       | Heukelom y Foster, 1960 |
| $M_R = 38 \cdot CBR^{0,711}$   | A-1-b(0)                       | Green y Hall, 1975      |
| $M_R = 21 \cdot CBR^{0,65}$  | -                              | Ayres, 1997             |
| $M_R = 18 \cdot CBR^{0,64}$  | A-4(8), A-6(9)                 | Lister, 1987            |
| $M_R = B \cdot CBR$<br>5,25 < B < 21; B=10,5 para CBR < 10                                 | A-1-b(0), A-4(8), A-6(9)       | AASHTO                  |
| $M_R = 17,6 \cdot CBR^{0,64}$ para CBR ≤ 12<br>$M_R = 22,1 \cdot CBR^{0,55}$ para CBR ≥ 12 | Suelos de subrasante           | TRRL                    |
| $M_R = 10 \cdot CBR^{0,73}$  | Diversos materiales granulares | Poulsen & Stubstad      |

Figura 1-10. Correlaciones entre ensayos de módulo resiliente y CBR  
Fuente: AASHTO Guide 1993

La ecuación de regresión obtenida en función de los parámetros encontrados en la pista de prueba de la AASHTO en su versión de 1993 se puede apreciar en la Figura 1-11.

$$\text{Log}(W_{18}) = Z_o \cdot S_o + 9.36 \cdot \text{Log}(SN + 1) - 0.20 \left[ \frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} \right] + 2.32 \cdot \text{Log}(Mr) - 8.07$$

Figura 1-11. Ecuación de regresión propuesta por la guía AASHTO 93.  
Fuente: AASHTO Guide 1993

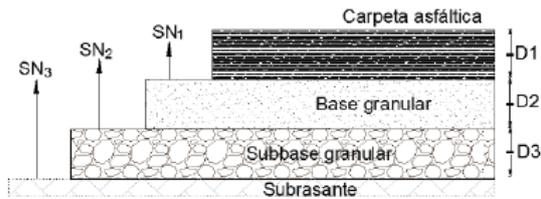
En la misma se pueden contemplar las variables mencionadas anteriormente. De esta ecuación se busca obtener el valor de SN. El SN (por Structural Number, en inglés) nos indica la capacidad estructural que debe poseer la totalidad del pavimento para satisfacer las condiciones del tránsito impuestas. Como se puede apreciar, el valor de SN no se puede despejar simplemente de la ecuación, sino que se debe iterar su valor hasta llegar a una convergencia con el lado izquierdo de la ecuación ( $\text{Log}W_{18}$ ).

El valor del SN obtenido por la ecuación es el número estructural del pavimento en su totalidad de espesores y materiales. A partir de este punto, es responsabilidad del proyectista seleccionar los distintos materiales y espesores de pavimento, que en su totalidad deben satisfacer el SN obtenido de la ecuación de regresión.

### Numero estructural de diseño

El número estructural del pavimento se desglosa en un número estructural de cada capa (Figura 1-12). El mismo se conforma en cada capa por un coeficiente de aporte estructural multiplicado por su respectivo espesor. El coeficiente de aporte estructural es un parámetro que involucra la calidad de cada material de la estructura propuesta. Al ser solo un simple número por capa de material, se dejan de lado muchas propiedades que se evalúan en el mismo.





$$SN = SN_1 + SN_2 + SN_3 + \dots + SN_n$$

$$SN = a_1 \cdot D_1 \cdot m_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 + \dots + a_n \cdot D_n \cdot m_n$$

Figura 1-12. Esquema del número estructural del pavimento  
Fuente: AASHTO Guide 1993

Para las capas inferiores a la de rodamiento asfáltico, se suma un coeficiente de drenaje, que contempla el tiempo que cada capa de material evacua el agua de una lluvia. Este valor pondera o castiga a la calidad de cada capa (Figura 1-13).

| Calidad del drenaje | Porcentaje del tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación |             |             |            |
|---------------------|--|-------------|-------------|------------|
|                     | Menos del 1%   | 1 – 5%      | 5 – 25%     | Más de 25% |
| Excelente           | 1.40 – 1.35  | 1.35 – 1.30 | 1.30 – 1.20 | 1.20       |
| Bueno               | 1.35 – 1.25  | 1.25 – 1.15 | 1.15 – 1.00 | 1.00       |
| Normal              | 1.25 – 1.15  | 1.15 – 1.05 | 1.00 – 0.80 | 0.80       |
| Malo                | 1.15 – 1.05  | 1.05 – 0.80 | 0.80 – 0.60 | 0.60       |
| Muy malo            | 1.05 – 0.95  | 0.95 – 0.75 | 0.75 – 0.40 | 0.40       |

Figura 1-13. Coeficiente de drenaje en función de la calidad y el nivel de saturación  
Fuente: AASHTO Guide 1993

### Coeficiente de aporte estructural

Para la evaluación de las propiedades de cada material interviniente en la estructura del pavimento se busca un coeficiente de aporte estructural por capa. Los resultados obtenidos a partir de la pista de la AASHTO relacionan la respuesta de los materiales al tránsito, con parámetros que se obtienen en laboratorio. En la Figura 1-14 se puede ver los ábacos, que relacionan ensayos básicos como CBR o el valor R.

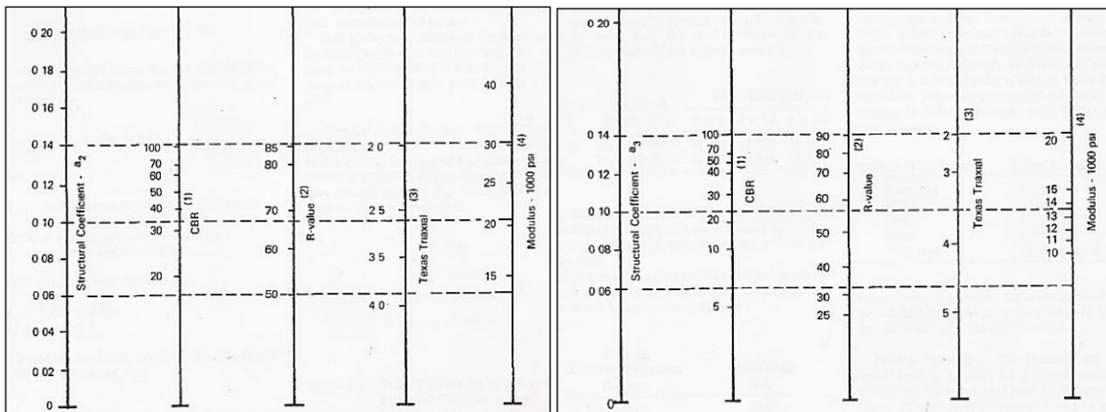
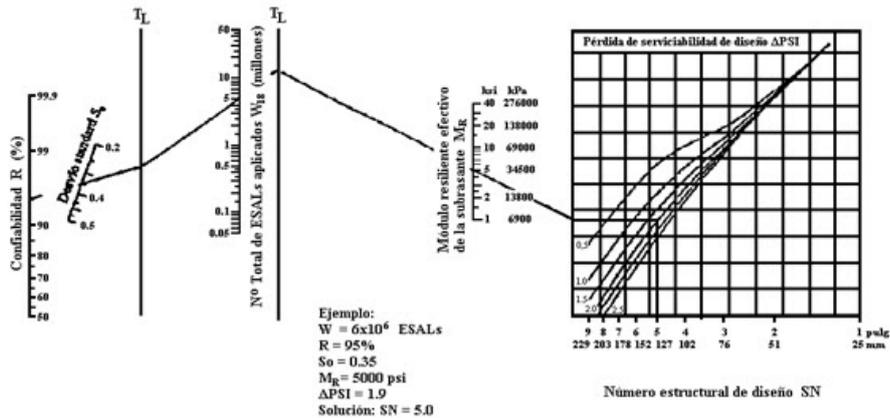


Figura 1-14. Coeficiente de aporte estructural de base y subbase  
Fuente: AASHTO Guide 1993



## Software de implementación y limitaciones de AASHTO 93

Debido a la complejidad de resolver en forma numérica la ecuación de regresión, varios investigadores propusieron la solución de implementar ábacos de fácil resolución en búsqueda del número estructural que satisfaga la ecuación. Uno de ellos se puede observar en la Figura 1-15 en el cual por medio de líneas de paso y los parámetros de entrada, se consigue obtener el SN necesario. Por otra parte, con avance de las computadoras, se conformaron software de diseño los cuales se introducen las variables conocidas y automáticamente se obtiene el número estructural buscado. En la Figura 1-15 se puede ver uno de estos programas, creado por el ingeniero Luis Vazquez.



Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vázquez

**Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)**  
 Desarrollado por: Luis Ricardo Vázquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento:  Flexible  Rígido

Confianza (R) y desviación estándar (So):  
 Confianza (R): [Confianza (R)]  
 So: [0.43]

Serviciabilidades inicial y final:  
 PSI inicial: [4.2]  
 PSI final: [ ]

Tránsito de diseño: [W18]

Pavimento flexible:

| Capa | Módulo de elasticidad (psi) | Coefficiente de capa (ai) | Coefficiente de drenaje (mi) | SN necesario | Espesor D (plg.) | Espesor D* (plg.) | SN* dispuesto |
|------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------|------------------|-------------------|---------------|
| 1    | [¿E/a?]                     | [ ]                       | [¿m?]                        | [ ]          | [ ]              | [ ]               | [ ]           |
| 2    | [¿E/a?]                     | [ ]                       | [¿m?]                        | [ ]          | [ ]              | [ ]               | [ ]           |
| 3    | [¿E/a?]                     | [ ]                       | [¿m?]                        | [ ]          | [ ]              | [ ]               | [ ]           |
| 4    | [MR]                        | [ ]                       | [ ]                          | [ ]          | [ ]              | [ ]               | [ ]           |

Cálculo de W18 para un SN:  
 SN: [ ] w18: [ ]

Quitar el control de variables

[Diseñar] [Ver informe] [W18 real] [Salir]

Figura 1-15. Abaco y programa de diseño en base a la guía AASHTO 93  
 Fuente: AASHTO Guide 1993 y Vázquez Varela

Si bien la guía AASHTO presentó un gran avance en comparación con otros métodos de diseño, la misma presentaba varias limitaciones. La más relevante, es la extracción de datos de la pista de prueba, que está situada en un sitio en particular, y los datos resultantes, están relacionadas con esas condiciones de contorno, como lo son el clima, los espesores y las calidades de materiales. Realizar evaluaciones con la guía AASHTO en condiciones muy alejadas a las reinantes en la pista de prueba puede presentar fallas a tiempos prematuros de construcción.



Otra cuestión son las cargas de tránsito pesadas utilizadas en la pista de la AASHO. El abanico de cargas utilizadas en ese tiempo dista mucho de los equipos de transporte que se utilizan hoy en día. Un factor importante dentro de esta consideración es la presión de inflado de los neumáticos, que puede influir en forma significativa en la vida útil del pavimento.

A su vez, los materiales evaluados en esa época se diferencian muchísimo a los utilizados actualmente. La inclusión de materiales reciclados, asfaltos modificados, materiales compuestos, geosintéticos, son consideraciones que escapaban en la época de confección de la guía AASHTO 93. También es importante considerar la implementación de ensayos de materiales en laboratorio mucho más sofisticados, que muestran una respuesta más representativa del comportamiento del tránsito sobre el pavimento.

## Métodos de diseño de pavimentos empírico – mecanicista

Las limitaciones planteadas por los métodos empíricos, y en mayor medida la guía AASHTO 93, llevaron a buscar metodologías de diseño de pavimentos que se independicen de las condiciones iniciales que tengan dichos métodos. El vislumbramiento de los métodos mecanicistas consiste en evaluar las propiedades mecánicas de los materiales que se utilicen y analizar la respuesta ante cargas representativas del tránsito. El límite en donde se encuentra la falla del material ya no involucra un parámetro como la serviciabilidad. En contrapunto, se buscaron criterios de falla de cada material y a distintos tipos de solicitaciones, en el cual los materiales agotan su capacidad de resistir al paso del tránsito.

Si bien las metodologías de diseño mecanicistas se siguen perfeccionando en la actualidad, las teorías en las que se fundamentan son más antiguas. En primer lugar, Bussinesq (1884) fue uno de los pioneros en obtener las tensiones y deformaciones de respuesta ante una determinada carga puntual, en un espacio semi-infinito.

En el año 1943, Donald Burmister aplicó las hipótesis de Bussinesq a los pavimentos, dando los primeros pasos a la teoría multicapa elástica. Teniendo en consideración que el mismo no es solo una capa semi-infinita sino en varias capas (más de dos generalmente) las cuales poseen sus propiedades definidas (Figura 1-16). Las cargas establecidas, vienen dadas por el neumático del eje de un camión que se considere en el análisis, cuyas variables para la introducción al análisis es el área de carga sobre el pavimento y la presión de inflado que se cargue. Con los datos de cargas y propiedades de materiales con espesores por capa, por medio de ecuaciones diferenciales, se pueden obtener las tensiones y deformaciones resultantes en toda la estructura del pavimento.

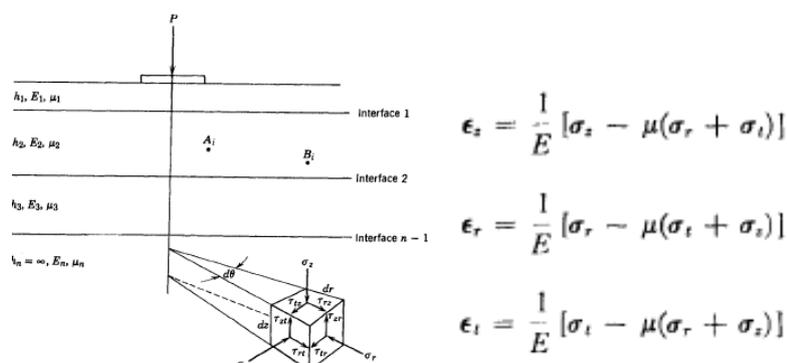


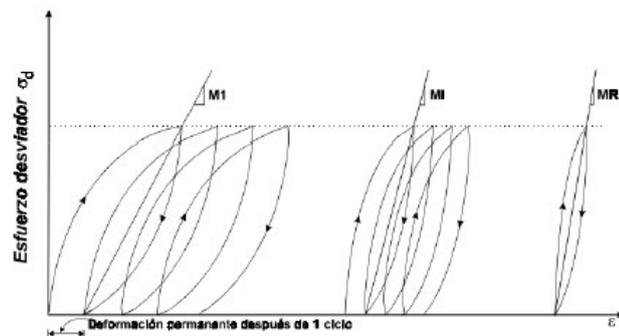
Figura 1-16. Sistema simplificado de las capas del pavimento y las deformaciones en las distintas direcciones

Fuente: Huang



Algunas consideraciones sobre el trabajo realizado por Burmister son las siguientes:

- Cada capa se comporta de forma elástica, homogénea, isotrópica y continua. Se caracteriza a cada una por medio de su módulo de elasticidad o módulo resiliente (Figura 1-17) y su coeficiente de Poisson.
- Cada una de las cargas que actúan sobre el pavimento se desarrollan como presiones sobre un área circular generalmente
- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. El contacto entre capas puede modelarse en condiciones de adherencia total (igualdad de deformaciones horizontales) o nula.
- Las deformaciones que se producen en el sistema son pequeñas.
- No se suelen considerar los esfuerzos de corte que se producen en las zonas de contacto entre las cargas y la superficie del pavimento.



$$M_r = K_1 P_a \left[ \frac{\theta}{P_a} \right]^{K_2} \left[ \frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{K_3}$$

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Figura 1-17. Modulo resiliente de suelos y su correspondiente ecuación de correlación.

Fuente: Rivera

En la actualidad, existe una infinidad de programas de cálculo de diseño de pavimento, con la base del sistema mecanicista. La amplia mayoría utiliza el sistema multicapa para la obtención de las tensiones y deformaciones en las capas de la estructura. A su vez existen tablas en donde se parametrizaron datos de cargas y propiedades de los materiales, y se resolvieron para casos particulares y se pueden encontrar resultados en forma rápida. Los sistemas de ábacos y tablas pierden su practicidad si los datos de entrada no coinciden con los utilizados en su formulación. En estos casos, queda una tarea de interpolación, bastante tediosa para desarrollar. Por último, se pueden citar los modelos de elementos finitos, ampliamente utilizados para realizar modelización de sistemas muy diversos.

La diversidad de los programas de diseño mecanicista radica en la evaluación de los criterios de falla del pavimento. Los criterios de falla nos indican el punto final al cual va a llegar la estructura de pavimento diseñada. Los criterios de falla más divulgados se refieren al ahuellamiento y la fatiga considerada en distintos puntos de la estructura. Si bien los programas de diseño calculan



las tensiones y deformaciones en toda la estructura, los puntos de falla más comunes corresponden a relacionar al ahuellamiento con el descenso vertical en la última capa antes de la subrasante, y la fatiga con la deformación a tracción en la fibra inferior a la capa asfáltica de rodamiento.

En función de las propiedades y los espesores de capa que se elijan, cada material tendrá una vida útil, expresada en un número de repetición de cargas, dependiendo del tipo de falla a considerar (sea ahuellamiento o fatiga). La vida útil, por cada año transcurrido se traduce en un daño acumulado en la estructura completa del pavimento. Por otra parte, se tiene el tránsito de diseño (obtenido por conteos de tránsito, número de ejes equivalentes o espectros de carga) el cual es el dato para contrastar con el daño acumulado en la estructura.

Como último estadio de los análisis y con la intención de llevar los diseños a campo, se implementaron las denominadas funciones de transferencia (Figura 1-18). Las mismas consisten en relacionar un nivel de ahuellamiento o fisuración esperable, con el daño acumulado obtenido en la predicción del diseño. Dichas funciones de transferencia necesitan un amplio desarrollo de calibración, ya sea en pistas de prueba o en tramos reales, donde se realice una medición periódica del avance en la vida del pavimento.

AC Top Down Cracking AC Bottom Up Cracking AC Rutting Transfer Functions NCHRP (1-37A) Models Info

$$N_f = 0.00432CC_H k_{f1} \beta_{f1} \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{k_{f2} \beta_{f2}} \left(\frac{1}{E}\right)^{k_{fa} \beta_{fa}}$$

$$C = 10^{4.84 \left[ \frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69 \right]}$$

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49H_{ac})}}}$$

$N_f$  - Number of repetitions to fatigue cracking  
 $\epsilon_t$  - Tensile strain at the critical location (in/in)  
 $E$  - Stiffness of the material (psi)  
 $H_{ac}$  - Thickness of AC layer (in)

Analysis Types  
 Nationally Calibrated Model  
 User Defined Model

Volumetric Properties  
 Air Voids ( $V_a$ )  (%)  
 Effective Binder Content ( $V_{be}$ )  (% By Volume)

Regression Coefficients  
 $k_{f1}$    $\beta_{f1}$    
 $k_{f2}$    $\beta_{f2}$    
 $k_{fa}$    $\beta_{fa}$

Figura 1.18- Extracto de las funciones de transferencia para fatiga en mezclas asfálticas  
 Fuente: Software 3D Move

Las fallas por ahuellamiento y fatiga corresponden a los casos típicos como así también con estudios sumamente desarrollados. Sin embargo, también se pueden citar la fisuración térmica y la fisuración por envejecimiento en mezclas asfálticas. La primera corresponde a sitios o periodos climáticos en los cuales el asfalto que se utiliza llega a un límite de tracción por contracción del material, que desemboca en una fisuración en la mezcla asfáltica. El otro tipo de falla, se lo conoce comúnmente como fisuración *up-down* (en contrapunto con la fisuración por fatiga que es del tipo *bottom-up*), ya que su inicio se corresponde en la superficie y se desarrolla hacia abajo. Cabe mencionar que este tipo de falla en los pavimentos se debe a un envejecimiento de la parte superior de la misma, que conlleva a una rigidización del material asfáltico y por ende un material frágil ante las sollicitaciones del tránsito.



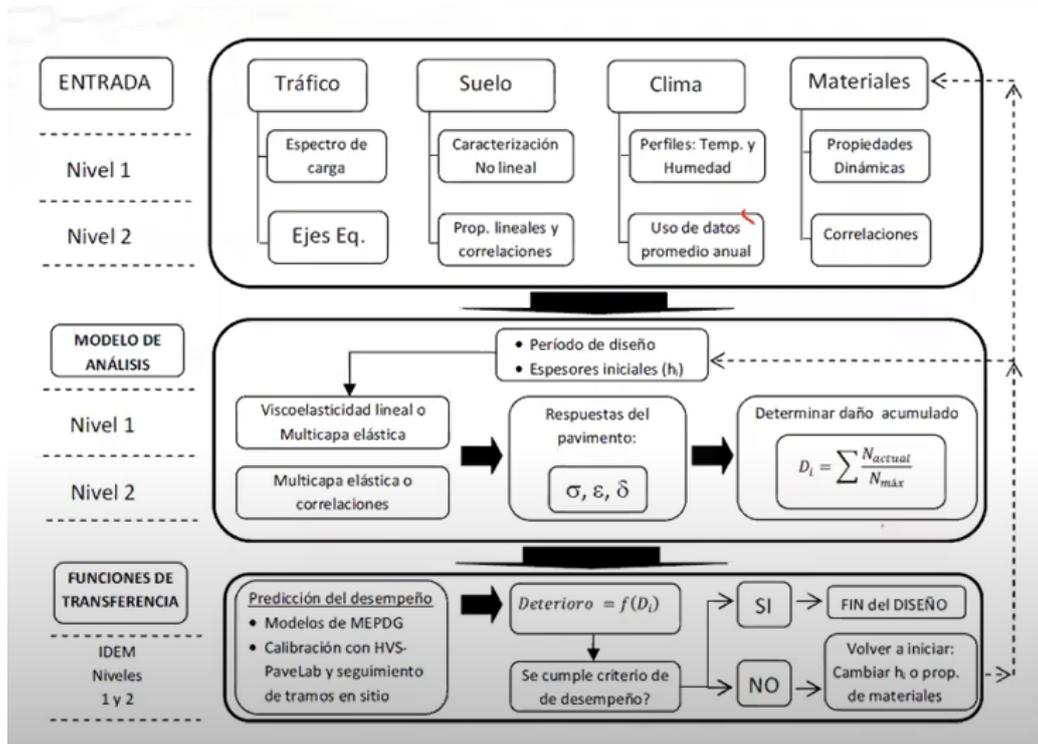


Figura 1-19. Sistema simplificado de las capas del pavimento y las deformaciones en las distintas direcciones

Fuente:

## Fatiga en mezclas asfálticas – Asfalto altamente modificado

El Centro de Investigaciones Viales LEMaC, tiene como uno de sus ejes principales, la ponderación de distintos residuos para utilizar dentro del pavimento. En particular, se hace énfasis al Neumático Fuera de Uso (NFU por sus siglas en español) y se realiza un amplio desarrollo en incorporarlo al asfalto en las tasas más grandes posibles.

En pequeñas proporciones, del entorno del 2 % al 5% de incorporación de caucho al asfalto, se encuentran mejoras sustanciales en comparación con el asfalto convencional de referencia. Las propiedades físicas obtenidas, como penetración, punto de ablandamiento, y recuperación elástica torsional, son comparables a ciertos asfaltos modificados, en los que se utilizan polímeros vírgenes para su obtención. En este sentido, obtener un asfalto con propiedades comparables a uno modificado, pero con residuos, coloca a esta clase de adiciones en un lugar privilegiado, con miras a procesos de obtención de materiales y constructivos mucho más amigables con el medio ambiente y que le den un destino final a un material, que es un gran foco de contaminación si no se lo trata adecuadamente.

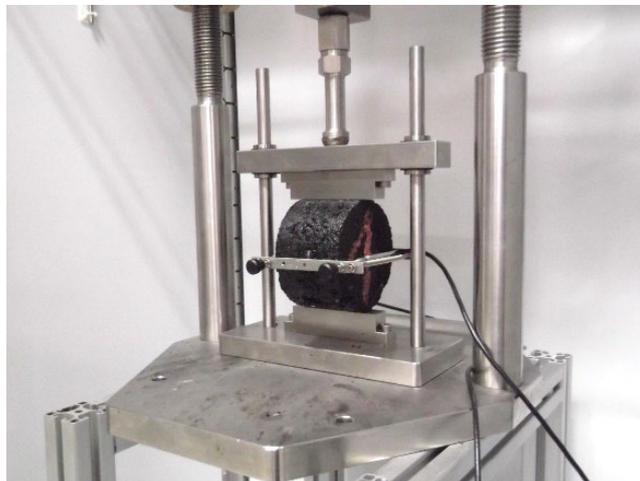
Como parte de la tesis asociada a este capítulo, se refiere a la incorporación del NFU en grandes cantidades. Se ha conseguido obtener asfaltos modificados con porcentajes de caucho desde un 15% a 25%. En estas proporciones se consigue aumentar el punto de ablandamiento y la viscosidad a altas temperaturas. Con esta cantidad de NFU, la mayor problemática que se presenta es la de dispersar el caucho en el asfalto, con la temperatura, revoluciones y tiempo adecuado, y de esta forma evitar su segregación en la masa de asfalto.





*Figura 1-20. Dispensador de altas revoluciones para conformar el asfalto caucho.  
Fuente: elaboración propia*

En estos asfaltos altamente modificados con caucho, es esperable que se tenga un desempeño eficiente con mezclas destinadas a evitar a la reflexión de fisuras de capas inferiores. A su vez, el fuerte aumento de la viscosidad que involucra la incorporación de este material genera una disminución en la susceptibilidad del asfalto a las altas temperaturas, disminuyéndose el fenómeno de deformación permanente que se presenta en esta condición climática.



*Figura 1-21. Ensayo de módulo dinámico de mezclas asfálticas por tracción indirecta  
Fuente: elaboración propia*

#### La evaluación de la fatiga en mezclas asfálticas en laboratorio

La evaluación de la fatiga como falla en mezclas asfálticas en laboratorio lleva a desarrollar múltiples formatos de ensayos, desde considerar una viga de cuatro puntos hasta un ensayo a tracción indirecta en distintas configuraciones de probetas. Sin embargo, el paso que más dificultades tiene es el de encontrar una correlación con el desempeño en campo.



El criterio más común que lleva al fallo del espécimen ensayado no es aquel que lo lleva a la rotura, sino el valor por el cual disminuye su módulo al 50 %; esto indica una pérdida importante de la capacidad estructural del material. A pesar de que el material todavía tiene capacidad de resistir cargas, ya no se está considerando el mismo material que se diseña y coloca en un principio, el cual ya pierde su carácter de homogéneo, y tiene numerosas microfisuras en el seno de su estructura.



*Figura 1-22. Ensayo de viga de fatiga de cuatro puntos.*

*Fuente:*

El daño por fatiga en las mezclas asfálticas es de los más costosos, si no se lo atiende en forma preventiva. En primera instancia, se pueden evidenciar microfisuras con el pasar del tránsito. En cuanto se deje pasar esta situación, el problema puede desencadenar en fisuras que interconectan las de menor tamaño, formándose macrofisuras, visibles al ojo humano. En este estadio, el daño es crítico y las fisuras se llegan a conectar formando un patrón típico de este fallo, al que se conoce popularmente como “piel de cocodrilo”.



## Bibliografía

Botasso, G. (2018). Dispersiones de neumáticos fuera de uso. Su empleo en mezclas asfálticas densas y antiderrapantes.

Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático. SIGNUS. Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso (2017)

Huang, Y. H. (1993). Pavement analysis and design.

Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas (2007). Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX). Ministerio de Medio ambiente y de Fomento de España

Rivera, J., Brizuela, L., Verdú, C., Domínguez, M., Villanueva, M., & Sosa, G. (2016). Modelo LEMaC B05 16 de estimación de constantes de las ecuaciones constitutivas de materiales granulares del ME PDG, a partir de análisis convencionales. Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito.

SIG-Vial. Vialidad Nacional. <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/vialidad-nacional/sig-vial>

Transportation Officials. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993 (Vol. 1). AASHTO.

Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1991). Principles of pavement design. John Wiley & Sons.



## CAPITULO 2

---

# Asfalto modificado con polvo de neumáticos fuera de uso

Mg. Ing. Adrián Segura

---

### Introducción - Aplicación de asfalto modificado con NFU en una mezcla CAC D20

El neumático fuera de uso (NFU), el material que lo compone se puede reciclar para diferentes usos, como pueden ser energía en hornos de cemento o también como adición en el proceso de modificación de los asfaltos para la elaboración de mezclas asfálticas. En los usos antes mencionados algunas cantidades se utilizan, pero también se acopian a la espera de un tratamiento que muchas veces no se realiza. Esta acumulación da lugar a la aparición de roedores e insectos como mosquitos e incendios de difícil control. Por otro lado, si se disponen finalmente en vertederos, trae inconvenientes, debido a su forma y composición, no pueden ser fácilmente compactados, ni se descomponen y, por lo tanto, consumen el espacio disponible para el enterramiento del resto de los residuos.

En la actualidad las mezclas asfálticas son utilizadas en su mayoría, en las construcciones viales, especialmente bajo la forma de concretos asfálticos, los que correctamente diseñados pueden brindar pavimentos con una larga vida útil. Sin embargo, esta duración puede verse notablemente reducida bajo condiciones adversas tales como: tránsito pesado, alto volumen de tránsito canalizado, zonas de frenado, intersecciones, paradas de autobuses, estacionamiento y playas de maniobras de grandes cargas, esfuerzos tangenciales en curvas cerradas, accesos a cabinas de peaje, etc. Este efecto se ve materializado especialmente cuando la temperatura es elevada, dando como resultado la aparición de severas deformaciones del tipo plásticas permanentes, ahuellamiento, generando condiciones de inseguridad en el traslado de los vehículos a altas velocidades.

Desde la tecnología de las mezclas asfálticas se pueden realizar diseños que permitan sumar un adecuado desempeño frente a estas exigencias. Por esto, se busca la modificación del cemento asfáltico utilizado en mezclas asfálticas del tipo densas, con adición de polvo de NFU. La utilización de éstos pretende mejorar el desempeño del ligante modificando sus propiedades reológicas y por ende el comportamiento de la mezcla, promoviendo a su vez una forma de deposición final de los NFU.

Las deformaciones plásticas permanentes son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, Figura 2-1, exactamente en las huellas por donde



ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Se generan por la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento. Estas son uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, debido a su incidencia preponderante en el camino, y su alta intervención como factor generador de accidentes por la acumulación de agua que en ellas se produce.



*Figura 2-1. Ahuellamiento  
Fuente: elaboración propia*

Por otro lado, dadas las velocidades de circulación que se registran actualmente en vía urbanas y rurales, las tipologías de los vehículos y el elevado número de accidentes ocasionados por los excesos de velocidad, surge también la necesidad de considerar desde la tecnología de las mezclas asfálticas nuevos diseños que permitan disminuir las distancias de frenado, evacuando más rápidamente el agua de la calzada y promoviendo una mayor adherencia neumático-calzada. Para tal fin, se consideran las micromezclas en caliente en donde, a efectos de garantizar una adecuada macro y microtextura, se otorgan discontinuidades en la curva granulométrica y con la relación tamaño máximo de árido versus espesor de la capa especial.

Las condiciones de regularidad superficial antes mencionadas deben permanecer en el tiempo, y no deteriorarse bajo la acción de las cargas del tránsito y de las condiciones ambientales. Es por ello por lo que se debe utilizar un ligante asfáltico modificado con polímero. Por esto, para este tipo de mezclas y prestación se busca obtenerlas a partir de realizarlas con un ligante con incorporación de polvo de NFU y evaluar su desempeño.

### La microdispersión por vía húmeda

La microdispersión de caucho por vía húmeda consiste en la adición del polvo de neumático en la masa del ligante asfáltico en determinadas condiciones de temperatura y acciones mecánicas, mediante el equipo de dispersión, Figura 2-2. Esta garantiza una adecuada interacción entre las fracciones de caucho y las fracciones malténicas y resinosas del asfalto, dándose el proceso de humectación e hinchamiento buscado.





*Figura 2-2. Equipo dispersor  
Fuente: elaboración propia*

### Mezcla densa CAC D19

La granulometría de la curva de la mezcla de agregados se ha realizado para una CAC D19 de acuerdo con los límites granulométricos planteados en las especificaciones vigentes en Argentina. La misma ha sido elaborada con tres ligante diferentes, una con asfalto base, otra con modificado AM3 y otro polvo de NFU y cada una de las mezclas se ha realizado teniendo en cuenta la metodología Marshall. También, se realizó el ensayo de ahuellamiento, Figura 2-3, y en la Figura 2-4 se observa las probetas ya ensayadas.



*Figura 2-3. Equipo medición de ahuellamiento  
Fuente: elaboración propia*



*Figura 2-4. Probetas ensayadas a ahuellamiento  
Fuente: elaboración propia*



### Microaglomerados discontinuos en caliente

Un microaglomerado discontinuo en caliente, es una mezcla de granulometría discontinua, que es elaborada y colocada en caliente como capa de rodadura de calzadas. Sus materiales componentes son la combinación de un cemento asfáltico modificado con polímeros, áridos que presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamaños intermedios del total de la gradación.

Se deben considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de una mezcla asfáltica, por un lado, la función resistente que es determinada por los materiales y los espesores de las capas a emplear en la construcción. Por otro lado, la función superficial, que es determinada por las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del camino para que resulten seguras y confortables.

En el caso de los microaglomerados, éstos aportan sólo función superficial, y son los que mejor performance desarrollan a nivel de superficie, generando texturas ásperas y rugosas. La macrotextura está dada por la longitud de onda del tamaño del agregado grueso, es la que permite la evacuación del agua que se comentó con anterioridad. Por otro lado, la microtextura está dada por la aspereza del mastic asfáltico conformado por el ligante y los finos y fillers de la mezcla, permitiendo las mejoras en la adherencia neumático y calzada. Ambas, en niveles adecuados permiten disminuir las distancias de frenado, con pavimento mojado, ya que se evacúa más rápidamente el agua y el agarre del neumático aumenta.

La evaluación se ha realizado sobre probetas confeccionadas para tal fin y elaboradas con asfalto modificado con NFU y con AM3, Figura 2-5, en las que se ha determinado la macro y micro textura antes y después de simular una sollicitación de tránsito. Esto se llevó a cabo en el equipo de ahuellamiento que permitió generar un deterioro en la superficie, Figura 2-6.



Figura 2-5. Muestras de 30 x 30 de MAC F10 con asfaltos con NFU y SBS

Fuente: elaboración propia



Figura 2-6. Procedimiento de carga con el WTT en las probetas - 3 pasadas una al lado de la otra.

Fuente: elaboración propia



La macrotextura se ha evaluado mediante el ensayo del parche de arena, Figura 2-7. Este consiste en extender sobre la superficie de un pavimento un volumen determinado de arena fina uniforme, que se distribuye y enrasa mediante un esparcidor, quedando la arena enrasada con los picos más salientes. Se procura extender la arena formando un círculo, con lo que es fácil determinar el área cubierta por la arena. A partir del volumen de arena utilizado y del área de pavimento cubierta por ella, se calcula una profundidad media de los huecos rellenos por la arena, valor que se utiliza como medida de la macrotextura superficial del pavimento.

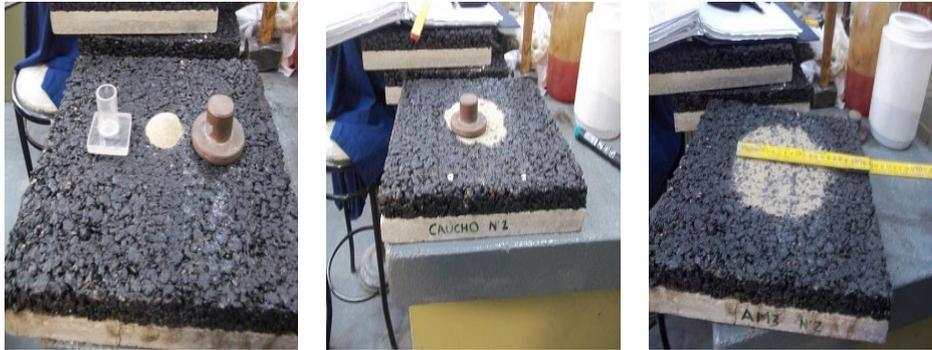


Figura 2-7. Medición de la macrotextura con el parche de arena

Fuente: elaboración propia

La microtextura se ha evaluado mediante el ensayo del péndulo TRRL. Este ensayo consiste en medir la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas, provisto en su extremo de una zapata de caucho, cuando la arista de la zapata roza sobre la superficie a ensayar, con una presión determinada, a lo largo de una longitud fija. Esta pérdida de energía se mide por el ángulo suplementario de la oscilación del péndulo, tal como se muestra en la Figura 2-8.



Figura 2-8. Medición de la microtextura con péndulo TRRL

Fuente: elaboración propia

Las mezclas presentadas CAC D19 y microconcreto discontinuo se han elaborado con asfalto con polvo de NFU, a este ligante se le ha incorporado un 8% de NFU. En ambas mezclas, es posible mencionar algunas observaciones y conclusiones tales como:

- La cantidad de polvo de NFU a incorporar en el ligante base, se ha definido en 8%. Este, ha surgido de la “tensión” entre la estabilidad de la dispersión y el máximo grado de modificación para garantizar la mejor performance desde el punto de vista reológico.
- Se observa una disminución en la penetración, un aumento del punto de ablandamiento y de la viscosidad en los dos ligantes modificados dando la noción que las modificaciones realizadas han generado ligantes menos susceptibles térmicamente.
- La resistencia al ahuellamiento en la CAC D19 elaborada con polvo de NFU, presenta el mismo orden que una mezcla confeccionada con un polímero virgen.



- El asfalto modificado con polvo de NFU, permite desarrollar microaglomerados con valores de macrotextura y microtextura iniciales similares a los de una mezcla realizada con polímero virgen.
- En cuanto a la microtextura, la responsable de disminuir la distancia de frenado en condición de pavimento mojado se ha visualizado una mejor performance en las mezclas realizadas con asfalto modificado con NFU. Esto se presume se debe a las condiciones de aspereza que el mastic adquiere con el polvo de neumáticos depositado sobre los áridos gruesos de la misma.

### Asfaltos altamente modificados con polvo de NFU en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja.

En la búsqueda de obtener asfaltos con altas prestaciones elásticas, el polvo de (NFU) se presenta como una alternativa que, a lo largo de los últimos años, se han realizado distintos estudios validando alguna de esas prestaciones. Una de las proporciones estudiadas, como las presentadas antes, es del orden del 8 % en las experiencias realizadas en Argentina. Con el objetivo de obtener mejoras en las propiedades mencionadas, se ha estudiado una mayor incorporación de NFU. La cantidad de éste a incorporar se ha definido en 24 % en un asfalto base clasificado como CA-30, para la obtención de un ligante modificado de alta viscosidad. Esto ha surgido de la “tensión” entre lograr valores, acordes al desempeño deseado, de penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y valoración del comportamiento reológico a través del módulo complejo y ángulo de fase. Este tipo de ligante ha sido buscado con la finalidad de ser evaluado en la elaboración de mezclas para retardo de fisuras.

Por otra parte, los pavimentos asfálticos presentan distintos tipos de fallas, que afectan a la calidad y las propiedades de sus materiales. Las más frecuentes son las de deformaciones permanentes (ahuellamiento), el agrietamiento por fatiga, el agrietamiento térmico y la fisuración refleja. Esta última, se puede definir como la discontinuidad que aparece en la capa asfáltica dispuesta como refuerzo en un pavimento existente, es decir que resulta de una prolongación ascendente de la fisura que presenta la capa inferior y que puede no corresponder a fallas del paquete estructural, Figura 2-9. Estas constituyen, no sólo un problema estético, sino una vía para la entrada del agua hacia las capas inferiores del pavimento, ocasionando degradaciones que afectan en todas las funciones del pavimento.



*Figura 2-9. Fisuración por reflejo de fisuras*

*Fuente: Martínez et al*

Las operaciones más habituales de conservación que se realizan con frecuencia en los pavimentos asfálticos son los bacheos, reparaciones de bordes, sellado de fisuras y juntas,



eliminación de exudación y fresados. En cuanto a las rehabilitaciones, se recurre a ellas cuando la sollicitación del tránsito y las acciones del clima han provocado, una disminución que es observable de las características iniciales del pavimento o cuando se desea satisfacer nuevas sollicitaciones que no han sido contempladas con anterioridad. En algunas situaciones, solo el aumento de espesor colocando una nueva capa asfáltica presenta el inconveniente de que los deterioros de las que se encuentran por debajo terminan reflejándose en la superficie en poco tiempo.

Las reiteradas tareas de mantenimiento en las carpetas de rehabilitación por deterioro prematuro, que se han colocado sobre pavimentos con fisuras existentes, suelen ser uno de los problemas frecuentes y generan aumento en los costos de conservación de los mismos. Mejorar el desempeño y durabilidad de las capas de refuerzos y los sistemas o mezclas que permitan retrasar la aparición de fisuras, contribuye a prolongar la vida útil de dichas estructuras. Esto se ha tratado, estudiando diferentes alternativas tecnológicas, considerando distintos materiales interpuestos entre las fisuras y las nuevas capas asfálticas colocadas. Por ello, considerando en la rehabilitación estructural de colocar una capa sobre otra fisurada y utilizar una capa intermedia como retardo de fisuras reflejas, es lo que ha motivado el desarrollo de la investigación para tesis doctoral en curso.

Las mezclas que con más frecuencia se han usado como capa intermedia de retardo de fisuras, han sido las arenas-asfalto (AA) de granulometría continua y que pueden ser elaboradas con asfalto convencional, pero en muchas situaciones, la propagación de fisuras se ha manifestado de manera temprana. En la búsqueda de mejorar el desempeño de esta mezcla es posible elaborarlas con asfaltos modificados. En ese sentido se elaboraron tres, una con asfalto convencional, otra fabricada con modificador con polímero virgen y otra con NFU. Esta última, presenta como dificultad que, dada su granulometría continua, alto contenido de finos y su fabricación con un asfalto con elevada tasa de NFU, no posee una adecuada cantidad de vacíos para alojar dicha proporción de NFU. Esto genera una disminución de la resistencia al ahuellamiento y comparando con las otras dos AA, un mejor desempeño a la propagación de fisuras. En la búsqueda de alternativa para mejorar estas dos características que se tensionan y considerar una mezcla que posea una mayor capacidad de alojar la alta tasa de NFU, se evaluaron mezclas con granulometría discontinua y que deben ser elaboradas con asfalto modificado. Estas presentan un menor ahuellamiento y poseen una mayor proporción de vacíos capaces de albergar al NFU. Asimismo, estos espacios ocupados parcialmente por el *mastic*, formado por los finos y el ligante modificado con NFU, generan un medio que dificulta el crecimiento de la fisura. Esto se estima se deba, a que ese medio está formado por una proporción de *mastic* respecto de los vacíos que, junto con la mejor elasticidad del ligante, permite a estas mezclas disipar mejor la energía y disminuir la velocidad de ascenso de las fisuras. En esa línea, se realizó un estudio de mezclas de discontinuidad creciente en la búsqueda de observar lo antes mencionado. Por ello, se evaluaron un microconcreto discontinuo en caliente (MAC) y otra que presenta una mayor discontinuidad, y de cada una de ellas se elaboró una con NFU y otro con polímero virgen.

La valoración de la capacidad de disminuir la velocidad de ascenso de las fisuras se ha realizado en probetas ensayadas con la metodología del modelo de reflejo de fisuras con equipo de cargas cíclicas (MR) LEMaC, Figura 2-10.





Figura 2-10. Equipo por cargas repetidas implementado  
Fuente: elaboración propia

Las probetas utilizadas para la investigación se realizaron conformándolas en tres capas de mezclas, como se puede ver en la Figura 2-11. En donde en la inferior se ubica la que representa a la carpeta deteriorada con fisuras preexistentes, la central que simula la capa de retardo de fisuras, elaboradas con diferentes mezclas con granulometrías y ligantes asfálticos a evaluar. Por último, la superior es la capa de rehabilitación, con una mezcla del tipo convencional, CAC D19.

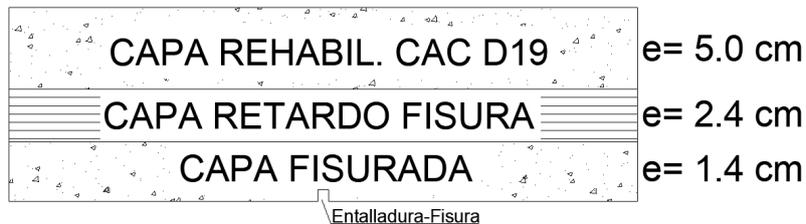


Figura 2-11. Esquema de probetas ensayas  
Fuente: elaboración propia

La aplicación de la carga se realizó en posición de flexión que es cuando la rueda de un vehículo pasa sobre una fisura, para ello se colocó dos apoyos de tipo móviles, Figura 2-12. Esta sollicitación es una de las que se encuentra sometida la mezcla de retardo de fisura en correspondencia con la junta o fisura generada.



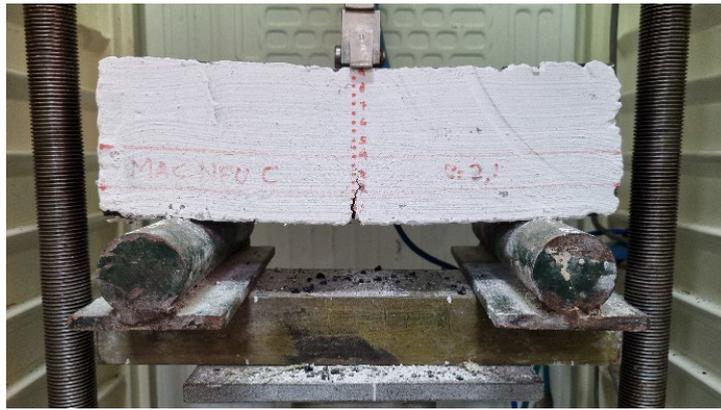


Figura 2-12. Apoyos y aplicación de la carga en viga  
Fuente: elaboración propia

En base a las primeras experiencias realizadas, en el asfalto con alta tasa de NFU y mediante la metodología y equipo mencionado sobre las tres mezclas propuestas, las arena – asfalto, el microconcreto discontinuo en caliente y otra de mayor discontinuidad, es posible mencionar algunas conclusiones:

- Los parámetros evaluados como la penetración, punto de ablandamiento,  $G^*/\text{sen}\delta$  en el ligante con NFU, muestran que se ha logrado una fuerte modificación en el asfalto base.
- La elaboración de los tres tipos de mezclas estudiados con asfalto con NFU muestran que en todas se produce una disminución de sus densidades. Esto se estima sea la respuesta que produce el efecto rebote del equipo de compactación por la presencia del NFU.
- Una mayor temperatura del  $G^*/\text{sen}\delta$  para el CA30+24% NFU, evidencia un mejor desempeño elástico y que asociado a la granulometría del MAC, da como resultado un menor ahuellamiento.
- El mayor valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  en CA30+24% NFU no se ve reflejado en un menor ahuellamiento en la AA NFU. Esto se estima se deba a que por su granulometría continua y agregado fino no es capaz alojar la cantidad de NFU, generando una disipación de energía en la compactación trasladándose a una menor densidad y mayor ahuellamiento.
- Todas las mezclas elaboradas con CA30+24 % NFU presentan mayor cantidad de ciclos para la rotura respecto a las otras mezclas.
- El ligante con NFU asociado a una estructura granular discontinua, con presencia de gruesos y una adecuada cantidad de finos, como es el caso de MAC con NFU, admite una mayor cantidad de ciclos hasta la rotura. Esto se estima se deba a que la fisura encuentra a su paso un *mastic* asfáltico más elástico que ocupa los vacíos de esta mezcla, disipando la energía y disminuyendo su rapidez de ascenso.
- Entre las mezclas AA, MAC y otra de mayor discontinuidad, elaboradas con CA30+24%NFU, presentan un incremento de vacíos, una creciente discontinuidad granulométrica y una mayor proporción de vacíos respecto a la cantidad de *mastic*, respectivamente. Asimismo, el MAC NFU es la que más ciclos admite hasta llegar a la rotura. Se estima que un aumento de la cantidad de vacíos que contengan un *mastic* asfáltico más elástico colabora a resistir más ciclos de carga. Esto último se considera que sucede hasta cierto incremento de vacíos, ya que cuando se incrementó la discontinuidad en la granulometría y con ellos los vacíos, se produjo una disminución de la cantidad de ciclos hasta llegar a la rotura.



## Bibliografía

AASHTO M320-10 (2022). Standard Specification for Performance – Graded Asphalt Binder. American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos. pp 7.

ANGELONE S., MARTINEZ F. (2006). Deformación de mezclas asfálticas permanentes. IMAE Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

Borrelí, M. (2020). Jornada del asfalto (virtual). Asociación uruguaya de caminos. Rehabilitación en mezcla asfáltica- Ruta1doble vía Acceso a Montivideo. Uruguay.  
<https://bitafal.com.uy/arena-asfalto-con-am3-en-ruta-1/>

BOTASSO G., GONZALEZ R., RIVERA J., REBOLLO O. (2005). Utilización de caucho en mezclas asfálticas. Congreso Ibero Latinoamericano del asfalto. Vol. 1. San José. Costa Rica.

CEDEX (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Ministerio de Medio ambiente y de Fomento de España. Madrid, España. ISBN: 978-84-7790-450-2. pp 63.

Delbono, L. (2014). Tesis doctoral: Estudio de grillas poliméricas en sistemas anti-reflejo de fisuras bajo solicitaciones dinámicas. Edutecne, La Plata, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-987-1896-38-7. pp 414.

Especificaciones Técnicas de mezclas asfálticas en caliente de bajo espesor. (2006). Comisión Permanente del asfalto de Argentina Versión 01. Buenos Aires. Argentina.

Francesio, C. A. (2001). El control de la fisuración refleja. XI CILA – Congreso Iberoamericano del asfalto. Lima, Perú.

IRAM 6835 (2020). Asfaltos para uso vial. Clasificación por viscosidad – Requisitos. Asphalt for pavements. Classification by viscosity. Requirements. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 12.

Martinez, F., Páramo, J., Poncino, H. (2018). Tecnologías especiales en construcciones viales. Curso de posgrado. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura. Escuela de posgrado y educación continua. Rosario, Argentina.

Plan de pavimentación 1200 cuadras (2001). Pliego de especificaciones técnicas. Municipalidad de La Plata. Buenos Aires, Argentina.

Pliego de especificaciones técnicas generales para microaglomerados asfálticos en caliente y semicaliente tipo F (2017). Dirección Nacional de Vialidad (DNV). Argentina.

Segura, A., Gallego, J., Botasso, G., Raggiotti, B. (2022). Congreso: Rubberized Asphalt - Asphalt Rubber RAR2022. Evaluation Of Anti-Reflective Cracking Mixtures Made With High Nfu Asphalts. Málaga, España. Locape - Artes gráficas, Lda. Portugal. ISBN: 978-989-53684-0-2. pp 11.

Segura, A., Positieri, M., Botasso, G. (2018). Libro: Utilización de asfalto modificado con NFU. Elaboración de un microconcreto discontinuo en caliente. Volumen I. Publicia. London, United Kingdom. ISBN: 978-620-2-43179-8. pp 286.

SIGNUS (2017). Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático. Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso. Madrid, España. ISBN 13 978-84-616-9263-7. pp 35.

Uguet, M., Larsen, D., Williams, E., Nosetti, A., Morano, P., Perazo, A. (2020). Arena asfalto como sistema antirreflejo de fisuras en la provincia de buenos aires. Congreso (virtual): XXXIX reunión del asfalto. Encuentro binacional argentino - paraguayo. Argentina. a0075. pp 15.  
<http://cpasfalto.com.ar/xxxix-reunion-del-asfalto-presentaciones/#1615905458736-9c8f7caa-e585>



UNE EN 12697-26 (2006). Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Rigidez. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 26.

UNE-EN 12697-22 (2008). Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Ensayo de rodadura. Test methods for hot mix asphalt. Wheel tracking. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 32.



## CAPITULO 3

# Producción de agregados para uso vial

Ing. Demian Daniel Palumbo

### Introducción - Definición de árido

Se denomina árido, al material granulado que se utiliza como materia prima en la construcción.

Son aquellos materiales rocosos naturales, como las arenas o las gravas, empleados en las argamasas.

•Real Academia Española (RAE)

Son partículas de roca, que unidas con o sin ligante, constituyen una parte o la totalidad de una estructura constructiva u obra civil.

•Sociedad Geológica de Londres

Materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas, que se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

•Smith M. R. and L. Collins, 1994



## Clasificación de los agregados



### Naturales Seleccionados

Gruesos: Cantos Rodados

Finos: Arenas



### Naturales Triturados

Gruesos: Piedra Partida

Finos: Arenas de Trituración



### Artificiales

Escoria, cascotes, poliestireno  
expandido

## Importancia del estudio de los agregados pétreos

Los agregados pétreos incorporados en mezclas asfálticas deben cumplir con características específicas, para no afectar la resistencia y durabilidad de dichos materiales. El origen de los agregados, la forma de extracción y su procesamiento, son factores que pueden influir sensiblemente en la calidad final de las obras.

En condiciones normales, un concreto asfáltico estará conformado aproximadamente por una proporción en peso de áridos del 90% - 95% sobre el peso total de la mezcla (Speight, 2015). En consecuencia, este material se posiciona como uno de los más importantes en el desempeño de una mezcla asfáltica en servicio, situación que motiva analizar y controlar la calidad de los agregados pétreos utilizados, ya que tendrá especial importancia si se busca extender la vida útil de estas obras.

## Proceso de obtención de los agregados pétreos

La obtención de agregados pétreos puede realizarse en cauces de ríos secos o en canteras.

En los cauces de río seco, se obtendrán agregados naturales haciendo uso exclusivamente de medios mecánicos como retroexcavadoras, significando un importante ahorro económico frente al uso de explosivos necesario en canteras. Es muy común que estos yacimientos no hagan uso de trituradoras para la reducción de tamaño, solo incluyendo zarandas para separar las distintas fracciones de tamaño.

En cuanto a las canteras, se deberá extraer el agregado por voladura directamente de masas de roca compacta y en el proceso intervendrán muchos más equipos para lograr obtener el agregado natural triturado.





Figura 3-1. a la derecha se observa la explotación en el cauce de un río, mientras que a la izquierda se observa una cantera.

Fuente: <https://www.levante-emv.com/>; <http://www.huarazenlinea.com/>

A continuación, se describirá las etapas y equipos comúnmente utilizados en canteras:

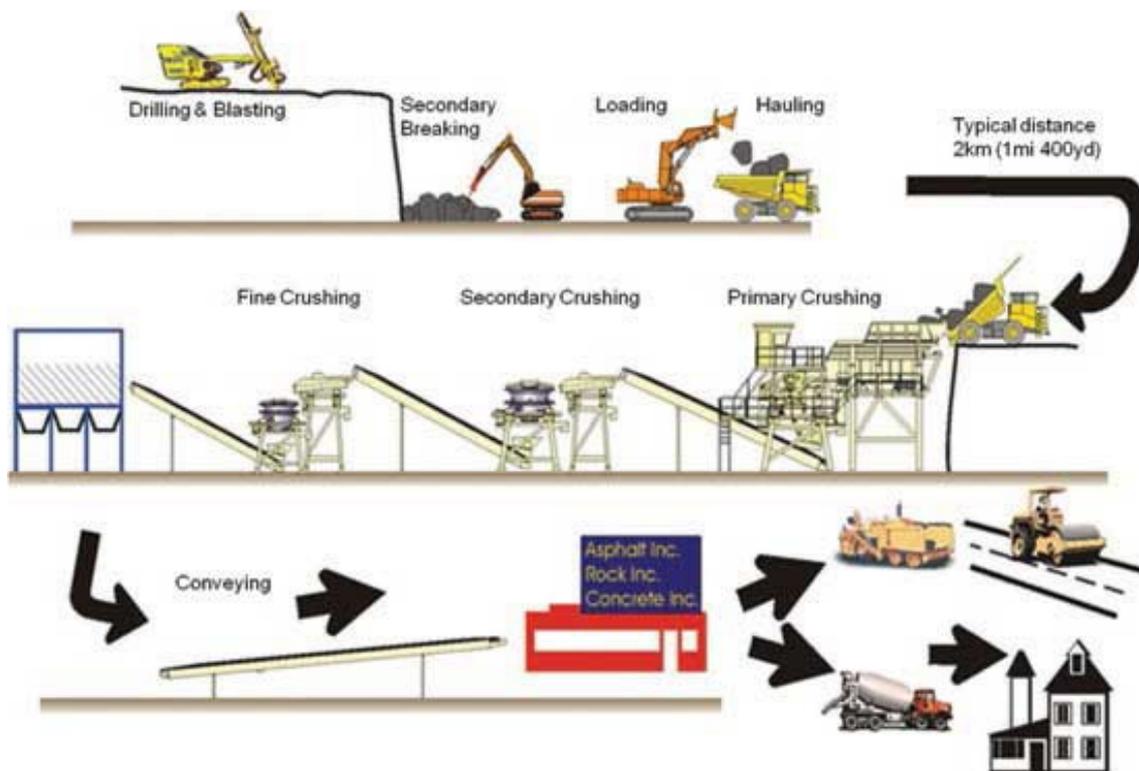


Figura 3.2- Esquema del procesamiento de agregados en cantera.

Fuente: <https://www.quarrymagazine.com/>

### Voladura

Cuando se decide el frente en que se realizará la voladura, unos camiones realizan las perforaciones en la roca siguiendo un patrón (malla) determinado por especialistas, ahí se insertarán los explosivos para efectuar la voladura. La malla se refiere a la distancia entre perforaciones e influye más que nada en el tamaño máximo de los bloques luego de la voladura.





Figura 3-3. a la derecha se observa un martillo neumático, mientras que a la izquierda se observa camión perforador.

Fuente: <http://www.interempresas.net/>; <https://www.srgglobal.com.au/>

### Transporte

Antes de transportar el material al acopio en la entrada de la trituradora primaria, los bloques más grandes se achican con un martillo neumático, esto se realiza tanto para facilitar el transporte como para reducir la roca al tamaño de alimentación máximo de la trituradora primaria.

Con una pala mecánica se cargan los camiones volcadores que llevan el material hasta el acopio antes del ingreso a la trituradora primaria.



Figura 3-4. a la derecha se observa la planta de trituración y cintas transportadoras. A la izquierda se observa una pala mecánica cargando un camión volcador para el transporte del material hasta la planta de trituración.

Fuente: <https://sanmartin.com/>; <http://mineroambiental.blogspot.com/>

### Trituración

La trituración se realiza en etapas hasta alcanzar el tamaño de agregado necesario.

### Alimentadores

Entre etapas se pueden ubicar alimentadores que por medio de movimientos vibratorios mueven el material y controlan su flujo a fin de cumplir con el caudal necesario en el sistema de procesamiento. Para su selección se deberá considerar la gradación del material que el alimentador va a manejar, la capacidad de alimentación, el tipo de material y sus características, si requiere separación o está se realizara en zarandas aguas abajo del sistema y si se requiere que el equipo sea portátil o fijo.



### Separación por granulometrías:

Para obtener las distintas granulometrías según los requisitos de la cantera, se intercala entre las distintas etapas de trituración zarandas que permiten separar el material por tamaños. Las granulometrías obtenidas dependerán del tamaño de los orificios de los paneles que componen la zaranda. Por lo general están compuestas por tres pisos con diferentes tamaños de orificio por piso. El material descenderá según el tamaño que tenga, a través de los orificios favorecido esto por el movimiento oscilatorio y vibratorio del equipo.



Figura 3-5. a la derecha se observa un alimentador. A la izquierda se observa una zaranda.

Fuente: <https://www.tecsup.edu.pe/https://m.made-in-china.com/>

Las zarandas se pueden clasificar:

- Por su movimiento:
  - Estacionarias
  - Vibratorias
- Por su posición:
  - Inclinas
  - Horizontales
- Por el número de cubiertas:
  - Simples
  - Múltiples

Transporte de material entre etapas:

Se utilizan cintas transportadoras que unen los distintos equipos según el Lay-Out de planta y se colocan al final de cada circuito de trituración para formar los acopios.

También, en algunas ocasiones, si resulta económicamente viable se las puede utilizar en reemplazo de los camiones volcadores para trasladar el material desde el frente de cantera hasta la planta de trituración.

Acopios:

Una vez triturado el material y segmentado por granulometría gracias a las zarandas, se formarán unos montículos por granulometría que actuarán como stock.



Para el despacho del material, unas grúas se encargan de cargar los vagones del tren o los camiones que ingresan a la planta para recoger el agregado.



Figura 3-6. Se observa acopios de material y una grúa cargando un camión para su despacho.

Fuente: <https://www.novemcoal.com/>

## Proceso de trituración

Una de las instancias más importantes en el procesamiento de agregados es la etapa de trituración, ya que además de reducir el tamaño del agregado pétreo, le conferirá al mismo una morfología cúbica y angulosa que lo hará más apto para su uso en mezclas asfálticas. Por lo tanto, es necesario reforzar los controles en esta etapa en particular, ya que una selección inadecuada de trituradoras o cantidad de etapas de trituración podrían afectar la morfología obtenida y por ende la calidad del material vendido por la cantera.

### Las etapas de trituración

Todas las trituradoras tienen una tasa de reducción limitada, lo que significa que la reducción de tamaño se hace por etapas. El número de etapas depende del tamaño de las rocas en la alimentación y del producto requerido. A su vez, el número de etapas puede ser una variable con incidencia directa en la calidad del agregado, ya que al incluir en etapas finales trituradoras que por sus características generan agregados con mejores coeficientes de forma, supondría un producto final con formas más cercanas a las deseables (agregados cúbicos).



|  |
|--|
| <b>Ejemplo:</b><br>Alimentación 80% menor a 400 mm<br>Producto 80% menor a 16 mm |
| $R = \text{Tasa de reducción total} = 400\text{mm} / 16\text{ mm} = 25$          |
| $R_t = R_1 \times R_2 \times R_3 \times R_n \geq 25$                             |
| $R_t = 3 \times 3 \times 3 = 27 \geq 25$   |
| $R_t = 10 \times 3 = 30 \geq 25$   |

Figura 3-7. ejemplo de cálculo de la tasa de reducción  
Fuente: elaboración propia

En la Figura 3-7 se observa cómo según la trituradora elegida y su tasa de reducción puede hacer que una planta necesite tres etapas de trituración o dos como en el último caso donde se plantea una trituradora con una tasa de reducción de 10 y una segunda etapa con una tasa de reducción de 3.

#### Índice de abrasión

El índice de abrasión será una de las determinaciones más importante que se deberá hacer antes de la puesta en servicio de los equipos en las canteras. Determinará como una roca dependiendo de su mineralogía desgastará los revestimientos de acero de la trituradora. Un índice de abrasión elevado superior a 0,6 hará que trituradoras a priori ideales por su capacidad de producción y tasa de reducción, no puedan ser seleccionadas por los elevados costos de mantenimiento que provocaría el desgaste excesivo de sus piezas de recambio.

| Tipo de trituradora | Tasa de reducción | Coefficiente de forma | Grado de abrasividad | Consumo de energía |
|---------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| Rodillos            | Bajo 3:1          | Muchas lascas         | Poca                 | Normal             |
| Martillos - Impacto | Muy alto 20:1     | Muy bueno             | No abrasivo          | Muy alto           |
| Conos               | Alto 10:1         | Bueno                 | Todo tipo de roca    | Normal             |

Figura 3-8. tipos de trituradoras y sus prestaciones.  
Fuente: elaboración propia

| Máquina    | Método de reducción |          |               |            |  |
|------------|---------------------|----------|---------------|------------|--|
|            | Impacto             | Desgaste | Cizallamiento | Compresión |  |
| Impactor   | ■                   |          |               |            |  |
| Rodillos   |                     |          | ■             |            |  |
| Conos      |                     |          |               | ■          |  |
| Mandíbulas |                     |          |               | ■          |  |

Figura 3-9. mecanismos de reducción de tamaño prioritarios en distintos equipos de trituración.  
Fuente: elaboración propia



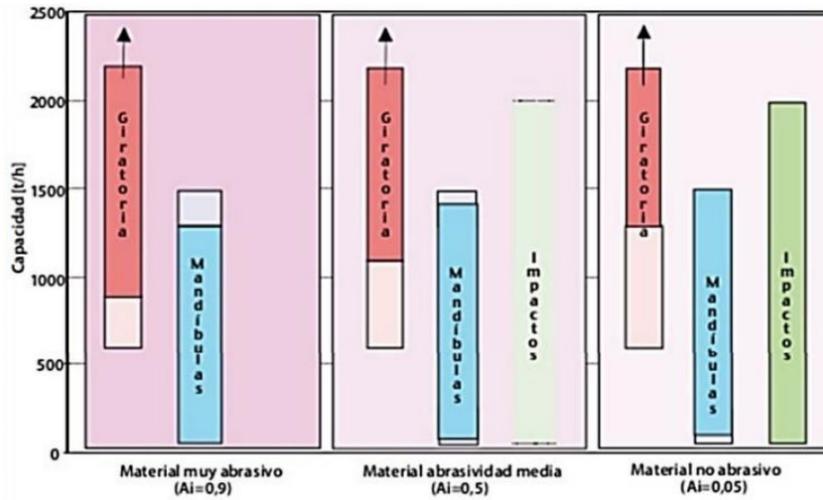
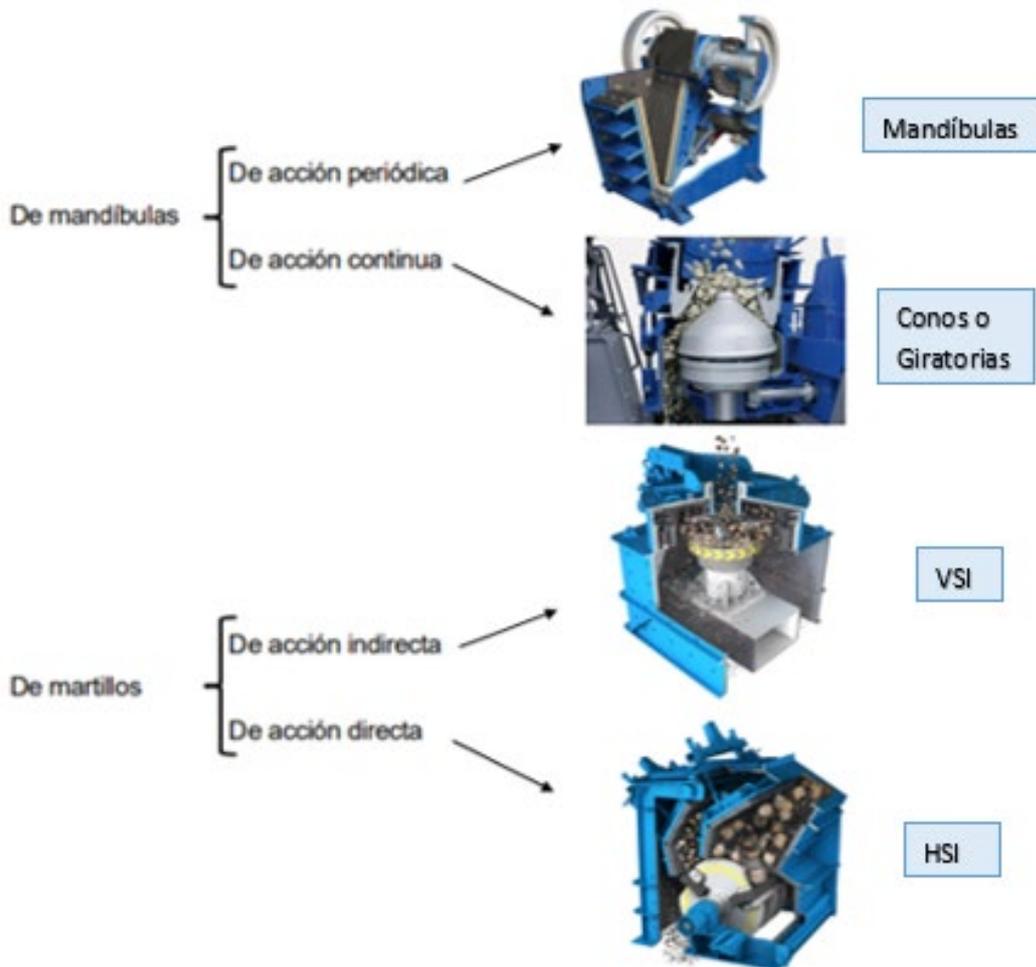


Figura 3-10. Selección de trituradora dependiendo de su capacidad y el índice de abrasión de la roca.  
Fuente: Eloranta 2008

### Tipos de trituradoras

Las trituradoras se pueden dividir en tipos de acuerdo al elemento de la máquina que efectúa la desintegración. Dependiendo del diseño y de cómo trabaje el sistema de trituración, la reducción del árido puede efectuarse por compresión, impacto o percusión y abrasión o atricción.



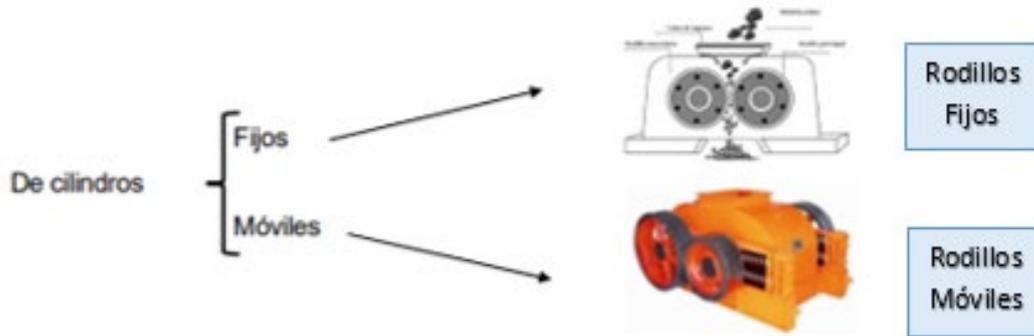


Figura 3-11. tipos de trituradora  
Fuente: adaptación propia

Cada tipo cuenta con una variada gama de tamaños y capacidades de producción. Su elección se basa conforme a los esfuerzos a los que se someten las rocas y a las ventajas técnico-económicas propias de cada máquina.

Cabe resaltar que los esfuerzos a los que se ve sometida la roca dentro de la cámara de trituración, en ningún caso será único, sino que será una combinación de distintos esfuerzos en los que algunos tendrán mayor preponderancia que otros, convirtiendo a ciertos equipos en más aptos para un tipo de roca o para determinada calidad de material requerido.

En las cámaras de trituración se suelen producir esfuerzos de cizallamiento, “además de los principales del equipo”, los cuales se querrán evitar ya que provocarán partículas lajosas y por consiguiente un material de menor calidad para su uso en obras viales.

#### Trituración Móvil

En algunos casos puede resultar óptimo instalar equipos de trituración móvil. Los hay de distintos tipos cuya principal diferencia es la capacidad de movimiento que tienen, pero en forma general se trata de los equipos mencionados anteriormente que se encuentran montados sobre un sistema el cual les permite cierta movilidad.

Entre las ventajas frente a un sistema de trituración estacionario podemos nombrar:

- Reducción en costos de transporte
- Menor gasto de mantenimiento de caminos
- Mayor seguridad de trabajo
- Más flexibilidad

De todas formas, es necesario hacer un análisis técnico-económico antes de seleccionar este tipo de trituración, ya que por ejemplo a partir de cierta capacidad de producción requerida, este sistema dejará de ser rentable.



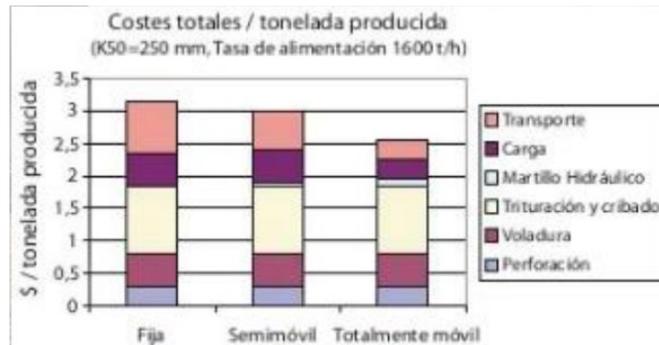


Figura 3-12. comparación de costos de distintos sistemas de trituración  
Fuente: Eloranta 2008

### Rendimiento de la trituradora

El rendimiento de una trituradora se mide en base a el coeficiente de reducción, la tasa de producción, el consumo de energía y la calidad (granulometría y morfología de las partículas). Para obtener un rendimiento adecuado se deberá considerar las características del material procesado, la distribución de tamaño del material de alimentación y su humedad, y parámetros de la trituradora como la cinemática y geometría de la cámara de trituración.

### Influencia del proceso de trituración en la calidad del árido.

Los objetivos son estudiar los efectos que los procesos de trituración ejercen sobre la calidad de los agregados pétreos a emplear en mezclas asfálticas y hormigones, aplicados a obras civiles, desde la perspectiva de la construcción sostenible.

- Explorar los procesos actuales para la obtención y procesamiento de agregados pétreos para la construcción.
- Investigar los procesos de trituración de agregados pétreos e identificar posibles cambios que permitan obtener mayor aprovechamiento de los recursos, con menores costos asociados desde la perspectiva de la sostenibilidad.
- Detectar cómo aprovechar las propiedades intrínsecas de los materiales a partir de los sistemas de industrialización para la optimización de los productos que de ellos se obtienen.
- Evaluar de qué manera las modificaciones en los procesos tecnológicos en la etapa de producción de áridos pueden propiciar mejoras en las características finales de los agregados triturados (en particular su forma, textura, grado de limpieza y distribución granulométrica) y, por ende, de las mezclas asfálticas y hormigones que con ellos se elaboran.

### Estado de avance

Como se explicó, el procesamiento de agregados está conformado por distintos equipos interrelacionados, que, con un determinado ajuste de sus variables, permitirá obtener un árido de un cierto nivel de calidad.

Las variables intervinientes en el proceso son diversas, por lo que es necesario seguir un determinado criterio para acotar el estudio a aquellas más significativas.



Si una cantera establece como meta mejorar la calidad de los áridos producidos, como primera instancia debería conocer cuáles son los requisitos habituales que deben cumplir los agregados gruesos y finos, tanto bajo los requisitos de Vialidad Nacional (Vialidad Nacional. 2017), (Vialidad Nacional, 2020), como el requerido por algún cliente.

La calidad de los agregados pétreos está determinada por características relacionadas con su origen geológico y por otras relacionadas con su morfología y granulometría, en especial éstas, dependerán del modo en que sea procesado el agregado para obtener formas más cercanas a los parámetros deseados. Así, se podría elegir modificar una amplia gama de variables en distintos sectores del proceso en respuesta a requisitos de calidad, como la obtención de agregados más cúbicos. Por otro lado, la necesidad de parámetros morfológicos específicos, podría influenciar también la selección de equipos.

En cuanto a las características petrológicas, determinadas por la litología del frente de explotación, establecerán los parámetros intrínsecos de la roca que tendrán gran influencia en la calidad del agregado. Estas características implícitas de la roca dependerán del frente explotado y no podrán ser modificadas por el proceso realizado, pero al igual que los parámetros morfológicos del agregado, sí afectará a la elección de los equipos para su tratamiento, ya que incidirá en la eficiencia, la durabilidad y los costos.

Es evidente, que para realizar una correcta elección de los equipos y de la configuración de las máquinas, será necesario realizar los ensayos pertinentes, con el fin de conocer la mineralogía y textura de la roca a procesar, la granulometría y la morfología obtenida en distintas etapas del proceso.

Actualmente se analiza como ciertas variables del proceso, ejercen efectos sobre la morfología y granulometría del agregado. Para ello toda la información obtenida de ensayos se está interrelacionando con la configuración de los equipos utilizada para producir la muestra ensayada.

La información obtenida se cargó en una base de datos que además de facilitar el análisis, servirá como metodología para el control de calidad de la cantera.

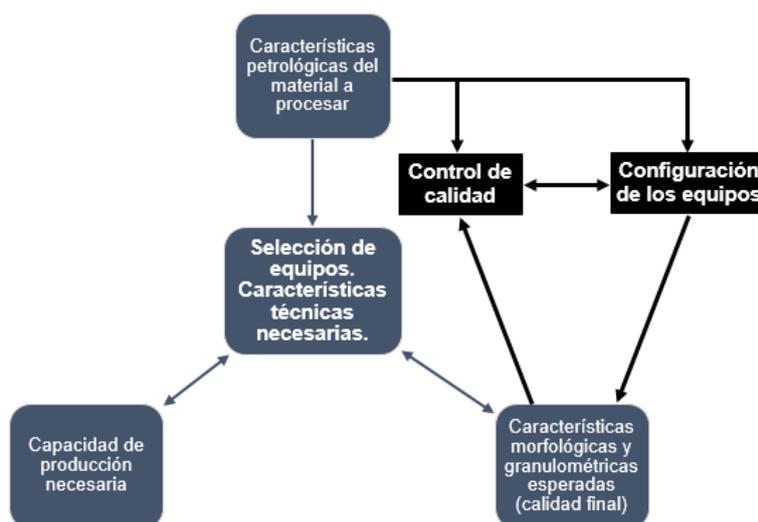


Figura 3-13. Aspectos a considerar para realizar un control de calidad adecuado.

Fuente: Elaboración propia



Para poder iniciar la recolección de información, se tomó como punto de partida un número limitado de variables del proceso con posibilidad de ampliarlo en un futuro. Limitar la cantidad de variables a aquellas que, por bibliografía, especificaciones técnicas y/o recomendaciones operacionales sobresalen del resto, permitió acotar el estudio en esta primera instancia. Entre alguna de las variables analizadas, se puede nombrar a modo de ejemplo las siguientes:

| Sector       | Variable   |
|--------------|--|
| Voladura     | Diámetro de barreno (Eloranta, 2008)                                     |
| Alimentación | Velocidades de alimentador   |
| Trituración  | Distribución de partículas en la cavidad de trituración (Eloranta, 2008) |
|              | Cámara de trituración (Duda, 1977)                                       |
|              | Nivel de llenado de cámara (Eloranta, 2008)                              |
|              | C.S.S. – Closed Side Setting (Schouenborg, 2008)                         |
|              | Velocidad de rotación del eje (Duda, 1977)                               |
|              | Tipo de circuito de trituración (Eloranta, 2008)                         |

Figura 3-14. Variables del proceso analizadas.  
Fuente: Elaboración propia

Para establecer la interacción entre la información obtenida del proceso y los ensayos implementados se realizó la toma de muestras, realización de ensayos, análisis de resultados y carga de datos, esquematizado en el siguiente diagrama de la Figura 3-15.

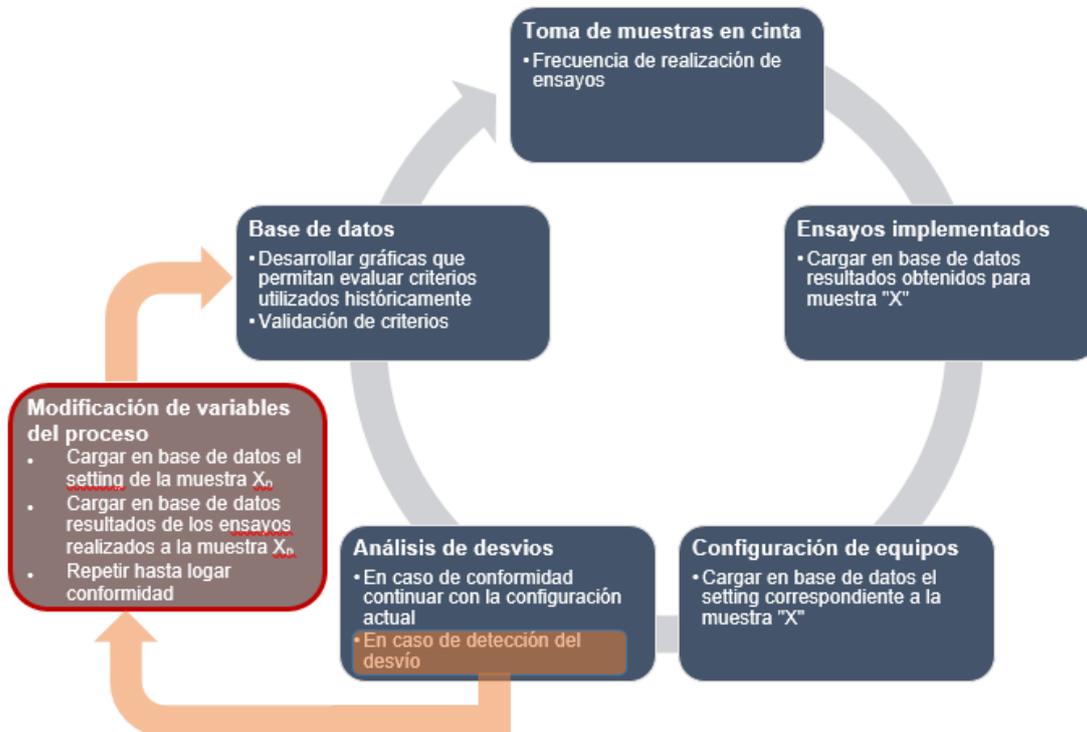


Figura 3-15. Procedimiento para realizar el control de calidad en cantera.  
Fuente: Elaboración propia



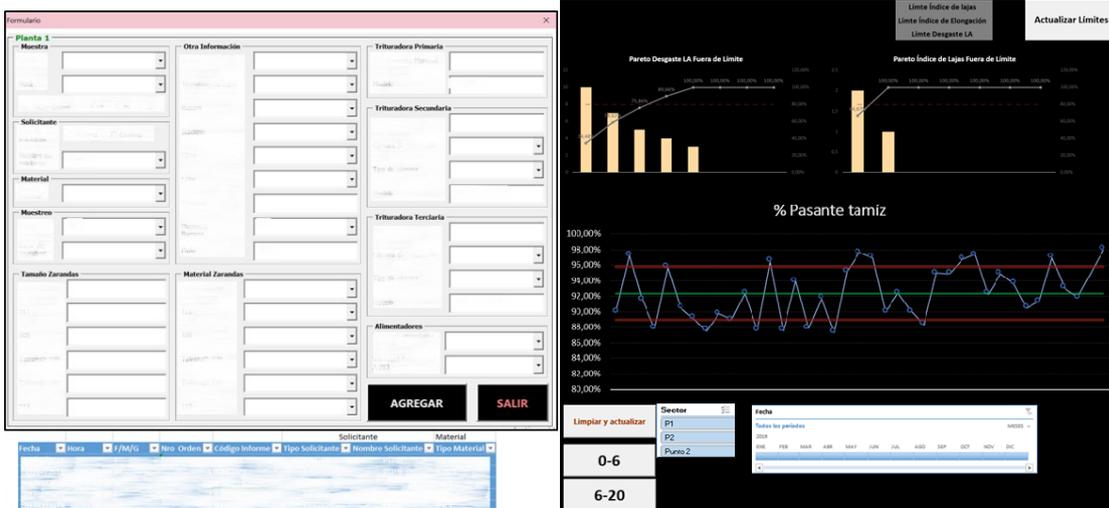


Figura 3-16. Dashboard y formulario de carga de información en base de datos.  
Fuente: Elaboración propia

| Agregado Grueso  |                       |            |
|--|-----------------------|------------|
| Plan de Ensayos  | Norma                 | Frecuencia |
| Granulometría  | IRAM 1505 / IRAM 1501 | Diaria     |
| Índice de Lajas  | IRAM 1687-1           | Semanal    |
| Elongación   | IRAM 1687-2           | Semanal    |
| Angularidad del agregado                                 | AASHTO 326-05         | Semanal    |
| Polvo adherido   | IRAM 1883             | Semanal    |
| Densidad relativa, densidad aparente y absorción de agua | IRAM 1533             | Semanal    |

Figura 3-17. Ensayos realizados a las muestras de agregados pétreos.  
Fuente: Elaboración propia



## Bibliografía

Duda, W. 1977. Manual tecnológico del cemento. Barcelona: Editores Técnicos Asociados S. A.

Eloranta, J. 2008. Manual de trituración y cribado. Tampere: Metso Minerals.

Schouenborg, B. 2008. Microstructure versus mechanical properties and influence on aggregate production (a contribution to project planning and collaboration). Workshop on Manufactured Sand. Stavanger: SINTEF Building and Infrastructure.

Speight, J. 2015. Asphalt Materials Science and Technology. Butterworth-Heinemann. doi:10.1016/C2013-0-15469-4.

Vialidad Nacional. 2017. Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos. Recuperado el 13 de Septiembre de 2020, de [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/petg\\_1.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/petg_1.pdf).

Vialidad Nacional. 2020. Pliego Borrador - Edición 2019. Recuperado el 27 de Julio de 2020, de <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/vialidad-nacional/institucional/normativa/investigacion-y-desarrollo>.



## CAPITULO 4:

---

# Nanomodificación de asfalto

Ing. Federico I. Ortiz de Zárate

---

### Introducción

El asfalto, como material termoplástico que es, modifica sus propiedades viscoelásticas (viscosidad, ductilidad, elasticidad, etc.) frente a los cambios de temperatura. A temperaturas altas -por encima del punto de ablandamiento- el asfalto se comporta como un líquido viscoso, mientras que a temperaturas bajas tiene las propiedades de un sólido elástico.

Otra clase de materiales termoplásticos muy importante es la de los polímeros termoplásticos. Una gran variedad de polímeros termoplásticos se usan en la vida cotidiana debido a las excelentes propiedades que tienen. Sin embargo, para determinadas aplicaciones se requieren propiedades mejores que las que un polímero por sí solo puede ofrecer, por ejemplo: aplicaciones donde se necesita una mejor capacidad de aislamiento térmico, mejor resistencia mecánica, mayor impermeabilidad frente a gases, entre otras. Para este tipo de usos más exigentes se utiliza un tipo de material compuesto llamado *nanocomposito polimérico*, el cual está conformado por una base polimérica y un nanomaterial como aditivo. Los nanocompositos poliméricos presentan propiedades muy superiores a las que tienen los polímeros termoplásticos por sí mismos, gracias a la combinación de las propiedades de los materiales que los constituyen.

Gracias a los excelentes resultados que se fueron obteniendo con el correr de los años en el desarrollo de materiales compuestos termoplásticos, y en particular de nanocompositos termoplásticos, a inicios del siglo XXI comienzan a aparecer los primeros trabajos científicos que utilizan nanomateriales para modificar asfalto, con el objetivo de mejorar el desempeño y la vida útil de los mismos.

### Nanomateriales

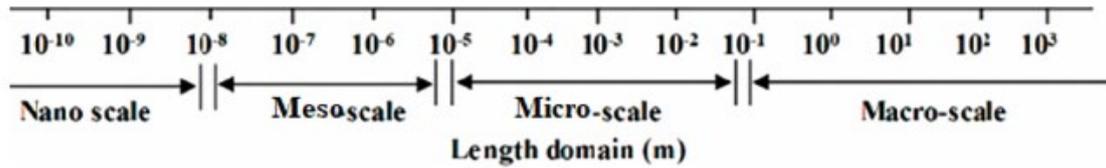
Los nanomateriales se definen como aquellos materiales que tienen al menos una de sus dimensiones en la nanoescala (entre 1 y 100 nm<sup>1</sup>, ver Figura 4-1). Tienen una característica distintiva que hace que presenten propiedades muy diferentes a las que tienen los mismos materiales en la macroescala: su muy alta superficie específica. Esta característica única es, en parte, la responsable de que pequeñas cantidades de nanomaterial puedan generar efectos muy grandes al incorporarse a un asfalto.

---

1 1 nm = 10<sup>-9</sup> m



Cuando hablamos de nanomateriales estamos refiriéndonos a una categoría muy amplia de materiales, que abarca una gran variedad de estructuras y propiedades. Una forma de clasificarlos es según la cantidad de dimensiones del nanomaterial que no están en la nanoescala. Así podemos separarlos en tres grandes grupos, como se ve en el cuadro 4-1.



| <b>Dimensión cero</b><br><i>(tres dimensiones en la nanoescala)</i>  | <b>Unidimensional</b><br><i>(dos dimensiones en la nanoescala)</i>  | <b>Bidimensional</b><br><i>(una dimensión en la nanoescala)</i>  |
|--|---|--|
| <u>Nanopartículas:</u>   | <u>Nanotubos:</u>   | <u>Nanocapas:</u>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• nano-SiO<sub>2</sub> (nanosilica)</li> <li>• nano-TiO<sub>2</sub></li> <li>• nano-ZnO</li> <li>• nano-CaCO<sub>3</sub></li> <li>• nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nanotubos de carbono (de simple-pared y multi-pared)</li> <li>• Halloysita (nanotubo natural)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Montmorillonita (MMT)</li> <li>• Vermiculita (VMT)</li> <li>• Rectorita (REC)</li> <li>• Grafeno</li> </ul> |

Figura 4-1. Distintos rangos de dimensiones y sus ejemplos

Fuente: elaboración propia

## Compositos

Los materiales compuestos (compositos) se forman por la combinación de dos o más fases distintas entre sí, para conseguir una combinación de propiedades que ninguno de los materiales individuales tiene por sí solo. Los mismos se pueden clasificar de diversas maneras: por los tipos de materiales que los componen, por su morfología, su microestructura, etc.

En particular, cuando hablamos de asfalto nanomodificado estamos hablando de un tipo de material compuesto conocido como *de matriz continua y fase dispersa*, donde la matriz continua es el asfalto (o el asfalto modificado con polímero) y la fase dispersa la constituye el nanomaterial -ya sea en forma de nanopartículas, nanotubos o nanocapas-. Se puede hacer otra subdivisión que separe este tipo de materiales compuestos en tres subgrupos: macrocompositos, microcompositos, y nanocompositos, según el tamaño de las partículas de la fase dispersa se encuentre en la macroescala, microescala o nanoescala.



## Obtención de asfalto nanomodificado

El procedimiento más común para obtener asfalto nanomodificado en laboratorio es la *dispersión por vía húmeda* (la misma que se utiliza para modificar asfaltos con polímeros), para la cual se utiliza un dispersor de alta velocidad de corte Figura 4-2. Los pasos a seguir se resumen a continuación:

- Se calienta el asfalto base en estufa hasta una temperatura en la que sea trabajable, procurando dejarlo en la estufa el mínimo tiempo posible (para evitar el envejecimiento excesivo).
- Se vuelca el asfalto caliente en el recipiente donde se realizará la nanomodificación. Se lleva el mismo a la temperatura que se mantendrá durante toda la dispersión.
- Se comienza la dispersión a las revoluciones por minuto (rpm) deseadas.
- Se agrega el nanomodificador en un lapso de tiempo adecuado. Si se desea, se puede agregar también un modificador polimérico en este paso.
- Se sostiene la dispersión durante un tiempo determinado. Al finalizar este tiempo, se detiene la dispersión y se trasvasa el asfalto a los recipientes requeridos para llevar adelante la caracterización del mismo.



Figura 4-2. Dispersor de asfalto tipo rotor-estator  
Fuente: elaboración propia

Algunas de las variables del proceso de dispersión que se pueden controlar son: el tiempo de dispersión, la temperatura, las revoluciones por minuto, las características del nanomaterial (tipo de nanomaterial, granulometría, grado de modificación), concentración del nanomaterial, tipo de asfalto base (si está modificado con polímero o no, tipo de polímero, concentración, etc.), entre otras. Cada uno de estos parámetros tiene efecto sobre las propiedades finales del asfalto nanomodificado.

### Ejemplos de nanopartículas y su efecto en asfaltos

Uno de los nanomodificadores de asfalto más comunes es la nanosilica. La nanosilica es un nanomaterial perteneciente al grupo de las nanopartículas (dimensión cero). Se trata de un



polvo blanco de SiO<sub>2</sub> amorfo, y al ser un nanomaterial muy económico, es uno de los más estudiados (Figura 4-3).



Figura 4-2. Izq: CaCO<sub>3</sub> (filler), fracción menor a 63  $\mu\text{m}$ . Der: nanosilica. Dispensor de asfalto tipo rotor-estator

Fuente: Crucho et al

La nanosilica modifica el comportamiento reológico del asfalto mejorando su resistencia a ahuellamiento y a la fatiga. En la Figura 4-4 se pueden observar resultados de un trabajo reciente que pone de manifiesto la mejora en la resistencia a la fatiga de asfaltos modificados con 1, 2 y 4% de nanosilica, en términos del módulo complejo ( $G^*$ ) vs la cantidad de ciclos aplicados.

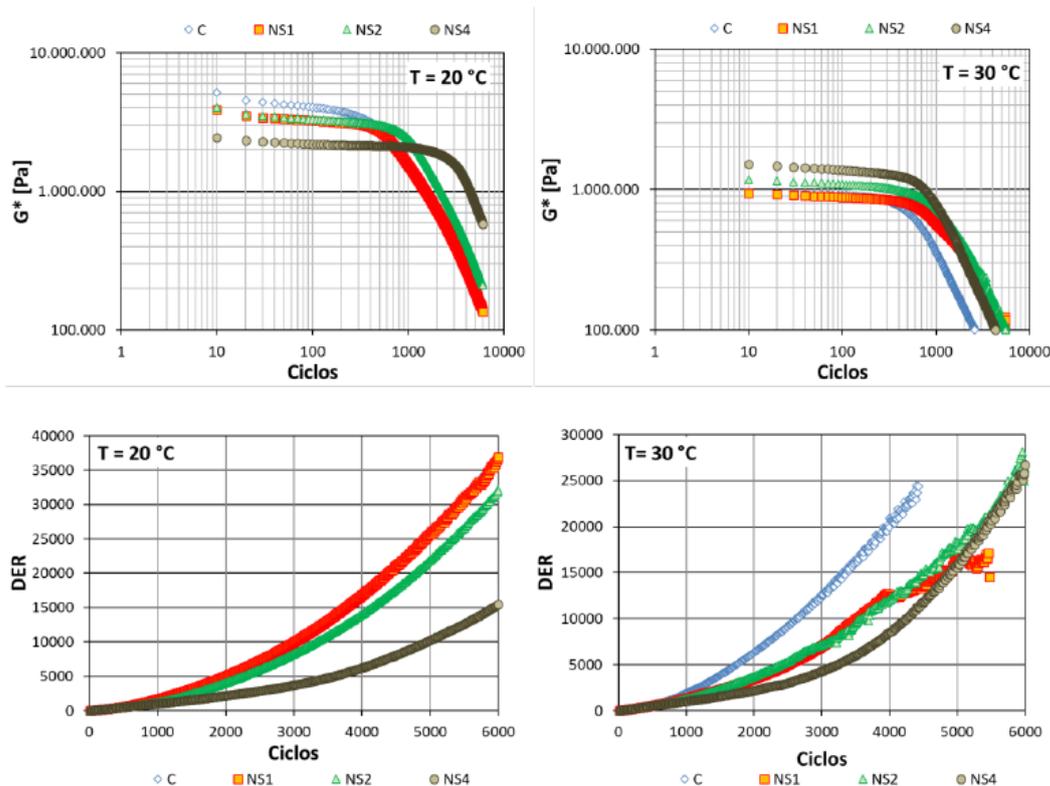


Figure 2. Resultados de ensayos de time sweep. Arriba:  $G^*$  vs Ciclos. abajo: Dissipated Energy Ratio (DER) vs ciclos.

Figura 4-4. Extraído de: Morea, F., Piqué, T. M. (2020). Evaluación de un asfalto comercial con la adición de nanosilica y análisis del desempeño en una mezcla asfáltica. 29<sup>o</sup> Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, noviembre 2020.



En cuanto a la resistencia al envejecimiento del asfalto modificado con nanosilica, se observa que la adición del nanomaterial mejora mucho la protección frente a la radiación UV, mientras que su efecto sobre la resistencia al envejecimiento termo-oxidativo es poco significativo.<sup>2</sup>

Otros tipos de nanopartículas también comparten la característica de brindar protección al asfalto frente a los rayos UV. Algunos ejemplos son el nano-ZnO y el nano-TiO<sub>2</sub>. Estas nanopartículas tienen la propiedad de absorber y/o reflejar la radiación UV (Figura 4-5, der.), y de esa forma protegen al asfalto del daño foto-oxidativo, alargando su vida útil (Figura 4-5, izq.). Estos tipos de nanomodificadores de asfalto pueden ser muy útiles en aquellas regiones que están muy expuestas a la radiación UV a lo largo del año.

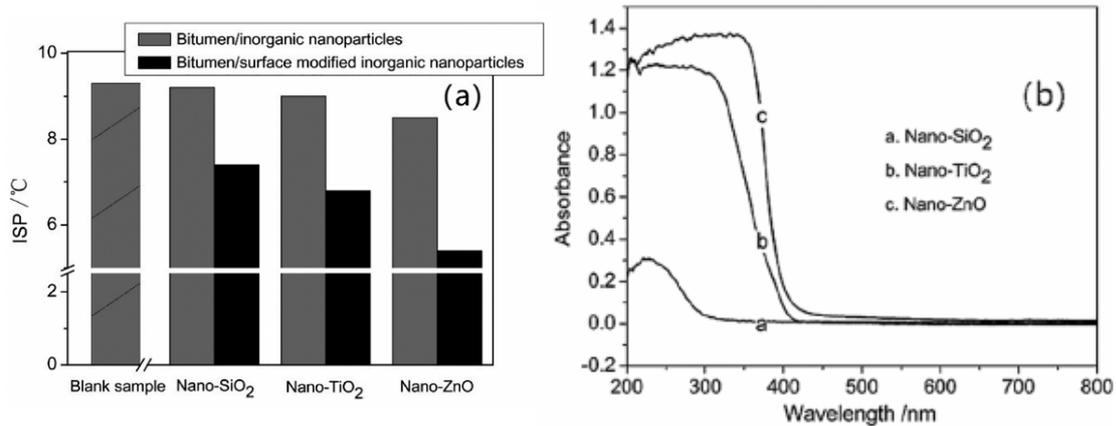


Figura 4-5. Izq: Incremento del punto de ablandamiento tras envejecimiento UV de asfaltos modificados con diferentes nanopartículas. Der: Espectro de absorbancia UV-Vis de tres tipos de nanopartículas utilizadas para modificación de asfalto.

Fuente: Zhang et al

## Nanoarcillas

Dentro del grupo de los nanomateriales bidimensionales se encuentra la montmorillonita. La montmorillonita es un tipo de arcilla natural muy abundante en el mundo y también en nuestro país. Se trata de un aluminosilicato que se estructura en forma de capas apiladas una encima de la otra, donde cada capa tiene un espesor de alrededor de 1 nm (por eso se conocen como *nanoarcillas*). La superficie de estas capas presenta una carga eléctrica negativa, que es compensada por cationes que se ubican en el espacio entre capas adyacentes (también llamado *galería* o *espacio intercapa*). De manera natural, los cationes que se ubican en la intercapa son iones Na<sup>+</sup> y/o Ca<sup>2+</sup>, los cuales le dan a la estructura de la arcilla un carácter hidrofílico (de afinidad por el agua). Un esquema de la estructura de la montmorillonita se puede observar en la Figura 4-6.

- 2 Los dos principales mecanismos de envejecimiento del asfalto son: (i) el llamado envejecimiento *termo-oxidativo*, causado por el oxígeno del ambiente que ingresa en la película de asfalto y lo oxida; y (ii) el envejecimiento causado por la radiación UV, conocido como *foto-oxidativo*, que es especialmente importante en la capa superior del pavimento. Ambos mecanismos actúan reduciendo la vida útil del pavimento.



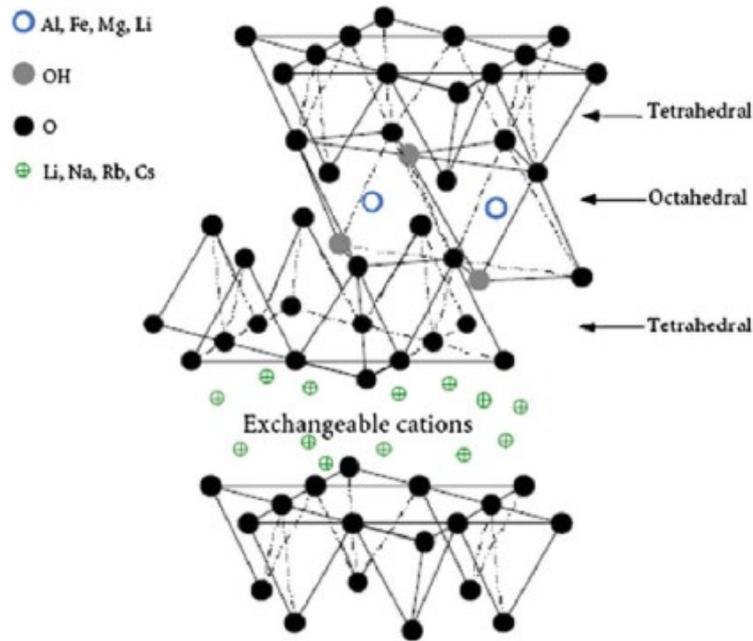


Figura 4-6. Estructura cristalina de la montmorillonita natural

Fuente: Yang et al

El carácter hidrofílico de la nanoarcilla representa un problema a la hora de adicionar la misma a un medio hidrofóbico como es el asfalto, ya que en principio son materiales poco compatibles entre sí. Es por eso que, si buscamos que haya una buena compatibilidad entre la nanoarcilla y el asfalto, es necesario realizarle a la misma algún tratamiento que modifique esa naturaleza hidrofílica.

Afortunadamente, los cationes  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{Ca}^{2+}$  de la intercapa de la nanoarcilla pueden ser fácilmente intercambiados por otros a través de un procedimiento sencillo de *intercambio catiónico*. Esta es una característica muy útil del material, que nos da la capacidad de cambiar la naturaleza de la nanoarcilla de una hidrofílica (poco compatible con el asfalto) a una hidrofóbica (compatible con el asfalto), mediante la introducción en la intercapa de cationes hidrofóbicos.

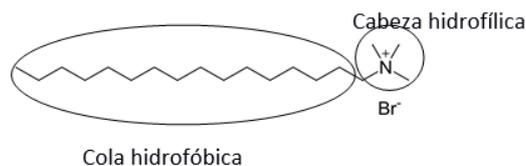


Figura 4-7. Estructura molecular de un surfactante catiónico típico (bromuro de cetiltrimetilamonio).

En general, los cationes utilizados para modificar la nanoarcilla provienen de surfactantes catiónicos del tipo *halogenuros de alquil-amonio* (Figura 4-7). Estos cationes orgánicos son voluminosos e hidrofóbicos, y por lo tanto, cuando son introducidos en el espacio intercapa de la nanoarcilla, tienen la capacidad de aumentar el espesor de dicho espacio, y a su vez darle un carácter hidrofóbico al nanomaterial. Así se pueden obtener *nanoarcillas organomodificadas* que son hidrofóbicas (tienen mejor compatibilidad con el asfalto), y que poseen un espacio intercapa más grande que la nanoarcilla natural (ver Figura 4-8). Estas dos propiedades facilitan



que, cuando estas nanoarcillas se usan para modificar asfalto, las mismas puedan alcanzar un buen grado de dispersión y de interacción con él.

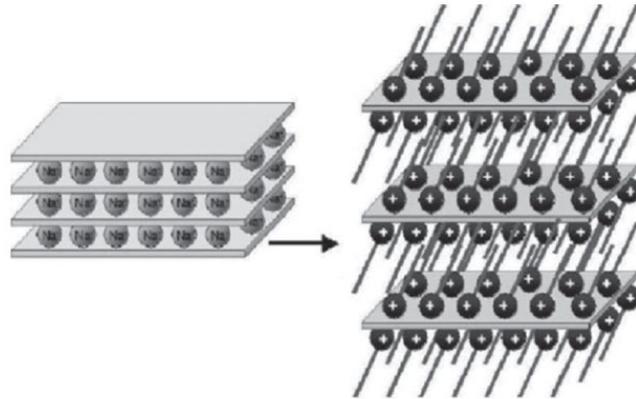


Figura 4-8. Estructura simplificada de una nanoarcilla natural (izq.) y una nanoarcilla organomodificada (der.). El proceso de organomodificación de la nanoarcilla produce un ensanchamiento de los espacios intercapa, y un cambio en el carácter hidrofílico/hidrofóbico del nanomaterial.

#### Microestructura del asfalto modificado

Al realizar la dispersión de una nanoarcilla en el asfalto podemos obtener tres tipos de microestructura (Figura 4-9). La microestructura que se logre obtener dependerá de las condiciones en las que se hizo la dispersión (parámetros del proceso de dispersión) y las características de la nanoarcilla que se intenta dispersar. Es muy importante conocer la microestructura que tiene el asfalto modificado porque de esta dependen directamente las propiedades que tenga el ligante asfáltico.

En el caso de que la nanoarcilla utilizada sea una nanoarcilla natural (sin modificar, en general poco compatible con el asfalto), o que la dispersión no haya sido efectiva, ya sea porque se realizó durante poco tiempo, o se aplicó poco esfuerzo de corte, etc., la microestructura que se obtenga probablemente sea del tipo (a), microestructura *de fases separadas*. Aquí no hubo buena interacción entre la nanoarcilla y el asfalto, y la estructura de la nanoarcilla permaneció inalterada dentro de la matriz asfáltica. Esto conducirá a un asfalto modificado de propiedades pobres.

El segundo caso de microestructura que se puede obtener es el (b), conocido como microestructura *intercalada*. En este caso, debido a que hubo una buena compatibilidad entre la nanoarcilla y el asfalto, existió una buena interacción entre ambos durante el proceso de dispersión. Esto hizo que las cadenas hidrocarbonadas del asfalto puedan ingresar en el espacio entre capas sucesivas de la nanoarcilla durante la dispersión, aumentando así el espesor del espacio intercapa, fenómeno que se conoce como *delaminación* de la nanoarcilla. En este caso la nanoarcilla sigue manteniendo una estructura de “capas apiladas”, pero la buena interacción con el asfalto causó un ensanchamiento de los espacios intercapa. Este tipo de microestructura conduce generalmente a un asfalto nanomodificado de buenas propiedades.



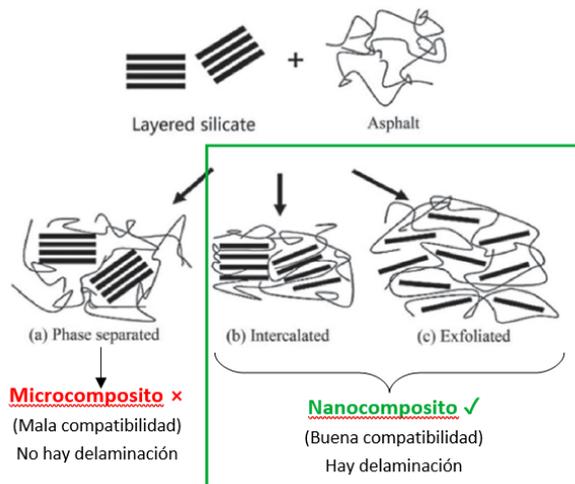


Figura 4-9. Los tres tipos de microestructura que se pueden obtener en un asfalto modificado con nanoarcillas.

Fuente: elaboración propia

Cuando la compatibilidad entre la nanoarcilla y el asfalto es muy buena, y/o cuando el proceso de dispersión es muy efectivo, se puede llegar a obtener una microestructura como la tipo (c), denominada microestructura *exfoliada*. En este caso, la delaminación fue tan importante que las capas de la nanoarcilla se separaron completamente unas de otras durante la dispersión, y terminan adquiriendo orientaciones dentro del asfalto sin un ordenamiento claro. La estructura de “capas apiladas” que tenía la nanoarcilla antes de la dispersión se pierde. Así se obtiene un asfalto nanomodificado de buenas propiedades.

Como se mencionó, el tipo de microestructura que se obtenga depende de las características de la nanoarcilla que se utilice, y de los valores elegidos para los parámetros de la dispersión. En la tabla 4-1 se presentan los valores más comunes de los parámetros de dispersión. Cabe destacar que la nanoarcilla tiene un tamaño de partícula que está en el orden de los *micrones* al momento de agregarla al asfalto. Por lo tanto, si no hay una buena interacción con el mismo, la nanoarcilla no se delaminará y las partículas que se adicionaron con un tamaño del orden del micrón, permanecerán dentro del asfalto también con un tamaño del orden del micrón, dando como resultado un microcomposito (microestructura de fases separadas). En cambio, si hubo una buena compatibilidad con el asfalto y por lo tanto una importante delaminación, las capas individuales de la nanoarcilla se podrán separar entre sí dentro del medio, y como cada capa tiene un espesor nanométrico, se obtiene así un nanocomposito (correspondiente a las microestructuras intercalada y exfoliada). El desafío a la hora de nanomodificar un asfalto es obtener un nanocomposito. Sólo así se pueden explotar todos los beneficios que aporta el nanomaterial al ligante.

Table 4. Summary of production parameters of nano-layered silicate modified asphalt.

| Particles size ( $\mu\text{m}$ ) | d (nm) | Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Reaction time (min) | Speed (rpm) | Content (%) |
|----------------------------------|--------|------------------------------------|---------------------|-------------|-------------|
| Micron grade                     | > 2.0  | 140–170                            | > 60                | 3000–5000   | 2–7         |

Figura 4-1. Valores más comunes de los parámetros de dispersión

Fuente: Yang et al



## Efectos de la modificación de asfalto con nanoarcillas

### Efecto sobre las propiedades mecánicas

Diversos trabajos muestran que la modificación con nanoarcillas tiene la capacidad de mejorar la resistencia al ahuellamiento del asfalto a temperaturas altas. Esto se ve reflejado en el cambio de propiedades clásicas como el punto de ablandamiento y propiedades reológicas como el factor de ahuellamiento de Superpave ( $G^*/\text{sen } \delta$ ).

Por ejemplo, en la Figura 4-10 se observa que el efecto de la adición de nanoarcillas sobre el punto de ablandamiento es mayor cuanto más nanoarcilla se incorpora. El incremento del punto de ablandamiento sugiere que los asfaltos modificados con nanoarcillas tendrán una resistencia al ahuellamiento mayor.

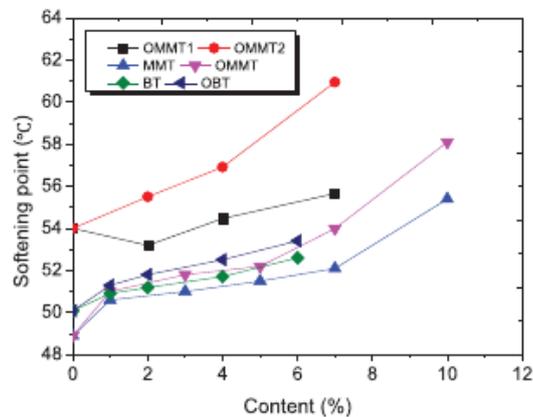


Figura 4.10. Efecto del incremento del contenido de diferentes tipos de nanoarcillas sobre el punto de ablandamiento de asfaltos.

Fuente: Yang et al., 2020.

En la Figura 4-11, la resistencia al ahuellamiento se evalúa mediante la temperatura alta de falla de Superpave, la cual se calcula usando el parámetro reológico  $G^*/\text{sen } \delta$ . Se puede observar que la temperatura alta de falla crece con el aumento de la concentración de nanoarcilla, lo cual es consistente con lo que se mencionó en el párrafo anterior. Una temperatura alta de falla mayor sugiere que el correspondiente pavimento asfáltico será capaz de resistir temperaturas más altas sin sufrir problemas de ahuellamiento. Por otra parte, los resultados de la Figura 4-11 también muestran que las nanoarcillas organomodificadas brindan un beneficio más importante que las naturales (no modificadas), a igualdad de concentraciones. Esto es consistente con la hipótesis descrita anteriormente de que las nanoarcillas organomodificadas alcanzan mayores grados de delaminación dentro del asfalto debido a que son más compatibles con el mismo, y así pueden generar efectos más importantes en el ligante modificado.



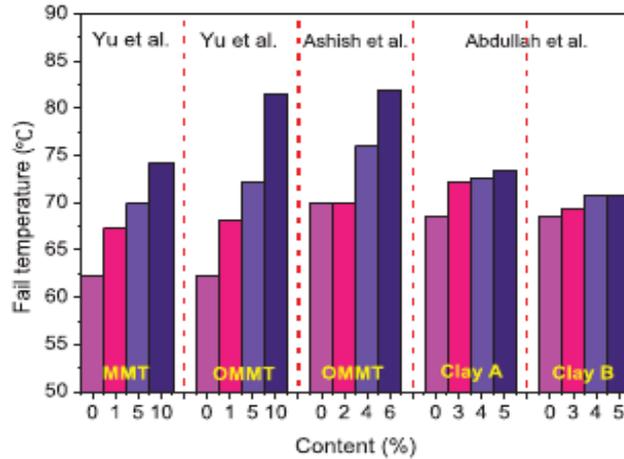


Figura 4-11. Efecto del incremento del contenido de diferentes nanoarcillas (modificadas y no modificadas) sobre la temperatura alta de falla de Superpave de asfaltos  
Fuente: Yang et al

Cuando las nanoarcillas se utilizan para modificar un asfalto que ya fue previamente modificado con polímero, el efecto es similar. La resistencia al ahuellamiento a temperaturas altas crece, como se puede observar en los resultados de la Figura 4-12.

En cuanto al efecto de la modificación con nanoarcillas de un asfalto a temperaturas medias y bajas, en general se ha observado que es poco significativo. Es decir, las nanoarcillas no inciden mucho sobre la resistencia a la fatiga y la resistencia a la fisuración térmica. Sin embargo, algunos investigadores afirman que cuando las nanoarcillas se incorporan a un asfalto modificado con polímero, se produce una sinergia entre el modificador polimérico y el nanomaterial que puede conducir a una mejora del comportamiento a la fatiga y a la fisuración térmica a bajas temperaturas (como ejemplo, ver Figura 4-13).

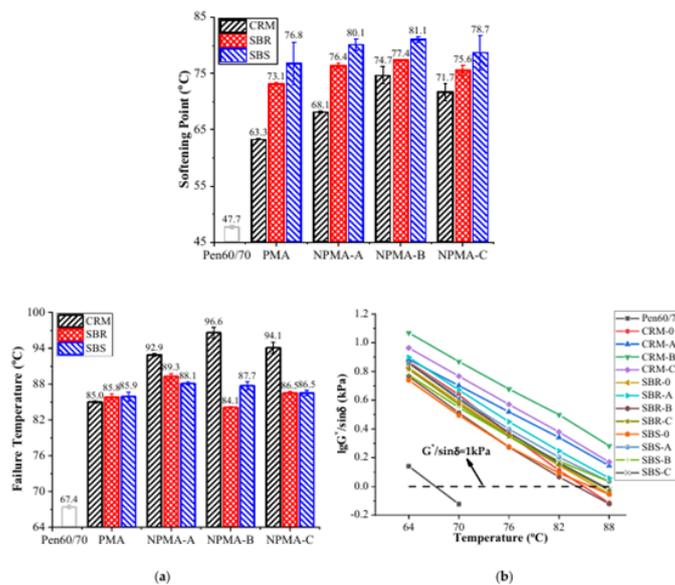


Figura 4-12. Efecto de la adición de tres tipos de nanoarcillas a asfaltos modificados con tres polímeros diferentes. En todos los casos se utilizó un 3% de nanoarcillas. Arriba: efecto sobre el punto de ablandamiento. Abajo: efecto sobre la temperatura alta de falla de Superpave.

Fuente: Ren et al



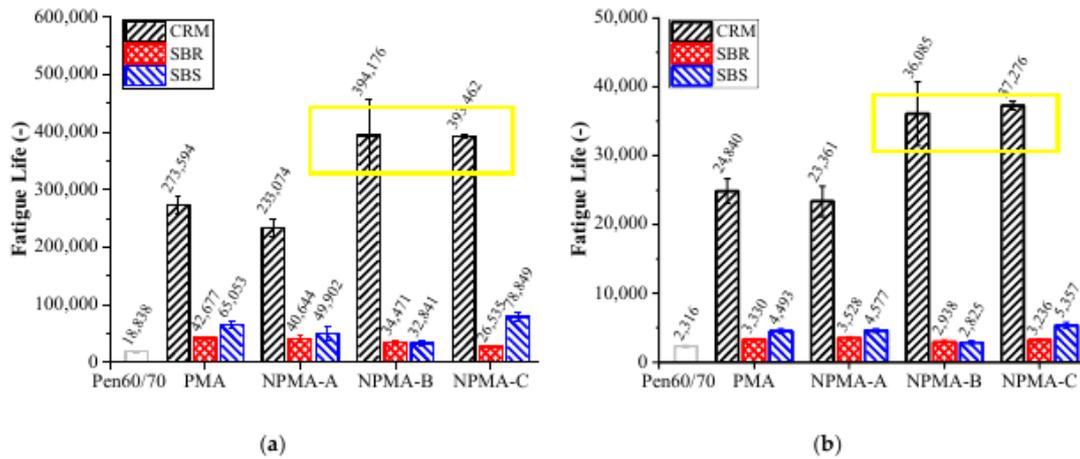


Figure 6. LAS test results: (a) Applied strain of 2.5%; (b) Applied strain of 5.0%.

Figura 4-13. Efecto de la adición de tres tipos de nanoarcillas sobre la vida a fatiga de asfaltos modificados con tres polímeros diferentes

Fuente: Ren et al

#### Efecto sobre la estabilidad al almacenamiento

La *estabilidad al almacenamiento* de los asfaltos modificados con polímero por vía húmeda es una propiedad muy importante desde el punto de vista tecnológico. La conocida incompatibilidad que existe entre el modificador polimérico y el asfalto base es la razón por la cual el ligante modificado no puede permanecer almacenado en caliente y sin agitación durante mucho tiempo sin que se separen las fases polimérica y asfáltica. Esta separación de fases, si ocurre, representa un problema grave en las plantas asfálticas y en el transporte del ligante modificado, que en última instancia dificulta la aplicación de asfaltos modificados con polímero en obras viales.

La estabilidad al almacenamiento es una propiedad que sirve para evaluar la tendencia del ligante a que se produzca la separación de fases en condiciones de alta temperatura y estáticas. Esta propiedad se mide mediante la prueba conocida coloquialmente como el “ensayo del tubo de aluminio” (ASTM D7173). En este ensayo se simulan en estufa de laboratorio las condiciones de almacenamiento mencionadas durante un determinado tiempo, al término del cual se mide la diferencia en propiedades viscoelásticas de los extremos del tubo. Si hubo separación de fases, la fase polimérica se acumulará mayoritariamente en uno de los extremos, generando así una diferencia de propiedades entre ambos extremos del tubo que se puede medir con ensayos normalizados como punto de ablandamiento y/o propiedades reológicas como el módulo complejo ( $G^*$ ). Cuanto mayor sea la diferencia de propiedades entre los extremos del tubo, más grave habrá sido la separación de fases, y menor la estabilidad al almacenamiento del ligante modificado.

Se ha encontrado que las nanoarcillas tienen la capacidad de reducir drásticamente el problema de separación de fases en asfaltos modificados con polímero. Esto se debe a su estructura laminar y su tamaño nanométrico, ya que cuando alcanzan un buen grado de dispersión y delaminación dentro del ligante, generan un impedimento físico para la migración del polímero dentro del medio asfáltico, reduciendo así la velocidad de separación de fases. Algunos investigadores afirman que las nanoarcillas mejoran la compatibilidad entre el asfalto y el



polímero, estabilizando el sistema y reduciendo así la tendencia a la separación de fases. Algunos resultados que ejemplifican esta mejora en la estabilidad al almacenamiento causada por las nanoarcillas pueden observarse en las Figuras 4-14 y 4-15.

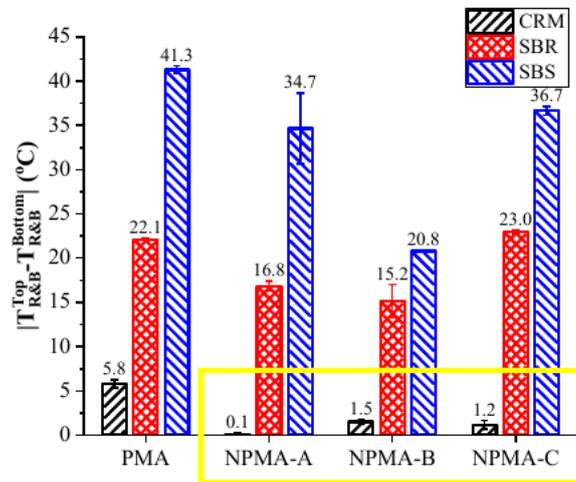


Figura 4-14. Cambio en la estabilidad al almacenamiento de asfaltos modificados con polímero con la adición de nanoarcillas

Fuente: Ren et al

Esta característica de las nanoarcillas las posiciona como un nanomaterial interesante para ser usado como aditivo estabilizante en asfaltos modificados con polímero.

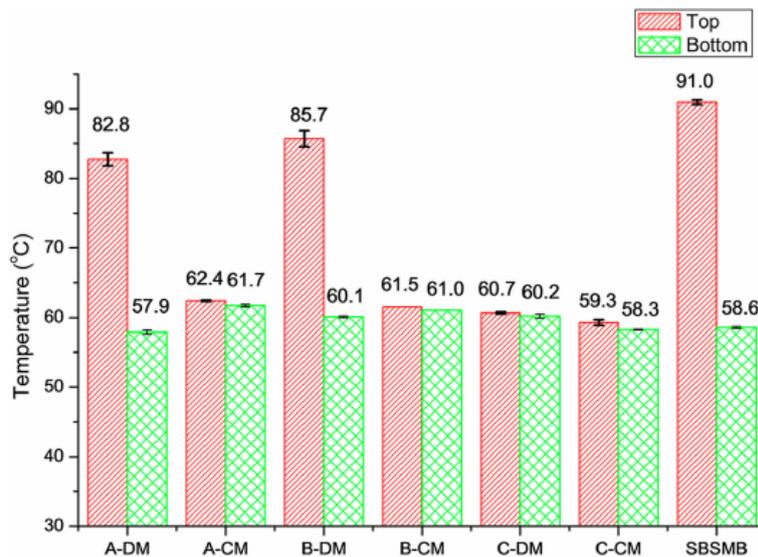


Figure 8. Softening point differences of top and bottom sections.

Figura 4-15. Cambio en la estabilidad al almacenamiento de asfaltos modificados con 4% de polímero SBS con adición de 2% de diferentes nanoarcillas

Fuente: Leng et al

### Efecto sobre la resistencia al envejecimiento

Otra propiedad importante de los asfaltos modificados con polímero es la resistencia al envejecimiento, una característica clave que define la vida útil de un pavimento. Diversos



investigadores afirman que las nanoarcillas protegen al asfalto del envejecimiento termo-oxidativo gracias a las denominadas *propiedades de barrera* de las mismas (Figura 4-16).

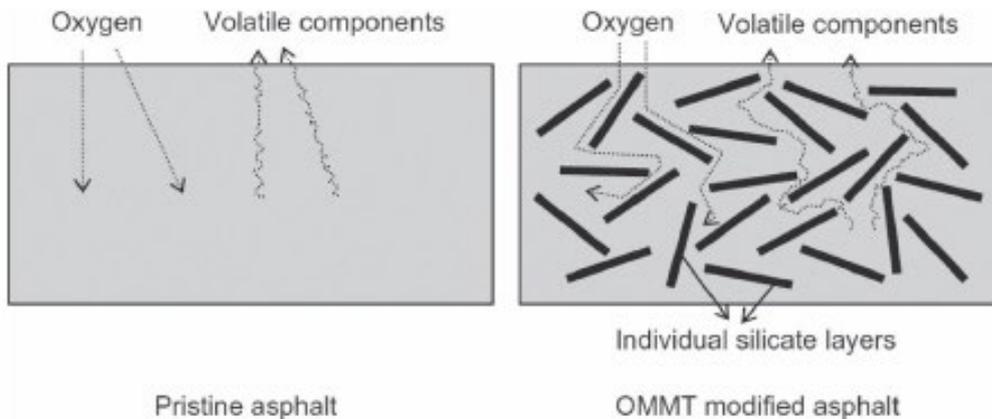


Figura 4-16. Propiedades de barrera en un asfalto modificado con nanoarcillas  
Fuente: Yang et al

Las propiedades de barrera consisten en el efecto de obstáculo frente a los gases que producen las nanoarcillas cuando están correctamente dispersadas y delaminadas dentro de una matriz termoplástica como el asfalto. Cuando esto sucede, se produce un “laberinto” para las moléculas de oxígeno del ambiente que ingresan al ligante y lo oxidan: los caminos de propagación de moléculas gaseosas se alargan, se reduce su velocidad de ingreso, y se retrasa la oxidación. Lo mismo ocurre para los componentes del asfalto que se volatilizan a las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla: los caminos por donde los componentes volátiles escapan del ligante se prolongan, y la velocidad de envejecimiento por pérdida de volátiles se reduce. Algunos resultados que ejemplifican este efecto pueden verse en las Figuras 4-17 y 4-18.

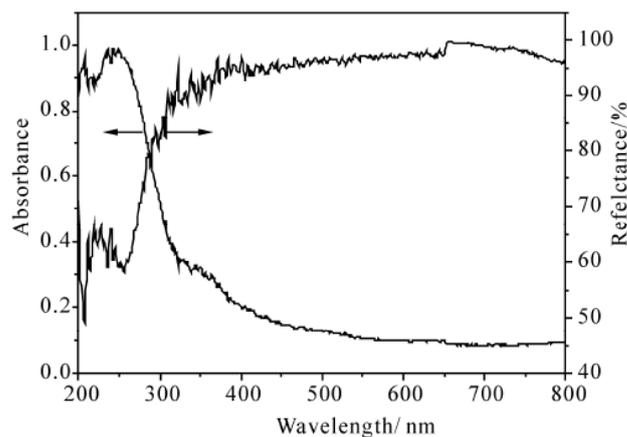


Figura 4-17. Pérdida de masa debido a envejecimiento RTFOT y PAV de asfaltos modificados con diferentes tipos de nanoarcillas  
Fuente: Zhang et al

Por otra parte, las nanoarcillas también tienen la capacidad de brindar al asfalto un cierto efecto protector frente a los rayos UV, mejorando así su desempeño en zonas muy expuestas a



la radiación solar. Esto se debe, como se mencionó antes, a la capacidad que tienen de absorber y reflejar la radiación UV (ver Figura 4-19). También se presentan resultados de un trabajo que pone de manifiesto el efecto protector de las nanoarcillas frente a la radiación UV.

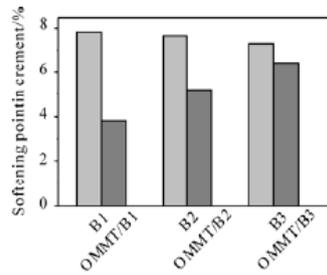


Fig.11 Softening point increment of the binders after long-term aging

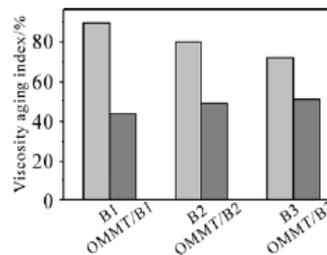


Fig.12 Viscosity aging index of the binders after long-term aging

Figura 4-18. Cambio en el punto de ablandamiento (arriba) y el índice de envejecimiento de viscosidad (abajo) de diferentes tipos de asfalto base modificados con la misma nanoarcilla.

Fuente: Li et al

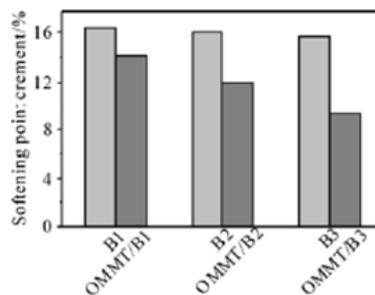


Fig.14 Softening point increment of the binders after UV aging

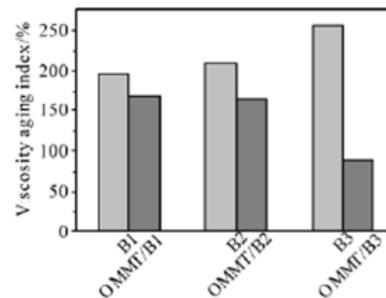


Fig.15 Viscosity aging index of the binders after UV aging

Figura 4-19. Cambio en el punto de ablandamiento (arriba) y el índice de envejecimiento de viscosidad (abajo) tras envejecimiento UV de diferentes asfaltos base modificados con nanoarcillas

Fuente: Li et al



## Conclusiones

Como se ha visto en esta unidad, la modificación con nanomateriales puede aportar propiedades interesantes a los asfaltos, que la modificación clásica (con polímeros) no puede brindar por sí sola. En este sentido los nanomateriales, y en particular las nanoarcillas, complementan a los modificadores poliméricos, actuando sobre el envejecimiento termo-oxidativo y envejecimiento UV y alargando la vida útil de los pavimentos. Además, tienen la capacidad de mejorar la estabilidad al almacenamiento de los ligantes modificados con polímeros, lo cual permitiría extender y facilitar su uso.

En vista de estos resultados, la tesis “Estudio de la estabilidad al almacenamiento de ligantes asfálticos modificados con polímeros reciclados y aditivos estabilizantes” (en ejecución) busca desarrollar nanoarcillas organomodificadas con surfactantes nacionales que sean capaces de estabilizar asfaltos modificados con caucho reciclado de neumático fuera de uso (NFU), y optimizar las condiciones de dispersión para maximizar los beneficios de su uso. Se pretende también evaluar la mejora en la resistencia al envejecimiento de los ligantes obtenidos. El objetivo general de la misma es consolidar a la dispersión de polímero reciclado en asfalto por vía húmeda como una alternativa tecnológica competitiva en la construcción vial mediante el empleo de nanoarcillas naturales y organomodificadas como aditivos estabilizantes.



## Bibliografía

Crucho, J., Picado-Santos, L., Neves, J., & Capitão, S. (2019). A Review of Nanomaterials' Effect on Mechanical Performance and Aging of Asphalt Mixtures. *Applied Sciences*. Doi: 10.3390/app9183657

Jing, R. (2019). Ageing of bituminous materials: Experimental and numerical characterization (tesis doctoral). Delft University of Technology, Delft, Países Bajos. Doi: 10.4233/uuid:19e7a9ff-5336-419f-b49a-82bc7c644b02

Leng, Z., Tan, Z., Yu, H., & Guo, J. (2019). Improvement of storage stability of SBS-modified asphalt with nanoclay using a new mixing method. *Road Materials and Pavement Design*. Doi: 10.1080/14680629.2018.1465842

Li, B., Zhang, H. & Yu, J. (2010). Effect of organo-montmorillonite on the morphology and aging properties of various bitumens. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci*. Doi: 10.1007/s11595-010-0063-6

Morea, F., Piqué, T. M. (2020). Evaluación de un asfalto comercial con la adición de nanosilica y análisis del desempeño en una mezcla asfáltica. 29° Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, noviembre 2020.

Ren, Z., Zhu, Y., Wu, Q., Zhu, M., Guo, F., Yu, H., & Yu, J. (2020). Enhanced Storage Stability of Different Polymer Modified Asphalt Binders through Nano-Montmorillonite Modification. *Nanomaterials*. Doi: 10.3390/nano10040641

Yang, X., Shen, A., Guo, Y., Wu, H., & Wang, H. (2020). A review of nano layered silicate technologies applied to asphalt materials. *Road Materials and Pavement Design*. Doi: 10.1080/14680629.2020.1713199

Zhang, H., Duan, H., Zhu, C., Chen, Z., & Luo, H. (2021). Mini-review on the application of nanomaterials in improving anti-aging properties of asphalt. *Energy Fuels*. Doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c01035



## CAPITULO 5

# Riegos asfálticos

Ing. Ramiro A. Nosetti

### Introducción - Importancia de la adherencia entre capas

Un pavimento asfáltico es una estructura constituida por una o más capas de mezcla bituminosa, que se apoyan sobre sustratos de apoyo no ligados con asfalto, proporcionando características estructurales. Ya que recibe en forma directa las cargas de tráfico y debe distribuirlas a la explanada lo más disipadas posibles. La última de las capas suministra también la superficie de rodadura, proporcionando características funcionales, de confort y seguridad vial.

Para que todas estas expectativas se cumplan y sean eficientes durante toda la puesta en servicio del pavimento bituminoso, es fundamental que las capas de mezcla estén totalmente adheridas entre sí, por medio de riegos de adherencia con emulsión bituminosa.

El estado de adherencia entre las capas asfálticas de los pavimentos afecta a su comportamiento. Cuando esta adherencia es adecuada toda la estructura se comporta de una manera homogénea; en cambio, cuando la adherencia es inadecuada, puede producirse un deslizamiento entre las capas que afecta a la manera en que las tensiones se dispersan y conduce a un fallo prematuro de la estructura. De hecho, de acuerdo con las soluciones posibles de la distribución de tensiones y deformaciones en un sistema elástico multicapa se puede demostrar que la ausencia de adherencia entre capas provoca una mayor deformación de la estructura y consecuentemente una reducción de la vida de servicio.

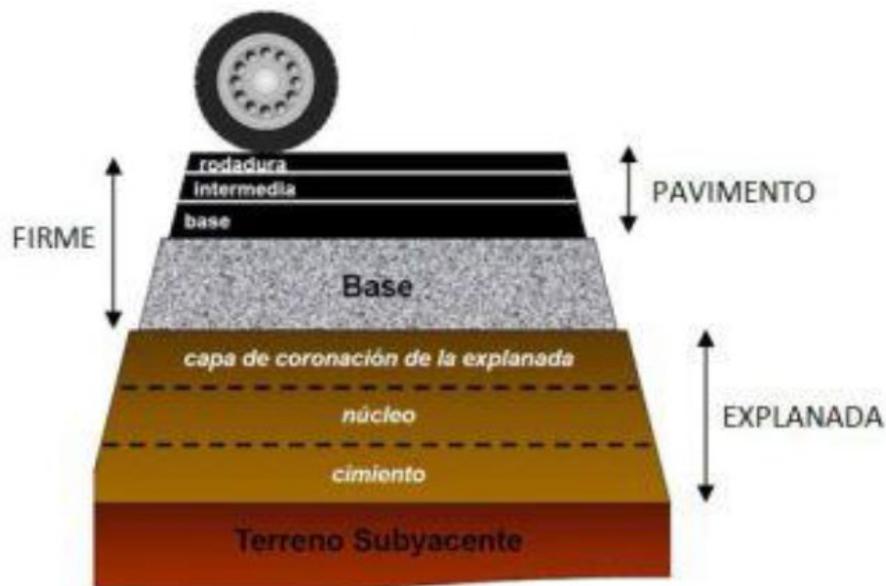


Figura 5-1. Detalle de las capas de la estructura de una carretera

Fuente: Andaluz et al



## Tipos de fallas por falta de adherencia:

Las fallas más usuales por falta de adherencia son las que consideramos a continuación:

“Sholving” o corrimientos: Son desplazamientos longitudinales localizados en áreas de la superficie del pavimento, generalmente causados por el frenado brusco de los vehículos o las aceleraciones repentinas que suelen darse en pendientes, curvas, intersecciones o semáforos.



Figura 5-2. Falla del tipo “sholving” o corrimiento

Fuente: MANUAL CENTROAMERICANO DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS

Media luna o arco: Son grietas en forma de medialuna (o más precisamente de cuarto creciente) que pueden apuntar en ambas direcciones, derivadas de las fuerzas de tracción de las ruedas sobre el pavimento o de frenado sobre la misma.

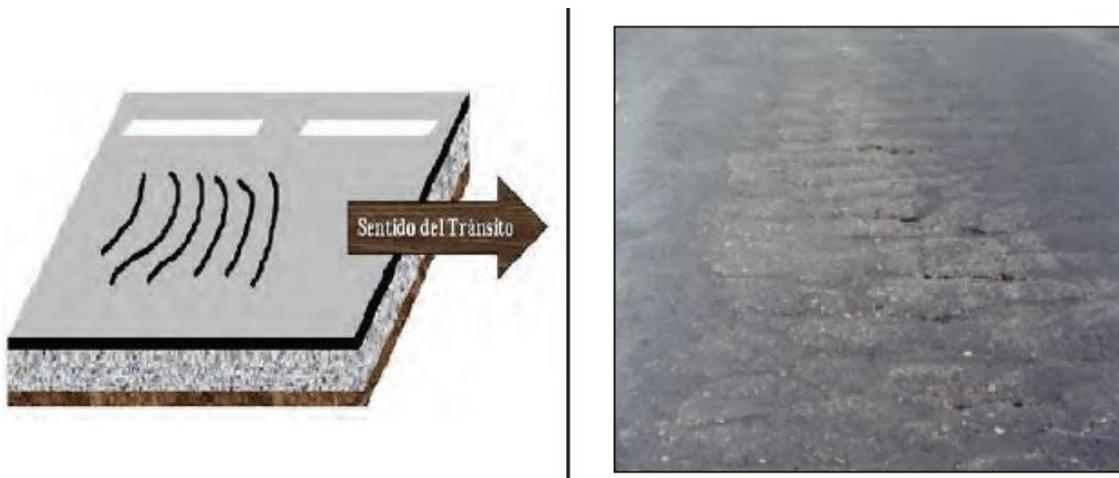


Figura 5-3. Falla del tipo fisuras en arco

Fuente: MANUAL CENTROAMERICANO DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS

Corrugación: Serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales se suceden muy próximas unas de otras a intervalos regulares.





Figura 5-4. Falla del tipo corrugación

Fuente: MANUAL CENTROAMERICANO DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS

## Materiales para riegos de liga

Para que un asfalto pueda ser utilizado como riego de liga se debe disminuir su viscosidad y esto puede realizarse de diferentes formas: con adición de solventes en el caso de los asfaltos diluidos o de agua en las emulsiones.

### Asfaltos diluidos o Cutbacks

Son asfaltos diluidos o rebajados en un solvente que puede ser nafta, kerosene o gasoil, en función de ellos se los clasifica como Rápido, Medio y Lento. Sus composiciones se muestran en la Figura 5-5. Al ser expuestos a temperatura ambiente estos solventes se evaporan quedando el asfalto de penetración como residuo.

Actualmente este tipo de riegos están fuera de uso por ser peligrosos, nocivos y contaminar el medio ambiente.

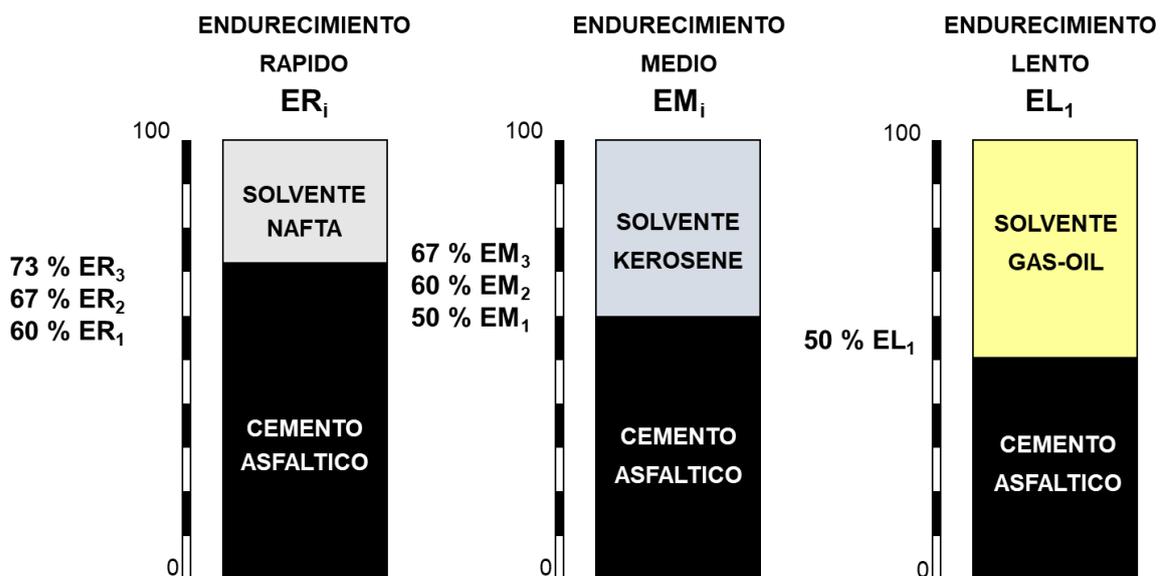


Figura 5-5. Asfaltos diluidos o cutbacks

Fuente: elaboración propia



## Emulsiones asfálticas

Una emulsión es un sistema heterogéneo, termodinámicamente inestable, formado al menos por dos fases líquidas no miscibles de las cuales una está dispersa (fase dispersa) en la otra (fase continua) en forma de pequeñas gotas (micelas) cuyo diámetro es en general superior a 0,1 mm.

Tal sistema posee una estabilidad mínima que puede aumentarse por la adición de agentes apropiados, tales como tensoactivos o productos sólidos finamente divididos.

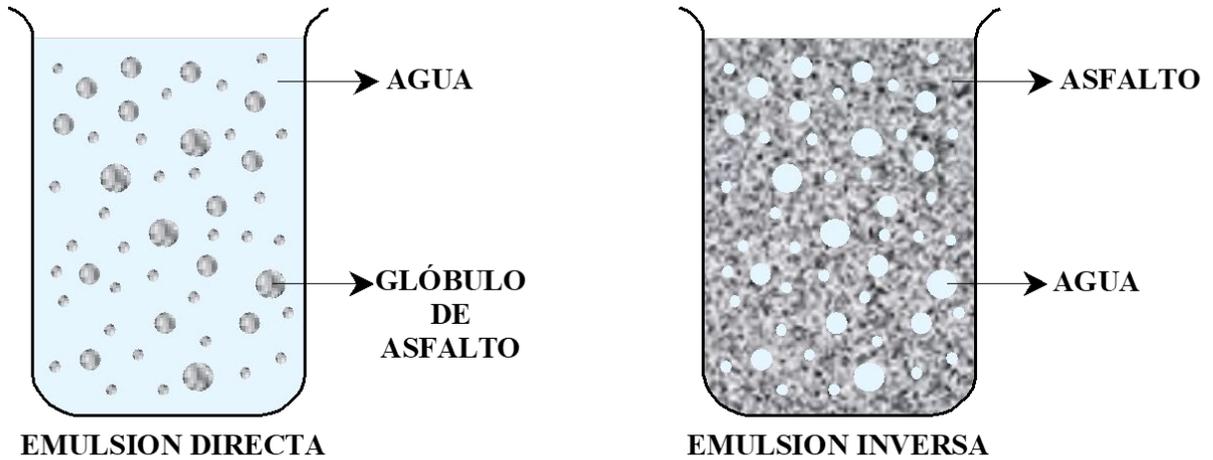


Figura 5-6. Tipos de emulsión según sus fases

Fuente: elaboración propia

**Emulsiones directas:** Son aquellas en que la fase dispersa es la sustancia lipofílica (cemento asfáltico) y la fase continua es hidrofílica (agua).

**Emulsiones inversas:** Por el contrario, son las que la fase dispersa es una sustancia hidrofílica y la fase continua es lipofílica.

En la fabricación de emulsiones bituminosas intervienen numerosos factores que hay que aprender a dominar, todos encaminados a lograr un grado de compatibilidad entre el betún y lógicamente el agua. Los principales agentes que actúan en este proceso son los siguientes:

- **Emulsionabilidad del betún:** No todos los asfaltos son igualmente emulsionables. Es conocido que hay betunes que emulsionan con mucha más facilidad que otros. Entre otras razones la principal es su composición química que determina su carácter más o menos polar, acidez, basicidad, contenido en sales y afinidad.
- **Energía:** Para la producción de una emulsión bituminosa es necesario un aporte de energía que sea capaz de dividir el betún en pequeñas gotas. Esta energía de cizalla se puede llevar a cabo con diferentes medios como: los mezcladores estáticos, molinos coloidales, equipos de ultrasonido, homogeneizadores de alta presión, etc. Los más utilizados actualmente son los molinos coloidales que consisten en dos superficies generalmente ranuradas, girando una o las dos, y con una distancia entre ellas muy reducida (milímetros o décimas de milímetro), de forma que el betún junto al agua recibe una cizalla muy eficiente que permite la emulsificación del sistema.



- **Temperatura:** Evidentemente la emulsión es un producto líquido y sus componentes en el momento de la emulsificación también lo deben ser por lo que el betún es calentado hasta encontrar un máximo de viscosidad para que fluya apropiadamente.
- **Emulgentes:** Tal vez el más importante parámetro para fabricar una emulsión ya que constituye el nexo entre el betún hidrófobo y el agua. Existe una gran variedad de productos que aparte de facilitar en mayor o menor medida el proceso de emulsificación definirán las características y tipología final de la emulsión. Durante el proceso de fabricación el emulgente se incorpora tanto en el agua como en el betún dependiendo de su naturaleza o efecto.  
Dependiendo de la carga que presente el emulgente las emulsiones se clasifican en aniónicas y catiónicas.
- **Las emulsiones aniónicas:** Los agentes emulsivos empleados son: jabones, resinas, ácidos grasos. Produce sobre el glóbulo de asfalto una carga eléctrica **NEGATIVA** esto implica potenciales problemas de adherencia sobre los áridos ácidos o silíceos (graníticas cuarcitas). Estas emulsiones no rompen o cortan hasta que el agua no se haya evaporado

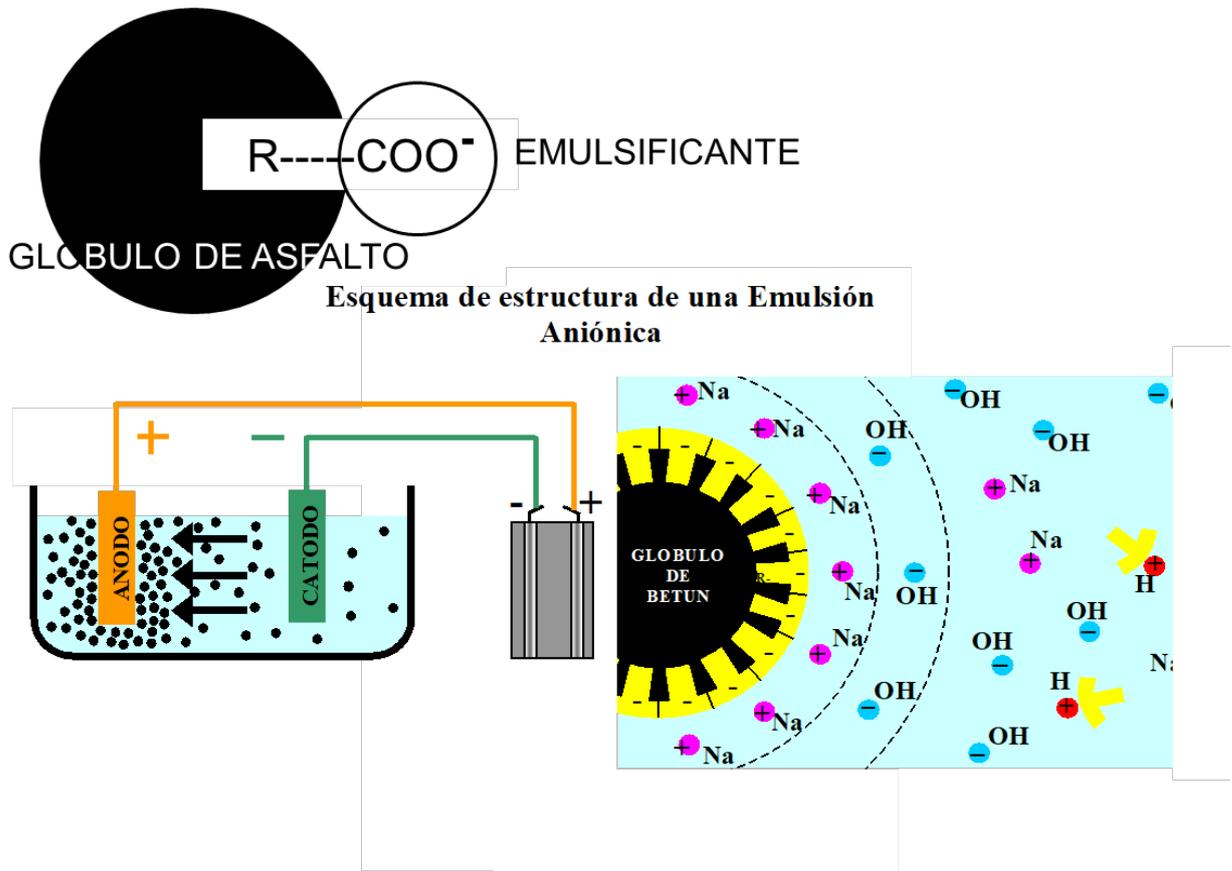


Figura 5-7. Esquema de estructura de una emulsión aniónica

Fuente: ATEB

- **Las emulsiones catiónicas:** El agente emulsivo está compuesto por amonio cuaternario o aminas, le confiere al glóbulo de asfalto una carga eléctrica **POSITIVA**. Estas emulsiones rompen o cortan por adsorción del agente emulsionante sobre la superficie del agregado.



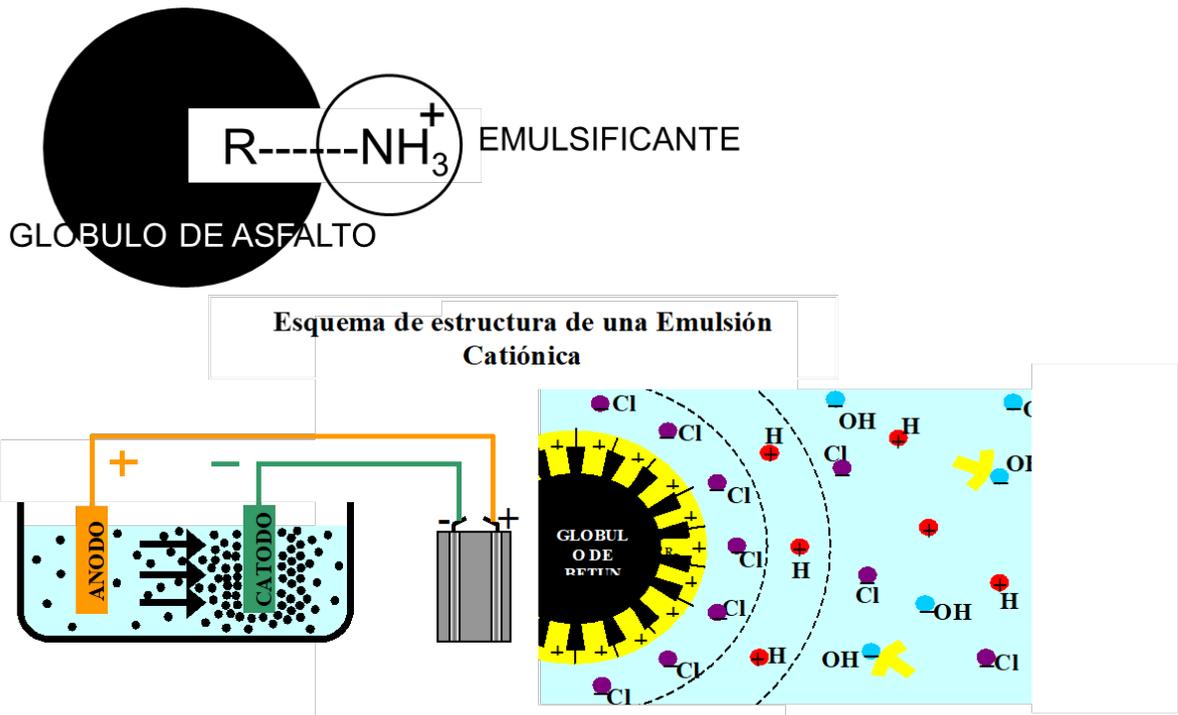


Figura 5-8. Esquema de estructura de una emulsión catiónica

Fuente: ATEB

## Tipos de producción

**Producción continua:** En esta modalidad el proceso se realiza de modo que todos los componentes se inyectan en línea y pasan por el elemento cizallador, provenientes de tanques de almacenamiento con suficiente capacidad de modo que la emulsión se va obteniendo de forma continua sin paradas. Este tipo de fabricación ofrece grandes capacidades de producción sobre todo si la instalación está dotada de equipos automatizados.

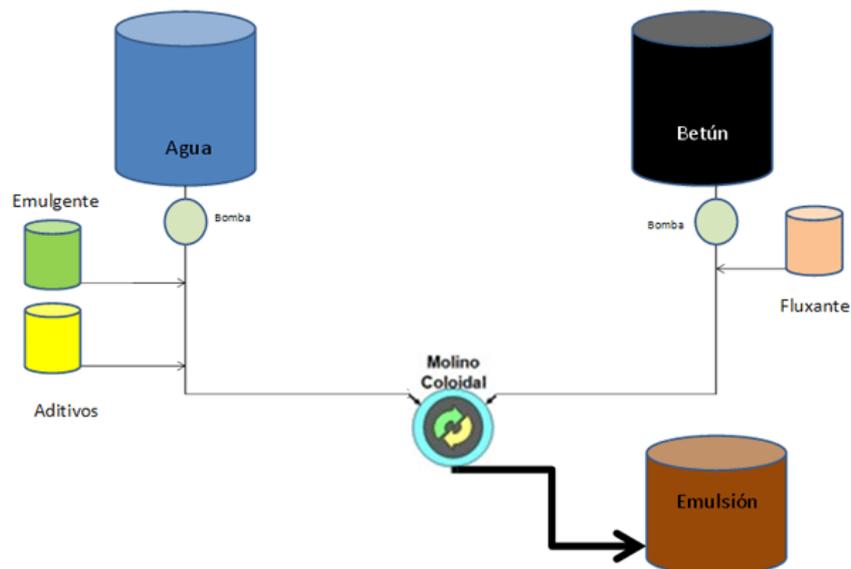


Figura 5-9. Planta Continua

Fuente: ATEB



Producción discontinua o "batch": En esta ocasión el proceso se realiza en cantidades finitas. Se preparan los componentes de la emulsión en tanques de una capacidad determinada y posteriormente se envían todos al elemento cizallador. Una vez agotados se deben preparar de nuevo con lo que la producción se detiene. La capacidad de fabricación suele ser menor que en el caso anterior pero a cambio gana algo más en versatilidad.

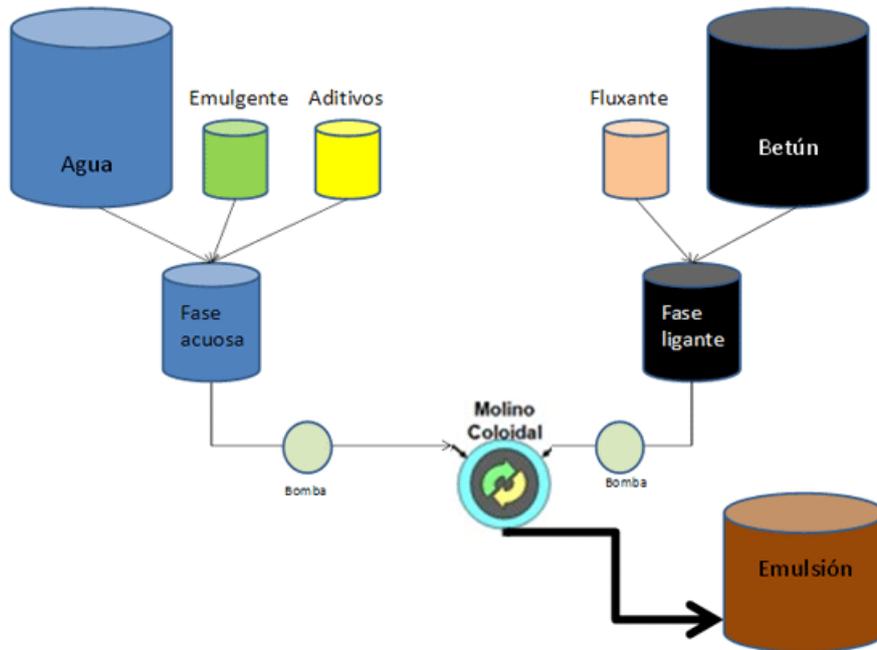


Figura 5-10. Planta Discontinua  
Fuente: ATEB

## Ensayos que se realizan a las emulsiones

Se describen a continuación los ensayos más relevantes que se realizan a las emulsiones.

**Clasificación de carga:** Esta prueba sirve para una identificación de las emulsiones catiónicas y aniónicas. Consiste en sumergir dos electrodos en una muestra con emulsión conectados a una fuente de corriente. Después de un tiempo especificado en que se hace pasar corriente eléctrica se examinan los electrodos para determinar en cuál de ellos se depositó el asfalto. Si lo hace en el cátodo revelara que se trata de una emulsión catiónica, si lo hace en el ánodo será aniónica.



## Norma IRAM 6690

### Identificación del signo de la carga de los glóbulos asfálticos

En emulsiones CATIÓNICAS verificar depósito en  
CÁTODO

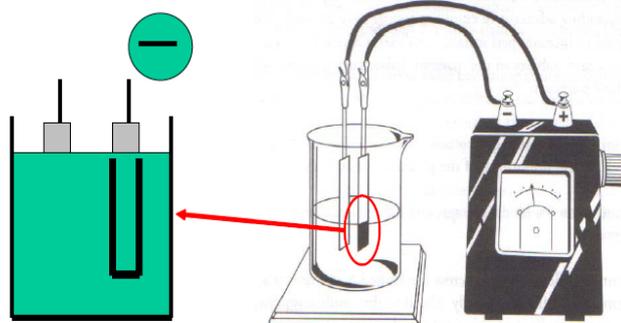


Figura 5-11. Dispositivo para determinar la carga de las partículas  
Fuente: IRAM

**Asentamiento:** Esta prueba determina la tendencia de los glóbulos de asfalto a unirse entre sí durante el almacenamiento de la emulsión. La prueba consiste en mantener un cierto volumen de emulsión en una probeta graduada durante un número determinado de días al cabo de los cuales se toman las muestras de la parte superior y del fondo de la probeta.

Estas muestras se pesan y se calientan hasta que toda el agua se evapore. Se obtiene en cada una de ellas el porcentaje de residuo y se determina la diferencia la cual será una medida de asentamiento

## Norma IRAM 6716 (I)

### Método de ensayo de asentamiento

- Se coloca 500 cm<sup>3</sup> de muestra en los tubos de asentamiento
- Se deja a temperatura ambiente 5 días.
- Se utilizan los primeros y últimos 55 cm<sup>3</sup>

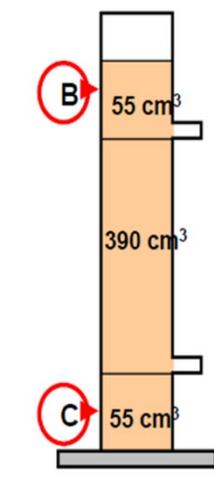


Figura 5-12. Dispositivo para determinar el asentamiento  
Fuente: IRAM



Viscosidad Saybolt-furol: Se determina en forma similar que para cementos asfálticos.

La viscosidad de una emulsión a una determinada temperatura depende principalmente de la proporción de cemento asfáltico presente en la emulsión y de la distribución del tamaño de los glóbulos de asfalto.

La viscosidad de la emulsión debe ser lo suficientemente baja para poder regarla y que cubra con facilidad a la superficie donde se la aplica, pero al mismo tiempo lo suficientemente viscosa para no escurrirse en la superficie donde se la aplica.



Figura 5-13. Dispositivo para determinar la viscosidad

Residuo de la destilación: Esta prueba se efectúa para determinar las proporciones de cemento asfáltico y de agua en la emulsión. Este residuo luego se utiliza para someterlo a otras pruebas. El dispositivo para realizar en el ensayo se observa en la Figura 5-14.

### Norma IRAM 6719

#### Método de determinación por destilación del residuo asfáltico y de los hidrocarburos destilados

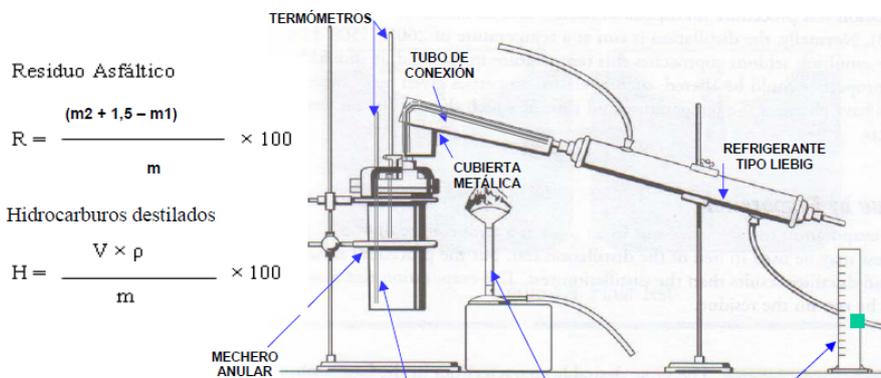


Figura 5-14. Dispositivo para realizar la prueba de residuo de destilación

Fuente: IRAM



**Determinación del residuo sobre tamiz  $\mu\text{m}$  850:** Este ensayo se realiza para determinar cuantitativamente el porcentaje de cemento asfáltico presente en la emulsión en forma de glóbulos relativamente grandes. Estos glóbulos tenderían a producir cubrimientos no uniformes en la superficie a aplicar.

El ensayo se realiza haciendo pasar una muestra de emulsión a través de un tamiz N<sup>o</sup>  $\mu\text{m}$  850 se lo lava y se coloca la malla con el asfalto retenido en un horno para su secado y posterior determinación en peso del mismo, el porcentaje con relación al peso original es lo que se informa.



Figura 5-15. Planta Discontinua  
Fuente: Nosetti Adrián

## Mecanismo de rotura de una emulsión

Cuando una emulsión catiónica se pone en contacto con un sólido se produce una absorción parcial del agua y emulsionante libre en la emulsión por el árido. Lo que origina una mayor concentración de glóbulos en las proximidades del árido y una desestabilización de la emulsión. Este proceso da como resultado la floculación y la aproximación de los glóbulos de betún a la superficie del árido.

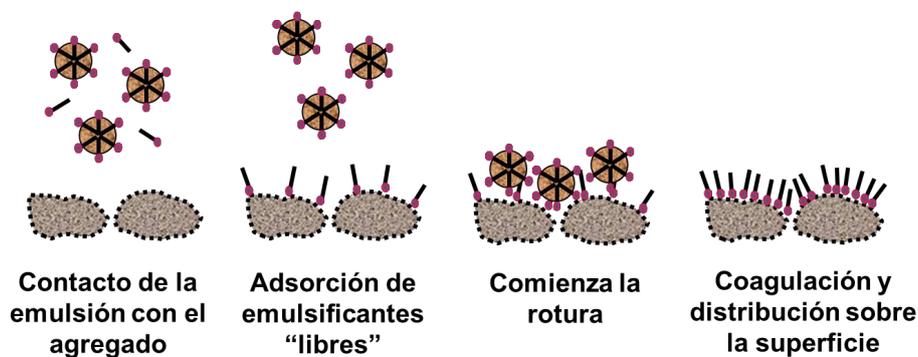


Figura 5-16. Rotura de una emulsión  
Fuente: AKZO NOBEL



A continuación, comienza la coalescencia produciéndose la formación de coágulos de betún. Al final del proceso de coalescencia se produce la rotura de la emulsión en sentido estricto. Las dos fases, betún y agua, se separan completamente.

Esta pérdida de agua produce un incremento rápido de la cohesión y se traduce visualmente en el paso de un color marrón oscuro, típico de la emulsión, a un color negro, típico del betún.

La velocidad de rotura de las emulsiones dependerá de su mayor o menor estabilidad frente a los áridos o sustrato que se coloque y que responde al criterio del tiempo de trabajo más adecuado para los diferentes tipos de aplicaciones.

De esta forma las emulsiones se pueden dividir según su proceso de rotura en: Rápidas, Medias, Lentas y controladas. Para el caso de riegos de liga las emulsiones utilizadas son las de rotura rápida CRR-0 y CRR-1 y se deben encuadrar dentro de la Norma IRAM 6691 y si las emulsiones son del tipo modificada CRR-0m y CRR-1m se deben encuadrar dentro de la Norma IRAM 6698

En la siguiente tabla se indican los ensayos que se deben realizar a una emulsión catiónica según la norma IRAM 6691

| Norma IRAM 6691 (2008)   |          |           |     |       |     |       |     |              |     |       |     |     |              |     |     |     |     |     |     |     |      |  |
|--|----------|-----------|-----|-------|-----|-------|-----|--------------|-----|-------|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|---|
| Emulsiones Asfálticas Modificadas Norma IRAM 6691              |          |           |     |       |     |       |     |              |     |       |     |     |              |     |     |     |     |     |     |     |      |   |
|  | Unidades | CRR 0     |     | CRR 1 |     | CRR 2 |     | CRM-1        |     | CRM-2 |     | CRL |              | CRS |     | CI  |     | CRC |     | CRF |      | N° IRAM   |
|  |          | min       | max | min   | max | min   | max | min          | max | min   | max | min | max          | min | max | min | max | min | max | min | max  |   |
| Viscosidad   | 25°      | -         | 50  | -     | 50  | -     | -   | 20           | -   | -     | -   | -   | 50           | -   | 50  | -   | 50  | -   | 50  | -   | 35   | 6721  |
|  | 50°      | -         | -   | -     | -   | 20    | -   | -            | -   | 20    | -   | -   | -            | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -    |   |
| Residuo Asfáltico  | % masa   | 57        | -   | 62    | -   | 65    | -   | 60           | -   | 60    | -   | 60  | -            | 60  | -   | 40  | -   | 60  | -   | 60  | -    | 6719  |
| Hidrocarburos Dest.  | % vol    | -         | 3   | -     | 3   | -     | 3   | -            | -   | -     | 12  | -   | -            | -   | -   | 5   | 15  | -   | -   | -   | -    | 6719  |
| Contenido de Agua  | % masa   | -         | 43  | -     | 38  | -     | 35  | -            | 40  | -     | 40  | -   | 40           | -   | 40  | -   | 55  | -   | 40  | -   | 40   | 6719  |
| Asentamiento   | % masa   | -         | 5   | -     | 5   | -     | 5   | -            | 5   | -     | 12  | -   | 5            | -   | 5   | -   | 15  | -   | 5   | -   | 10   | 6716  |
| Residuo sobre Tamiz  | %        | -         | 0,1 | -     | 0,1 | -     | 0,1 | -            | 0,1 | -     | 0,1 | -   | 0,1          | -   | 0,1 | -   | 0,1 | -   | 0,1 | -   | 0,1  | 6717  |
| Agua   | %        | 80        | -   | 80    | -   | 80    | -   | 30           | -   | -     | -   | -   | -            | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -    | 6679  |
| Mezcla con Cemento   | % masa   | -         | -   | -     | -   | -     | -   | -            | -   | -     | -   | -   | 2            | -   | 2   | -   | -   | -   | 2   | -   | 2    | 6718  |
| Mezcla Arena Silicea   |          | -         | -   | -     | -   | -     | -   | Debe Cumplir | -   | -     | -   | -   | -            | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -    | 5.3   |
| con arena granítica  |          | -         | -   | -     | -   | -     | -   | -            | -   | -     | -   | -   | Debe Cumplir | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -    | 5.4   |
| Carga de Partículas  |          | Positivas |     |       |     |       |     |              |     |       |     |     |              |     |     |     |     |     |     |     | 6690 |   |
| Ensayos Sobre Residuo Asfáltico obtenido según Norma IRAM 6719 |          |           |     |       |     |       |     |              |     |       |     |     |              |     |     |     |     |     |     |     |      |   |
| Penetración (*)  | 0,1mm    | 50        | 200 | 50    | 200 | 50    | 200 | 50           | 200 | 70    | 300 | 50  | 200          | 50  | 200 | 200 | 300 | 50  | 200 | 50  | 200  | 6576  |
| Ductilidad   | cm       | 80        |     | 80    |     | 80    |     | 80           |     | 50    |     | 80  |              | 80  |     | 40  |     | 80  |     | 80  |      | 6579  |
| Solubilidad en Tricloro  | % masa   | 95        |     | 95    |     | 95    |     | 95           |     | 95    |     | 95  |              | 95  |     | 95  |     | 95  |     | 95  |      | 6585  |
| Oliensis   |          | Negativo  |     |       |     |       |     |              |     |       |     |     |              |     |     |     |     |     |     |     | 6594 |   |

(\*) Las emulsiones convencionales con valores de penetración menores que los establecidos se designan añadiéndole la letra D

Figura 5-17. Norma IRAM 6691

Fuente: IRAM

Para las emulsiones catiónicas modificadas los ensayos que se deben realizar son los que se indican en la tabla siguiente según Norma IRAM 6698



## Norma IRAM 6698



| Emulsiones Asfálticas Modificadas Norma IRAM 6698              |          |           |     |        |     |        |     |              |              |      |     |              |     |      |     |         |     |      |
|--|----------|-----------|-----|--------|-----|--------|-----|--------------|--------------|------|-----|--------------|-----|------|-----|---------|-----|------|
|  | Unidades | CRR 0m    |     | CRR 1m |     | CRR 2m |     | CRMm         |              | CRLm |     | CRSm         |     | CRCm |     | N° IRAM |     |      |
|  |          | min       | max | min    | max | min    | max | min          | max          | min  | max | min          | max | min  | max |         |     |      |
| Viscosidad 25°   | SSF      | 50        | 20  |        |     |        |     |              |              | 50   |     | 50           |     | 50   |     | 6721    |     |      |
| 50°  |          |           |     |        | 40  |        | 20  |              |              |      |     |              |     |      |     |         |     |      |
| Residuo Asfáltico  | % masa   | 57        | 63  | 67     | 60  | 60     | 60  | 60           | 60           | 60   | 60  | 60           | 60  | 60   | 60  | 6719    |     |      |
| Hidrocarburos Dest.  | % vol    | 3         | 3   | 3      | 12  |        |     |              |              |      |     |              |     |      |     | 6719    |     |      |
| Contenido de Agua  | % masa   | 43        | 37  | 33     | 40  | 40     | 40  | 40           | 40           | 40   | 40  | 40           | 40  | 40   | 40  | 6719    |     |      |
| Asentamiento   | % masa   | 5         | 5   | 5      | 10  | 5      | 5   | 5            | 5            | 5    | 5   | 5            | 5   | 5    | 5   | 6716    |     |      |
| Residuo sobre Tamiz  | %        | 0,1       | 0,1 | 0,1    | 0,1 | 0,1    | 0,1 | 0,1          | 0,1          | 0,1  | 0,1 | 0,1          | 0,1 | 0,1  | 0,1 | 6717    |     |      |
| Recubrimiento y R. Agua  | %        | 80        | 80  | 80     | 30  |        |     |              |              |      |     |              |     |      |     | 6679    |     |      |
| Mezcla con Cemento   | % masa   |           |     |        |     |        |     |              |              | 2    |     | 2            |     | 2    |     | 6718    |     |      |
| Mezcla Arena Silicea   |          |           |     |        |     |        |     | Debe Cumplir | Debe Cumplir |      |     |              |     |      |     | 5.3     |     |      |
| Mezcla de Lechada con arena granítica                          |          |           |     |        |     |        |     |              |              |      |     | Debe Cumplir |     |      |     | 5.4     |     |      |
| Carga de Partículas  |          | Positivas |     |        |     |        |     |              |              |      |     |              |     |      |     | 6690    |     |      |
| Ensayos Sobre Residuo Asfáltico obtenido según Norma IRAM 6694 |          |           |     |        |     |        |     |              |              |      |     |              |     |      |     |         |     |      |
| Penetración  | 0,1mm    | 50        | 200 | 50     | 200 | 50     | 200 | 50           | 200          | 50   | 200 | 50           | 200 | 50   | 200 | 50      | 200 | 6576 |
| Punto de Ablandamiento   | °C       | 50        | 50  | 50     | 40  | 50     | 50  | 45           | 45           | 40   |     |              |     |      |     |         |     | 6841 |
|  |          | 40        | 40  | 40     |     |        |     |              |              |      |     |              |     |      |     |         |     |      |
| Ductilidad 5°C   | cm       | 10        | 10  | 10     | 10  | 10     | 10  | 10           | 10           | 10   | 10  | 10           | 10  | 10   | 10  | 10      | 10  | 6579 |
| Recuperación Elástica  | %        | 12        | 12  | 12     | 12  | 12     | 12  | 12           | 12           | 12   | 12  | 12           | 12  | 12   | 12  | 12      | 12  | 6830 |
| Torsional  |          |           |     |        |     |        |     |              |              |      |     |              |     |      |     |         |     |      |
| Solubilidad en Tricloro Etileno                                | % masa   | 95        | 95  | 95     | 95  | 95     | 95  | 95           | 95           | 95   | 95  | 95           | 95  | 95   | 95  | 95      | 95  | 6585 |
| Oliensis   |          | Negativo  |     |        |     |        |     |              |              |      |     |              |     |      |     | 6594    |     |      |
| Ruptura Frass  |          | -10       | -10 | -10    | -10 | -10    | -10 | -10          | -10          | -10  | -10 | -10          | -10 | -10  | -10 | -10     | -10 | 6831 |

Figura 5-18. Norma IRAM 6698

Fuente: IRAM

En aquellos casos en los que alguna de las capas a ligar contenga ligante asfáltico modificado, la emulsión asfáltica a emplear en el riego de liga debe ser del tipo modificada, caso contrario, la emulsión asfáltica a emplear en el riego de liga puede ser del tipo convencional o modificada.

### Dotación del riego de liga

Según el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales para Riegos de Liga con Emulsiones Asfálticas. Edición 2017: “La determinación de la dotación del riego de liga debe ser ajustada en el Tramo de Prueba, dependiendo de la condición de la superficie a regar. La misma surge de la verificación del cumplimiento de los requisitos establecidos en la Figura 5-19 de dicho pliego, para el ensayo de adherencia entre capas, sobre los testigos extraídos del Tramo de Prueba.”

| Tabla N°3- ENSAYO DE ADHERENCIA ENTRE CAPAS        |                             |           |
|--|-----------------------------|-----------|
| Parámetro  | Método                      | Exigencia |
| Ensayo de adherencia entre capas de rodadura (MPa) | UNE-EN 12697-48, ensayo SBT | > 0,70    |
| Ensayo de adherencia entre capas de base (MPa)     | UNE-EN 12697-48, ensayo SBT | > 0,60    |

Figura 5-19. Tabla 3 ensayo de adherencia entre capas

Fuente: Vialidad Nacional



En otro orden también indica que la dotación del riego debe estar comprendida entre 0,25 -0,40 kg/m<sup>2</sup> de asfalto residual

## Factores que inciden en la calidad

Los factores que influyen en la calidad son los que se detallan a continuación:

**Calidad del equipo de colocación:** El equipo de distribución del riego debe tener un sistema que regule la dotación en función de la velocidad de avance, de manera de obtener un riego uniforme sobre la superficie, cumpliendo con la dotación definida en la correspondiente Dotación de Obra.

El equipo para la distribución de la emulsión asfáltica debe ir montado sobre neumáticos. El mismo debe ser capaz de mantener la emulsión dentro del rango de temperatura prescrita, así como también aplicar la dotación de emulsión asfáltica definida en la correspondiente Dotación de Obra.

La bomba debe generar una presión suficiente en la barra de distribución, de manera que los picos rieguen de forma pareja.

**Correcto funcionamiento de los picos rociadores:** Se debe controlar la altura de forma de que al aplicar el riego exista un triple solapamiento del riego, la alineación y la limpieza de los picos rociadores para garantizar que en la aplicación la emulsión salga en forma de lámina plana, homogénea y continua.

**Temperatura y presión de colocación del ligante:** Se debe controlar la temperatura de aplicación de la emulsión asfáltica, en el termómetro del equipo, así como la temperatura de los quemadores.



*Figura 5-20. Termómetro para verificar temperatura de almacenamiento y aplicación de la emulsión*

*Fuente: Lanamme UCR*

**Limpieza de la superficie:** El área de aplicación antes de realizar el riego de liga debe estar libre de residuos, materiales sueltos, polvo y humedad ya que estos impiden la correcta adherencia del riego.





*Figura 5-21. Limpieza de la superficie a intervenir con barredora mecánica  
Fuente: Lanamme UCR*

**Arrastre de liga:** Este inconveniente es ocasionado por los vehículos que transitan sobre el área de trabajo, generando pérdida de asfalto residual sobre la superficie donde fue aplicada. Es un problema constructivo muy frecuente, que puede ser corregido utilizando vehículos de transferencias o aplicando lechadas de cal



*Figura 5-22. Arrastre de liga debido al tránsito de vehículos sobre la emulsión  
Fuente: Asphalt institute*



Ensayo para evaluar la calidad Pr EN 12697-48:

El Ensayo de SBT permite evaluar la adherencia entre capas y se realiza mediante una sollicitación sobre testigos de 150 mm de diámetro y una velocidad de aplicación de la carga de 50 mm/min.

La carga se aplica mediante una mordaza de dos cuerpos, contenidas en un plano perpendicular al testigo-probeta, sobre el que se aplica un esfuerzo en la interfaz de las dos capas (esfuerzo cortante puro)

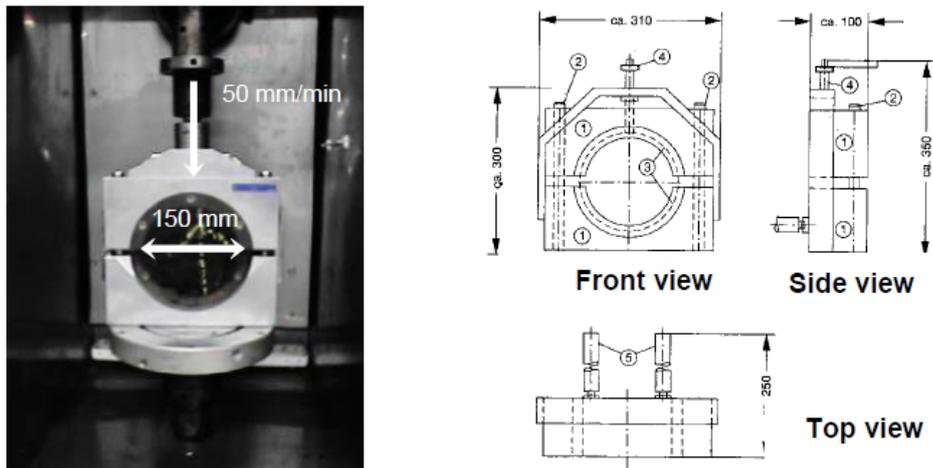


Figura 5-23. Vista ensayo SBT

Fuente: Rivera

La exigencia según Vialidad Nacional deberá ser la que indica la Figura 5-24

| <b>Tabla N°3- ENSAYO DE ADHERENCIA ENTRE CAPAS</b> |                             |                  |
|--|-----------------------------|------------------|
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Método</b>               | <b>Exigencia</b> |
| Ensayo de adherencia entre capas de rodadura (MPa) | UNE-EN 12697-48, ensayo SBT | > 0,70           |
| Ensayo de adherencia entre capas de base (MPa)     | UNE-EN 12697-48, ensayo SBT | > 0,60           |

Figura 5-24. Tabla ensayo de adherencia entre capas

Fuente: Vialidad Nacional



## Bibliografía

Andaluz, D., Felipo, J., Peña, J. L., García Santiago, J. L., Miró Recasens, J. R., Martínez, F. D. A., & Lucas, F. J. (2019). Buenas prácticas en la ejecución de riegos de adherencia. In *Memorias del XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto: Retos y Oportunidades en el Mundo del Asfalto* (pp. 881-893). Asociación Mexicana del Asfalto.

Asociación técnica de emulsiones bituminosas (ATEB)

Delbono Héctor Luis (2019). Adherencia entre capas de pavimentos, interponiendo geosintéticos.

Ferré, P. (2005). Las emulsiones de betún su química-física. *Carreteras*, revista técnica de AEC, 139, 20-33.

Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras. (2010)

Pliego de especificaciones técnicas generales para riegos de liga con emulsiones asfálticas (2017). Vialidad Nacional

Rivera, J. J. (2019). Estudio de riegos asfálticos de liga entre capas asfálticas para rehabilitación de pavimentos flexibles fresados. edUTecNe, Universidad Tecnológica Nacional.



## CAPITULO 6

# Reciclado en caliente de mezcla asfáltica modificada para uso vial

Ing. Nidia Nilda Estefanía Fretes

### Introducción - Definición de RAP

Cuando el pavimento asfáltico ha culminado su vida en servicio o por razones de planificación es necesario la demolición o el fresado de la carpeta existente, a ese material se lo denomina por su sigla en inglés RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).

### Técnicas de obtención del RAP

- Máquinas fresadoras



Figura 6-1. a la derecha se observa una maquina fresadora estacionada a pie de obra, mientras que a la izquierda se observa una maquinara en el proceso de fresado, generando la carga del material sobre el camión

Fuente: elaboración propia; <https://www.fresados.com/>

La carpeta asfáltica puede ser extraída de la calzada mediante el empleo de las maquinas fresadoras o perfiladoras de Pavimentos en Frio. Estos equipos han ido evolucionando a lo largo del tiempo desde sus inicios en la década de los 70. Hoy en día, se cuenta con una gran variedad tecnológica, son maquinarias más simples, confiables y de alta capacidad, que continúan innovándose. El equipo tiene un rotor, que es un cilindro giratorio compuesto por picas o púas, quienes serán las encargadas de romper y disgregar la mezcla asfáltica en el pavimento. Este material desmenuzado es transportado mediante un sistema de cintas transportadoras frontal



plegable hasta un camión receptor que acompaña el avance de la fresadora. Además, contienen un sistema de rociado de agua que durante el proceso cumple con las siguientes funciones: lubricación, enfriamiento y, disminución del nivel de polvo. Las maquinas fresadoras se desplazan mediante un sistema de cadenas con tacos de poliuretano que proporcionan una vida útil más prologada y tracción positiva en todo tipo de superficie de pavimento. Esta técnica permite generar una primera separación de material entre capas de base o capas de rodamiento.

Trabajos en áreas pequeñas tanto en rutas como en zonas urbanas, donde una fresadora por sus dimensiones no puede acceder tales como: curvas cerradas, calles estrechas y reparaciones acotadas o con obstáculos. En la actualidad se desarrolló un accesorio fresadora para mini cargador como se observa en la Figura 6-2, que por su peso y tamaño son prácticos para maniobrar. Dicho accesorio se compone de tres componentes principales: un rodillo con puntas de carburo, el soporte con desplazamiento hidráulico lateral y patines frontales para control de profundidad necesaria a remover. En este caso, el material disgregado queda sobre la calzada y debe ser cargado de manera manual o con un equipo complementario.



*Figura 6-2. Mini cargadora con accesorio fresadora*

*Fuente: elaboración propia. Av. Corriente, Ciudad Autónoma de Buenos Aires*

- Demolición



*Figura 6-3. Demolición de la carpeta asfáltica*

*Fuente: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_1JYwU-U\\_dU](https://www.youtube.com/watch?v=_1JYwU-U_dU)*

Otra técnica para extraer el pavimento asfáltico es mediante la demolición con maquinarias que puedan romper y levantar la carpeta. De esta manera, se obtienen bloques completos, los cuales para ser reutilizados deben ser triturados posteriormente a tamaños aptos para ser empleados



en una nueva mezcla asfáltica. Otra desventaja es la imposibilidad de realizar una demolición selectiva entre capas componentes del paquete estructural del pavimento existente. Esto lleva a ampliar la variabilidad del material que se puede extraer debido a la contaminación y heterogeneidad que el mismo presenta.

#### Fraccionamiento y acopio del RAP

Cuando el material que se obtiene del pavimento existente no presenta el tamaño necesario para ser incorporado en una nueva mezcla asfáltica, se procede al fraccionamiento de este con equipos de trituración.

Para el acopio y conservación de este material se debe tener presente que el mismo es hidrofílico, lo cual significa que tiene una gran afinidad con el agua. Si analizamos el material, el mismo se compone por agregado pétreo cubierto por el ligante asfáltico, que en parte fue absorbido y otra parte, se encuentra libre. Entonces, el agua que puede absorber es importante, ya que queda atrapada entre el agregado pétreo y el ligante asfáltico. Entonces, la humedad presente en el RAP será un parámetro importante a considerar tanto en la producción de la nueva mezcla, esto implica mayores emisiones de CO<sub>2</sub>, además limita el porcentaje de RAP que se pueda agregar según la tipología de planta asfáltica con la que se cuenta debido a las presiones internas que se producen por el vapor de agua dentro del tambor mezclador. Lo recomendable es no dejarlo expuesto a la intemperie, pero con circulación de corriente de aire, tal como se observa en la Figura 6-4, en galpones con cubiertas y laterales abiertos. Tampoco cubrir el material con bolsas que posibiliten la aparición de agua por transpiración debido a los cambios de temperatura.



*Figura 9-4. en la derecha se observa las pilas de acopio durante el proceso de trituración y en la izquierda los galpones de acopio de RAP.*

*Fuente: García Santiago, J.L.*

## ¿Cuándo reciclar?

### Analizar el estado del pavimento flexible

La cantidad de fallas o irregulares que pueda presentar el pavimento asfáltico para evaluar su condición, tales como: fisuras y desprendimiento superficial (ver Figura 6-5), ahuellamiento (ver Figura 9-6), falta de adherencia superficial neumático-calzada (ver Figura 6-7), etc.





Figura 6-5. Figuración y desprendimiento  
Fuente: J. Pagola, M. Giovanon, O.

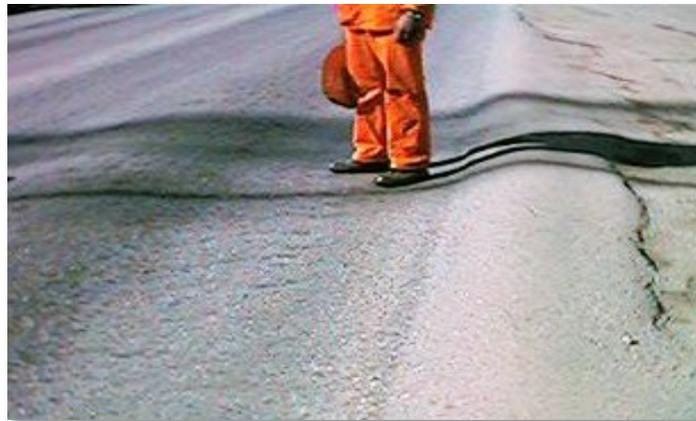


Figura 6-6. Ahuellamiento  
Fuente: Pagola, M. Giovanon, O. (2019).



Figura 6-7. Péndulo Ingles de fricción.

Fuente: Tosticarelli, J. Pagola, M. Giovanon, O. Martínez, P. Mezzelani, G. Muzzolini, J.

En la Figura 6-8, podemos apreciar cómo avanza el deterioro del pavimento con el paso de los años desde la recepción de la obra hasta la evaluación de un nuevo proyecto. Además, agotadas las instancias de mantenimiento y conservación del pavimento, aparece el reciclado del mismo, siempre y cuando se cuente con material de la carpeta asfáltica en superficie.



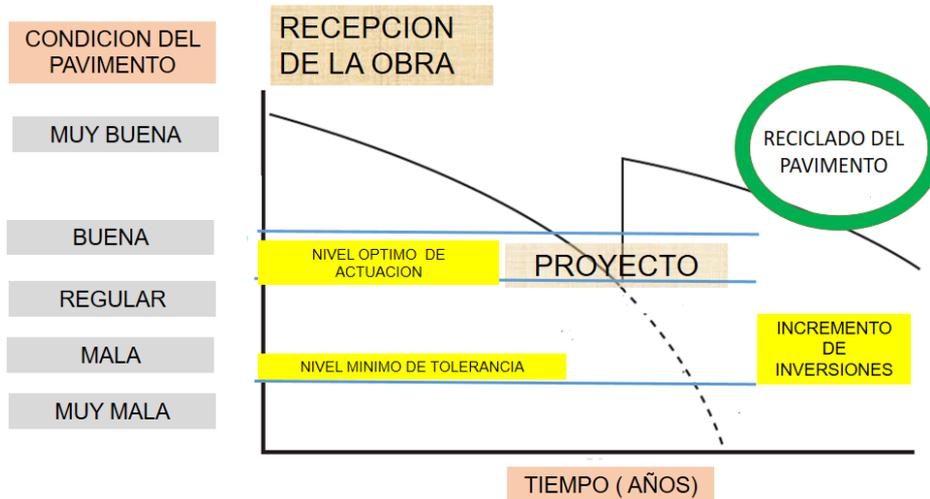


Figura 6-8. Evaluación del pavimento.  
Fuente: Pagola, M. Giovanon, O. (adaptación propia)

Para llevar adelante el análisis se tienen en cuenta dos niveles:

| Nivel RED   | Nivel Tramo  |
|---|--|
| Gestión de la red   | Estudio sobre el tramo   |
| Sectorizar tramos homogéneos                                  | Diseño del proyecto de mejora                                    |
| Desarrollo del presupuesto anual (mantenimiento y obra nueva) | Gestión de la calidad del tramo (existentes y recepción de obra) |
|   | Control de tramos experimentales                                 |



Figura 6-9. Evaluación de estado  
Fuente: Pagola, M. Giovanon, O. (adaptación propia)

Hoy en día, se han desarrollado programas que funcionan como herramientas para estos estudios tales como: HDM (HIGHWAY DEVELOPMENT & MANAGEMENT, los cuales tienen como objetivo la evaluación de alternativas para la inversión en carreteras. Los datos que se deben ingresar son los siguientes:



- Dimensiones del proyecto
  - Ubicación geográfica /clima
  - Historia
    - ❖ Construcción
    - ❖ Mantenimiento
  - Condición estructural actual
  - Subbrasante
  - Transito actual
  - Materiales que lo conforman
- 

Contar con un inventario vial a nivel local, regional y nacional es fundamental para contribuir en la recolección de datos de suma importancia en el desarrollo de las vialidades presentes y futuras.

## Economía circular

Es importante incorporar el concepto sobre las denominadas “4R”, las cuales son: **Restauración**, cuando se mejoran las características superficiales de la capa de rodamiento mediante un tratamiento bituminoso superficial (TBS); **Refuerzo**, al modificarse las condiciones de diseño o existen fallas debidas al ahuellamiento que pueden subsanarse con la aplicación del fresado de la carpeta y la adición de una nueva capa asfáltica para tal fin, siempre y cuando no existan limitantes físico tales como gálibo de puentes, etc.; **Reciclado**, de las o las capas que conforman el paquete estructural del pavimento cuando finalizaron su vida en servicio, pero las capa no ligadas no presentan deformaciones o fallas. En este caso, se recomienda generar un fresado selectivo entre la capa de rodamiento y las capas de base para disminuir la heterogeneidad del material resultante; Finalmente, agotadas todas las instancias anteriores, la **Reconstrucción**, cuando la carretera presenta problemas de serviciabilidad notables y estructurales de las capas no ligadas. Entonces, se retira todo el material en su totalidad y es reemplazado por un diseño nuevo adaptado a las necesidades de proyecto.

Ahora sí, al hablar de economía circular en las mezclas asfálticas se aspira a brindar soluciones: **sostenibles**, es decir, procesos que den respuesta a las necesidades actuales económicas, sociales, culturales, tomando conciencia del cuidado del medio ambiente, sin poner en riesgo las mismas en las generaciones futuras; y **sustentables** apuntando a mantener a lo largo del paso del tiempo, sin agotar recursos. En el siguiente Figura 6-10, se observan cada uno de los procesos que conforman la economía circular, y como el sistema reincorpora antiguos “residuos”, ahora como “recursos”.



Soluciones Sustentables y Sostenibles  
Gestión de residuos



Figura 6-10. Economía circular en una obra de pavimentación flexible  
Fuente: Jair M. Seminarios AAC Webinar (adaptación propia)

Para orientar a los proyectos de pavimentos flexibles bajo las premisas planteadas hacia una economía circular, el análisis de la pirámide invertida (ver Figura 6-11) toma un papel importante, enfatizando en la búsqueda de la prevención mediante el empleo del diseño de pavimentos con una vida en servicio más prolongada. Además, incorporar como parte de los procesos la reutilización del RAP en nuevas mezclas y el reciclaje de las capas de base o capas de rodamiento (aún en periodo de estudio). En otra escala, visibilizar la posibilidad de la recuperación de energía del pavimento flexible, si esto fuera posible. Quedando en la parte más reducida de la misma la disposición final de las mezclas asfálticas, un material tan valioso en sí mismo, conformado por materiales no renovables, con costos económicos considerables como es el caso del ligante asfáltico y los agregados pétreos.

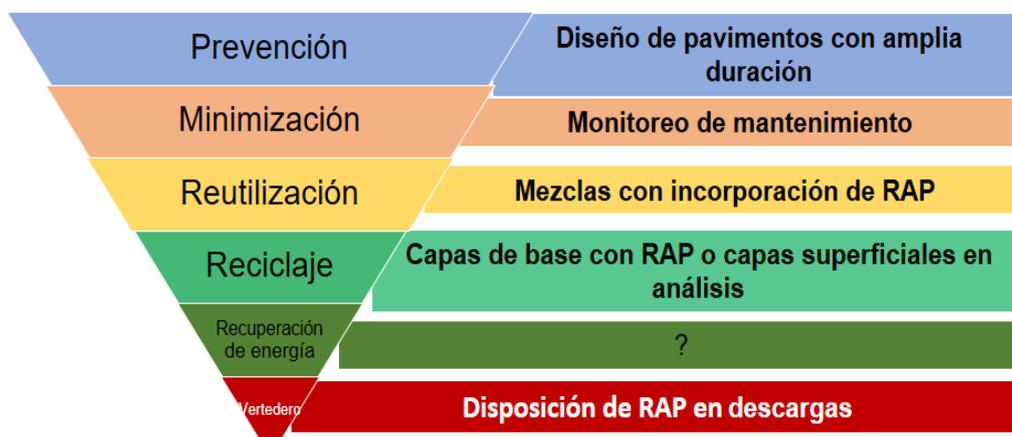


Figura 6-11. Pirámide invertida con enfoque en el pavimento flexible  
Fuente: Jair M. Seminarios AAC Webinar (adaptación propia)



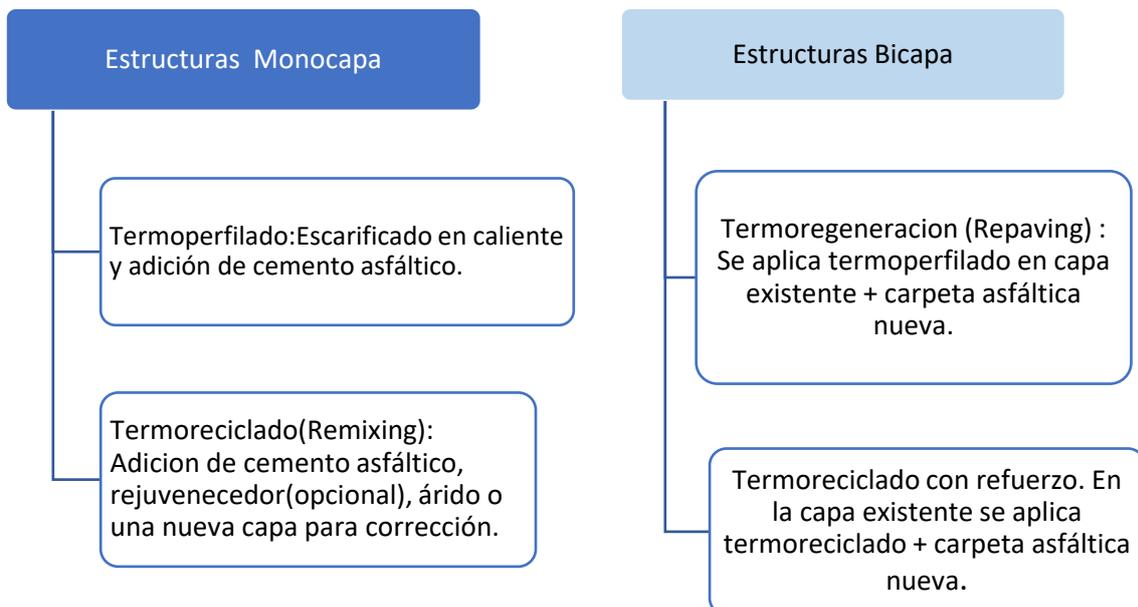
En el desarrollo del planteo de una economía circular, el análisis de ciclo de vida (ACV) de un pavimento flexible es fundamental. Es por ello, que para describir que es ACV según la norma IRAM-ISO 14040, se define como la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida. A continuación, se exponen los cinco procesos que forman parte del ciclo de vida una mezcla asfáltica. (ver Figura 6-12)



Figura 6-12. Procesos que conforman el ciclo de vida del pavimento flexible  
Fuente: Moll Martínez, R. Aenlle, A.A. y González Lobera, M.  
(adaptación propia)

## Tipologías de reciclado en caliente

### In situ/In place



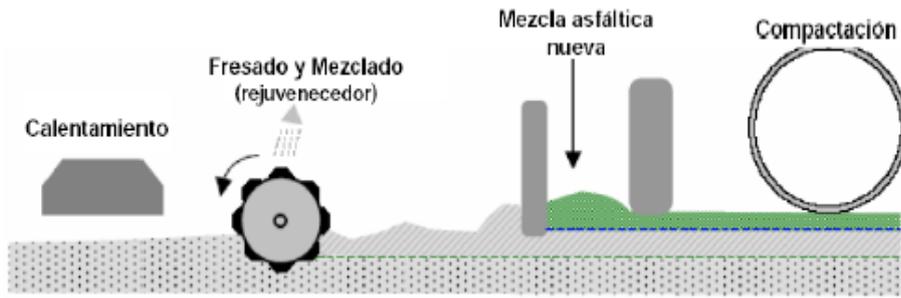


Figura 6-13. Esquema del proceso de una Estructura Bicapa Termoregeneración (Repaving)  
Fuente: García Santiago, J.L.

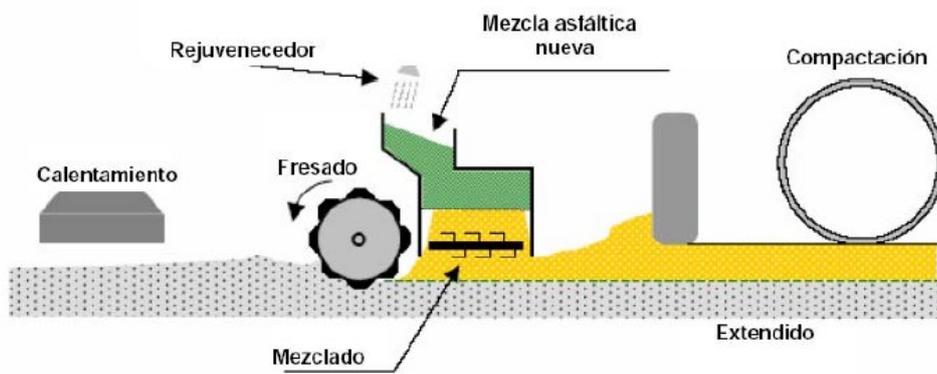
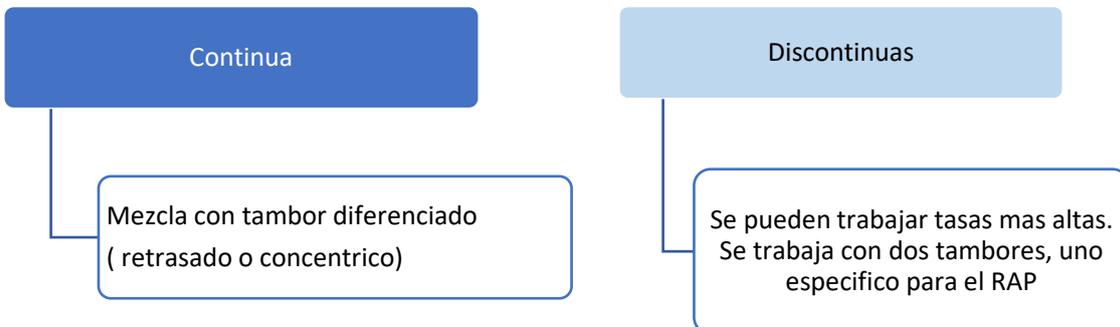


Figura 6-14. Esquema del proceso de una Estructura Bicapa Thermoreciclado  
Fuente: García Santiago, J.L.

En planta/Off site



## Requisitos a cumplir para el RAP según CPA-2015

Como primera premisa se solicita disminuir la heterogeneidad, ya sea con una obtención selectiva, etc.

Para la caracterización del RAP, en el caso del agregado que lo compone debe cumplir con los requisitos solicitados para cualquier agregado pétreo virgen a ser implementado en una mezcla asfáltica. Mientras que el ligante asfáltico recuperado, en porcentajes de RAP >15 % en peso a incorporar en la nueva mezcla donde el asfalto libre incide en el asfalto resultante, en porcentajes <15 % solo es considerado como agregado pétreo. Se restringe a un máximo de 40 % en peso de la nueva mezcla debido al grado de rigidez que aporta.

Los parámetros que deben cumplir las mezclas con RAP son los especificados para toda mezcla asfáltica en caliente.

## Ventajas y desventajas del empleo de RAP

| Ventajas  | Desventajas   |
|---|---|
| Reducción de la explotación de canteras         | Heterogeneidad, implica mayor gestión de calidad  |
| Reducción de la extracción de asfalto           | Material hidrofílico, aumento en la infraestructura necesaria para el acopio, conservación y proceso de incorporación |
| Disminución en las emisiones de CO <sub>2</sub> | Generar antecedentes de obras   |
| Construcciones sustentables                     |   |
| Proyectos sostenibles                           |   |
| Reduce el impacto ambiental                     |   |

*Figura 6-15. Ventajas y Desventajas del RAP  
Fuente: elaboración propia*

## Innovación de las mezclas asfálticas modificadas

La creación de los asfaltos modificados, por lo general con polímeros Estireno Butadieno Estireno (SBS) o Etil vinil de Acetato (EVA), dieron lugar a la aparición de nuevas tecnologías de mezclas asfálticas capaces de soportar las cargas de tránsito y las diferentes condiciones climáticas. A continuación, en la Figura 6-13, nombraremos algunas de ellas con una breve descripción de las mismas.



| SMA ( Stone Mastic Asphalt)  | Alto Módulo   | Drenantes  | Mezclas delgadas o ultradelgadas  | Mezclas altamente modificadas AAMP-HIMA  |
|--|---|--|---|--|
| Mezcla con esqueleto granular fuerte   | Rigidez superior que una mezcla convencional, mientras que su resistencia a la fatiga por lo menos la iguala. | Mezcla que permiten el paso del agua a través, debido a su elevado porcentaje de vacíos. Alrededor de un 20% .   | Mezclas de muy bajo espesor, que mejoran las características superficiales. | Mezclas de alto desempeño (En estudio)<br><br>Tramo de prueba aproximadamente 200Km sobre la Ruta Nacional 9, en el reacondicionamiento del Corredor Vial 5, calzada ascendente de la Autopista Buenos Aires - Rosario |
| Asfalto modificado con polímero y fibras. Presenta un mortero asfáltico abundante que le aporta durabilidad. | Ligantes bituminosos de elevada consistencia.   | Ligante capaz de evitar la exudación o lo contrario, no aglutinar las partículas debido a la cantidad de vacíos. | Asfalto modificado con polímeros  |  |
| Granulometría discontinua.   | Granulometría continua.   | Granulometría continua   | Granulometría discontinua   | MAC F10 ( Granulometría discontinua  |
| Función: capa de rodamiento.   | Función: capa de base nueva o capa de refuerzo.   | Función: capa de rodamiento, aunque pueden utilizarse como bases.  | Función: Solo capa de rodamiento hasta 3cm de espesor                       | Por el momento se aplicó en una carpeta de rodamiento.   |

Figura 6-16. Mezclas asfálticas modificadas

Fuente: Martínez, F. Paramo, J. Poncino, H. (adaptación propia)

## Estudio del Comportamiento de los RAP Derivado de Mezclas con Asfaltos Modificados en la Producción de Mezclas en Caliente para Carreteras

Desde la década del 90 en nuestro país se empezaron a utilizar los asfaltos modificados que dieron lugar a nuevas tipologías de mezclas asfálticas. Hoy en día, estas mezclas asfálticas modificadas están en periodo de rehabilitación parcial o total de la calzada, desde esta premisa surge el incentivo de analizar el comportamiento de este material “innovador”, debido a su reciente obtención en comparación con el uso e investigación del RAP. Para generar la distinción respecto al origen de este material lo denominamos RMAP, adicionando la “M” de modificado. Existen varias técnicas para el empleo del RAP en nuevas mezclas asfálticas tanto en frío o en caliente. En particular, en esta investigación nos centramos en su aplicación en caliente, debido a que se cuenta con una vasta información que el empleo del reciclado en frío ha dado buenos



resultados en calzadas secundarias o con poca circulación de tránsito pesado, mientras que en categorías mayores presentan fallas prematuras.

#### Objetivos:

- Analizar la utilización de los RMAP, utilizando la “M” por modificado, en la fabricación de nuevas mezclas en caliente, evaluando su comportamiento.
- Establecer diferencias entre mezclas de similar tipología convencionales y aquellas que incorporen RMAP.
- Determinar el porcentaje máximo de RMAP que se puede incorporar a una mezcla sin la adición de rejuvenecedor, cumpliendo con su mejor desempeño.
- Factibilidad Técnico-Económica y los beneficios ambientales que aportan los RMAP.

#### Estado de avance:

En el laboratorio del Centro de Investigaciones Viales LEMaC-UTN FRLP-CIC PBA, se cuenta con tres tipologías de mezclas asfálticas modificadas, con diferente data de tiempo en servicios y ubicación. Dos provienen de la provincia de Buenos Aires y una de la provincia de Santa Fe. En la siguiente Figura 6-17, se describen los mismo.

| RAP derivado de mezclas con asfaltos modificado | Ubicación (tramo homogénea)                                | Tipología de MA original | Años en servicio |
|---|--|--------------------------|------------------|
| RMAP 1  | AU Ezeiza-Cañuelas, Buenos Aires. Argentina                | SMA 19                   | 10 a 12          |
| RMAP 2  | RP91 Cañada de Gómez-Totoras. Santa Fe. Argentina          | CACD con AM3             | 1,5              |
| RMAP 3  | Av7 entre calle 54 y 57. La Plata. Buenos Aires. Argentina | CACD con AM3             | 20               |

Figura 6-17. Descripción de los materiales RMAP.

Fuente: elaboración propia

Se está trabajando en la caracterización de los materiales, tanto vírgenes como de los RMAP. Este proceso se vio atravesado por la pandemia, la cual genera un retraso de casi dos años en la parte experimental de la tesis. Debido a lo antes mencionado, hasta el momento se cuenta con la caracterización de los agregados pétreos, filler y ligante asfáltico vírgenes. En el caso de los tres RMAP, solo se logró caracterizar RMAP1 (ver Figura 6-18), mediante la norma NLT-353 utilizando la técnica con el destilador rotatorio (rotovapor), se recuperó el ligante asfáltico envejecido modificado. El solvente utilizado fue diclorometano. Este procedimiento se puede observar en la Figura 6-19 realizado en el laboratorio del Centro de Investigaciones Viales LEMAC-UTNFRLP-CIC-PBA. Luego, mediante una centrifuga de plato se obtuvo el agregado pétreo.





*Figura 6-18. Material RMAP1 seco en estufa a 60° C.  
Fuente: elaboración propia*



*Figura 6-19. Equipo rotovapor en funcionamiento.  
Fuente: elaboración propia. Laboratorio LEMaC-UTN FRLP-CIC-PBA*

Los valores obtenidos del ligante recuperado se observan a continuación en la Figura 6-20. Este ligante asfáltico modificado envejecido siendo en sus orígenes, seguramente un AM3, demuestra una pérdida de consistencia proporcionada por los valores de la penetración y el punto de ablandamiento. Además, el aumento de la viscosidad a los 135 °C demuestran la pérdida de propiedades como consecuencia del envejecimiento e inclusive, la degradación del polímero, sufrido durante el periodo en servicio de la carpeta asfáltica. Al tratarse de un asfalto modificado, se adicione el ensayo de Recuperación Elástica por Torsión, el cual muestra valores notables en comparación con un asfalto convencional, lo cual motiva a continuar con la investigación para profundizar la evaluación con ensayos reológicos más específicos como es el caso de: SARA, FTIR, EDAX y DSR.

Además, en la Figura 6-21 se observa la gráfica de la curva granulométrica en color azul del agregado recuperado, junto a los Usos Límites estipulados para una mezcla asfáltica SMA 19 en color rojo, dado que la mezcla de origen de este pavimento es de dicha tipología, allí se puede apreciar la influencia del fresado en el material resultante que genera una especie de sobre trituración de la mezcla, aumentando la cantidad de material fino.



| Parámetros analizados                          | Valores resultantes | Método utilizado |
|--|---------------------|------------------|
| Penetración<br>(25°C, 100gr.5s)(1dmm)          | 20                  | IRAM 6576        |
| Punto de ablandamiento(°C)                     | 63                  | IRAM 6841        |
| Recuperación elástica por torsión<br>(25°C)(%) | 12                  | IRAM 6830        |
| Viscosidad Brookfield<br>(100°C)(poise)        | 148                 | IRAM 6837        |
| Viscosidad Brookfield<br>(135°C)(poise)        | 11,70               | IRAM 6837        |

Figura 6-20. Caracterización del ligante asfáltico modificado envejecido recuperado del RMAP1

Fuente: elaboración propia

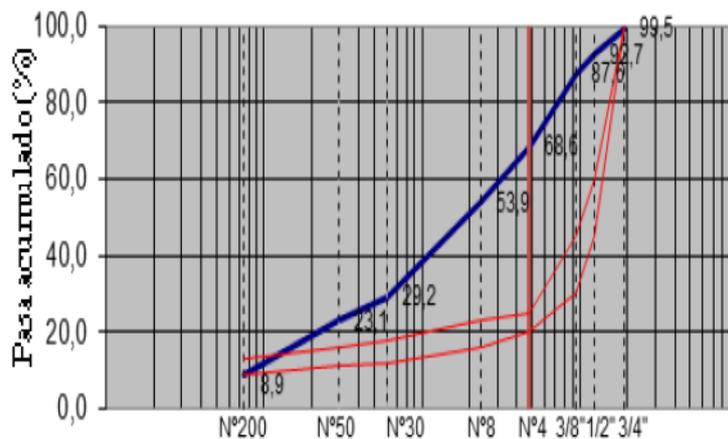


Figura 6-21. Curva granulométrica del agregado pétreo extraído del RMAP1, luego del lavado con solvente donde se lo separó del ligante asfáltico.

Fuente: elaboración propia

Se estima continuar con el análisis reológico del ligante obtenido del RMAP1 y de los otros dos materiales. Una vez finalizada la caracterización, continuar con la dosificación de mezclas densas en caliente utilizando el método Marshall con una incorporación de RMAP de 25% y 50% en peso de mezcla. Se aspira a realizar un diseño de mezcla balaceado, por lo cual se evaluará el desempeño de las mismas ante el ahuellamiento y la fatiga. En particular, sobre esta última falla debido a la pérdida de resinas y aceites (volátiles) transformados en asfaltenos, partículas con mayor peso molecular, mediante el proceso de envejecimiento que ha sufrido el asfalto modificado durante su vida en servicio.



## Bibliografía

Comisión Permanente del Asfalto (2015). Pliego de Especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos convencionales reciclados en caliente.

Figueroa, A. S. (2021) Tecnología del reciclado en frío y caliente, Centro de capacitación profesional. Nestor Human & Asociados.

García Santiago, J.L. Reciclado de capas de Rodaduras. Conservación y Rehabilitación Superficial de los firmes de las carreteras. Jornadas Técnicas.

González Abadías, A. I; Rubio Guzmán B. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. (2011) Reciclado de materiales bituminosos: Conclusiones del proyecto DIRECT-MAT (Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera).

Jair M. Seminarios AAC Webinar (2020) La pavimentación Asfáltica en la Argentina: Dos décadas de avance y desarrollo.

Larsen, D. Daguerre, L. (2020) Soluciones para Pavimentos de Altas Prestaciones, 9 a Jornada Técnica.

Martínez, F. Paramo, J. Poncino, H. (2018) Tecnologías Especiales en construcciones Viales, Curso de capacitación EPEC. FCEIA IMAE. Universidad Nacional de Rosario.

Moll Martinez, R. Aenlle, A.A. y González Lobera, M. (2017) Mezclas asfálticas de bajo impacto ambiental para la rehabilitación de las carreteras en Cuba. Rev. Cuba. Ing., vol. VIII, n.o No 1, pp. 14- 23.

Naciones Unidas, Asamblea general (1987). Soluciones para Pavimentos de Altas Prestaciones, 9 a Jornada Técnica.

PIARC (2021) Use of recycled materials in pavements. PIARC literature review. Technical Committee 4.1 Pavements ISBN 978-2-84060-646-8

Tosticarelli, J. Pagola, M. Giovanon, O. Martínez, P. Mezzelani, G. Muzzolini, J. (2006). Auscultación de pavimentos en la Argentina, su evolución y estado actual. Comisión Permanente del Asfalto XXXIV Reunión del Asfalto. Mar del Plata.



## CAPITULO 7

# Demarcación horizontal

Ing. Verónica Mechura

### Introducción - Importancia del estudio de la demarcación horizontal

Las marcas viales o demarcación horizontal son las señales de tránsito aplicadas sobre la calzada, con la finalidad de guiar el tránsito vehicular, regular la circulación y advertir determinadas circunstancias. La regulación incluye transmisión de órdenes y/o indicación de zonas prohibidas.

Es posible establecer las características de los materiales para Señalización Horizontal dependiendo del entorno de aplicación. Podemos mencionar que en ciudades se tiene una mayor exigencia con respecto al tiempo de secado y mayores requisitos en la evaluación de la resistencia al deslizamiento, a la abrasión y al ensuciamiento. Por ejemplo, en la Figura 7-1 se presenta una comparación fotográfica de un reordenamiento vial mediante la aplicación de marcas viales en una esquina muy transitada. Se evidencia la importancia de intervenir zonas urbanas con la finalidad de ordenar el flujo de tránsito y proteger a los peatones. En las noches, los únicos medios de comunicación entre el conductor y la carretera son las pinturas de demarcación horizontal y las señales verticales.

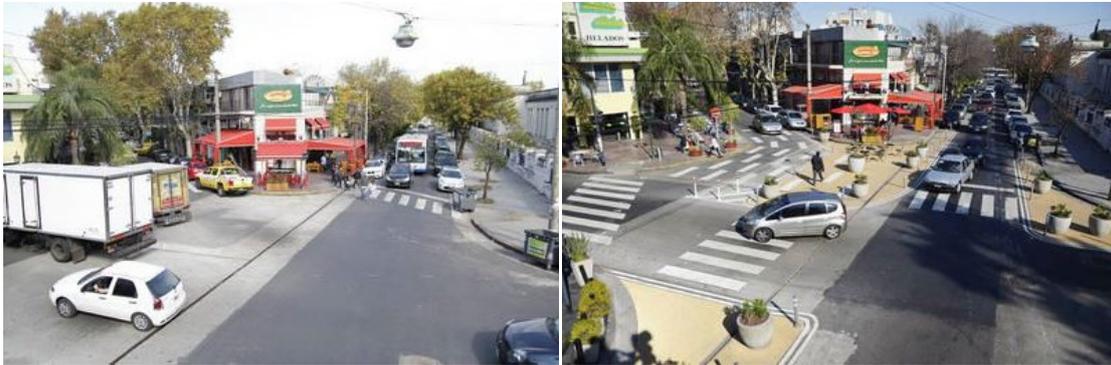


Figura 7-1. Demarcación horizontal en zona urbana

Fuente: Cristacol

En cambio, en carreteras o autovías, se considera que la propiedad más importante es la visibilidad nocturna. En la Figura 7-2 se observan dos imágenes de un mismo tramo de ruta, en condición diurna y nocturna, que evidencian la importancia de que las marcas viales sean retrorreflectantes.





Figura 7-2. Visibilidad diurna y nocturna en rutas

Fuente: García

El Decreto Nacional N°779/95 Aprueba la reglamentación de la ley N° 24.449 de Tránsito y Seguridad Vial y el Anexo L “Sistema de señalización vial uniforme”. El mismo, en su Capítulo VI establece: “...CONCEPTO. Las marcas viales o demarcación horizontal son las señales de tránsito demarcadas sobre la calzada, con el fin de regular, transmitir órdenes, advertir determinadas circunstancias, encauzar la circulación o indicar zonas prohibidas. El material debe ser antideslizante, resistente y de un espesor no mayor a CINCO MILIMETROS (5 mm), con excepción de las tachas y separadores de tránsito.

Las demarcaciones serán uniformes en diseño, posición y aplicación. Tal como para los demás dispositivos de control de tránsito, es necesario su uniformidad a fin de que puedan ser reconocidas y entendidas instantáneamente por los usuarios de la vía...”

En otro de los ítems, establece “...b) REFLECTIVIDAD: En autopistas, semiautopistas, rutas, túneles y puentes, accesos y egresos de las vías mencionadas y en calles y avenidas de intenso volumen vehicular, toda la demarcación debe ser reflectiva.

## Recubrimientos retrorreflectantes

Existe una gran diversidad de materiales y combinaciones posibles para obtener los recubrimientos retrorreflectantes. En la Figura 7-3 se puede observar que estos materiales están conformados por un material base con la adición de un material de post mezclado. Los primeros pueden estar conformados por pintura, termoplástico o plástico en frío.

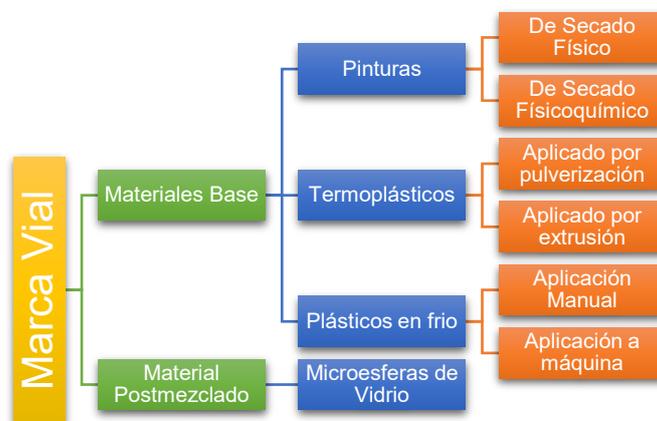


Figura 7-3. Conformación de las marcas viales

Fuente: elaboración propia



Las **pinturas** se clasifican según su proceso de secado en: de secado físico y de secado fisicoquímico.

#### Pinturas de secado físico

Pueden ser acrílicas base solvente o emulsiones acuosas. Las **pinturas base solvente** generalmente están formadas por resinas acrílicas que se disuelven en solventes orgánicos. En los países donde todavía está permitido, se utilizan los solventes aromáticos como ésteres o cetonas a pesar de su peligrosidad para el medio ambiente y la salud humana, por su menor precio, mejor control de secado y, en general, mejor adherencia a superficies asfálticas. Luego de la aplicación en espesores de película húmeda, no mayores a 600  $\mu\text{m}$ , la evaporación del solvente genera la solidificación del polímero y, así, la película se forma por un fenómeno físico. El solvente es útil para que la pintura sea líquida y luego, escapa a la atmósfera por evaporación como Compuesto Orgánico Volátil (COV). En cambio, en las **emulsiones acuosas** el mecanismo de formación de la película se produce por coalescencia. Para comprender este fenómeno es necesario aclarar que cada polímero en emulsión precisa de una temperatura determinada, denominada Temperatura Mínima de Formación de Film (TMFF), para formar una película uniforme y homogénea. En la Figura 7-4 se presenta el mecanismo de formación del film de un polímero en emulsión a la temperatura correcta (superior a la mencionada TMFF) dividido en cuatro etapas. La primera imagen (Figura 7-4 A) corresponde al momento de la aplicación de la emulsión que contiene el agua en su totalidad y las partículas de polímero se mueven libremente en su seno. Luego, conforme se evapora el agua (Figura 7-4 B), las partículas de polímero se acercan unas a otras y; a medida que el agua se continúa evaporando, se deforman (Figura 7-4 C). Finalmente, las partículas se unen de manera progresiva formando una película (Figura 7-4 D).

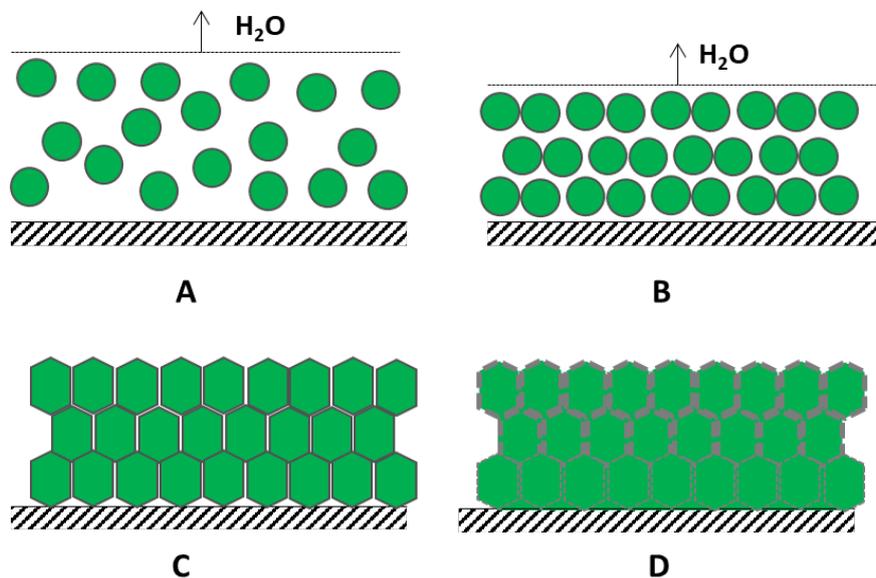


Figura 7-4. Fenómeno de secado por coalescencia  
Fuente: Cruz Alcalde (adaptación propia)

#### Pinturas de secado fisicoquímico

Son pinturas convencionales en las que su secado y endurecimiento sucede por un doble proceso (físico y químico). Debido a este doble proceso, el secado inicial es rápido; mientras que la resistencia final al desgaste lleva mucho más tiempo (días o semanas), pero al final es más



dura que en las pinturas acrílicas. Dentro de este tipo podemos nombrar a las resinas alquídicas y las emulsiones autorreticulables de secado rápido. En las pinturas alquídicas el polímero se produce por la reacción química de un poliácido y un polialcohol, modificado por un aceite no amarillante. En este caso, el disolvente volátil es casi siempre tolueno, responsable del secado físico de la pintura una vez aplicada por evaporación. El endurecimiento químico se produce por la oxidación de las resinas con el  $O_2$  del aire. En cambio, en el caso de las emulsiones autorreticulables de secado rápido, el ligante está formado por monómeros acrílicos emulsionados en un medio acuoso fuertemente alcalino, en el cual, la presencia de otras sustancias provoca la formación de un polímero complejo cuando se reduce la alcalinidad por evaporación del amoníaco presente. La transformación de los monómeros en emulsión en un film polimérico se produce por una reacción que consume parte del agua en poco tiempo.

El material **termoplástico** es una mezcla compuesta por sustancias minerales de granulometría gruesa (hasta 700 micras), una resina y un plastificante, ambos en forma sólida granular o en escamas, con microesferas de vidrio premezcladas y, un aceite mineral especial que ayuda a controlar la viscosidad de aplicación y plastificar el conjunto y un pigmento que le da color. Este material carece de disolventes, el calor fluidifica el producto (se calientan a temperaturas que varían, dependiendo del producto, entre  $180^{\circ}C$  y  $220^{\circ}C$ ) y permite su aplicación. Una vez aplicado sobre el pavimento se vuelve sólido de manera inmediata, permitiendo la apertura al tránsito en poco tiempo. En general, se pueden clasificar atendiendo el método de aplicación, en materiales aplicados por pulverización (Sprayplásticos) o por extrusión.

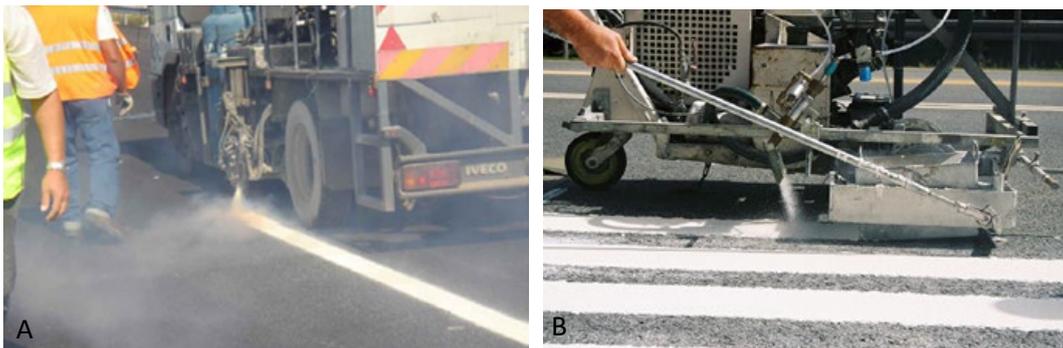


Figura 7-5 A: Máquinas de aplicación de Termoplástico por Pulverización. B: Máquinas de aplicación de Termoplástico por Extrusión

Fuente: Ministerio de Fomento

En el caso de los materiales aplicados por pulverización (Sprayplásticos), Figura 10-5 A, la masa del material es previamente calentada de  $180^{\circ}C$  a  $220^{\circ}C$  y se aplica pulverizada como pintura líquida con pistolas especiales. Al mismo tiempo se proyectan a presión las microesferas de vidrio que deben penetrar adecuadamente. Se obtiene un espesor de película que puede estar comprendido entre 1,2 mm y 1,7 mm.

Los termoplásticos aplicados por extrusión, Figura 7-5 B., se aplican sin presión, por “colada” o mediante dispositivos que colocan el material sobre el pavimento, en la forma y dimensiones deseadas una vez alcanzada la temperatura de aplicación. Ésta suele ser ligeramente menor que en el caso de la aplicación por pulverización. Se utilizan dispositivos en forma de caja que se arrastran sobre el pavimento, con una abertura en su parte posterior por donde sale el material de forma controlada, formando una línea uniforme, de geometría precisa, con un espesor de película que puede alcanzar los 3 mm y 4 mm.



Por último, los **plásticos en frío** consisten en un sistema de dos componentes. Por un lado, se tiene la pintura líquida conformado con: un vehículo no volátil con una resina acrílica (metil metacrilato) y un acelerante de la reacción química, al que se le debe agregar un agente de curado de la reacción química (generalmente peróxido de benzoilo). Ambos componentes se suministran conjuntamente, pero separados (el catalizador suele suministrarse en dosis individuales), para que la adición del catalizador a la pintura se haga en obra. El material se entrega listo para usar, solo es necesario mezclar los componentes hasta conseguir una perfecta homogeneidad y aplicar el producto antes de sobrepasar el tiempo de vida útil (variable dependiendo de la mezcla de los productos y de la temperatura), ya que endurece. Se clasifican los productos de acuerdo con el método de aplicación en plásticos en frío, de aplicación a máquina Figura 7-6 A y de aplicación manual, Figura 7-6 B.



Figura 7-6. A: Aplicación con máquina. B: Aplicación Manual de Plástico en Frío

Fuente: A: elaboración propia. B: Ministerio de Fomento

Las **microesferas de vidrio** son partículas de vidrio transparente y esféricas que, mediante la retrorreflexión de los haces de luz incidentes de los faros de un vehículo hacia su conductor, proporcionan visibilidad nocturna a las marcas viales. En este ámbito se usan dos tipos: una incorporada en la pintura (Microesferas Premezcladas) y la otra sembrada sobre la superficie (Microesferas Sembradas o Drop on).

Por la importancia de su función en la visibilidad nocturna, las normativas sobre señalización caracterizan estos materiales limitando su granulometría, el porcentaje de unidades defectuosas admisible, su índice de refracción, su resistencia a sales y otros agentes químicos. En el caso de las microesferas sembradas, se especifica además la cantidad por metro cuadrado que debe añadirse sobre la marca vial para asegurar un nivel mínimo de retrorreflexión. La granulometría elegida debe ser adecuada al espesor de la película del producto sobre el cual se aplican, ya que si son demasiado gruesas son arrancadas de la superficie rápidamente por las ruedas de los vehículos, mientras que las finas se hunden en la película, sin que tengan un efecto inmediato en la visibilidad. Las propiedades, de las que depende el grado de hundimiento de las microesferas, pueden mejorarse mediante la aplicación de tratamientos superficiales.

Existen 3 tipos de microesferas utilizadas en este ámbito detalladas a continuación:

- Intermix: son las que se incorporan a la masa termoplástica durante la fabricación de modo de permanecer internas a la película aplicada. Permiten la retrorreflexión sólo después del desgaste de la superficie, cuando las microesferas de vidrio quedan expuestas.



- Premix: son incorporadas en la pintura antes de su aplicación, de modo que permanecen internas en la película aplicada. Las mismas quedan expuestas luego del desgaste de la superficie permitiendo la retroreflexión.
- Drop On: son aplicadas por aspersión junto con la pintura o termoplástico. Por este motivo, permanecen en la superficie de la película aplicada brindando una inmediata retroreflexión de la demarcación.

### Características principales de los recubrimientos retroreflectantes

A continuación, se detallan las características principales que deben cumplir los materiales para Demarcación Vial Horizontal adaptadas a la condición en servicio:

1. Deben ser resistentes a la abrasión, considerándose la condición de pavimento seco y de pavimento húmedo debido a la lluvia.
2. Deben resistir las agresiones de la intemperie: tales como el sol (no debe degradarse con los rayos ultravioleta), la lluvia y la reacción del propio sustrato.
3. Deben presentar una buena resistencia al agua y baja absorción. La película de pintura va a estar en contacto en forma alternada a ciclos de humectación y secado. En estas condiciones no debe manifestarse pérdida de adhesión, ablandamiento o elevada retención (hinchamiento). Esta propiedad está relacionada con la cantidad de agua que resulta absorbida en los espacios intermoleculares del polímero, en todas las interfaces presentes en el sistema, poros, discontinuidades para que la película permanezca en condiciones de equilibrio.
4. Deben ser visibles de día e identificables a una distancia determinada de seguridad, tanto de día, de noche y bajo cualquier condición climática, sin comprometer las propiedades antideslizantes de la superficie.
5. Deben presentar elevada adhesión seca y húmeda de la película con el sustrato. La adhesión de la película resulta sensiblemente menor en condiciones húmedas ya que el agua en la interfaz, por su característica polar y de reducido tamaño, compite con el material polimérico. Es importante que la marca ofrezca un correcto "grip" ("agarre") sobre el pavimento donde está situada.

### Propiedades de las marcas viales aplicadas en la calzada

La demarcación horizontal debe garantizar la visibilidad necesaria para que el conductor pueda circular con seguridad por la carretera. Para que esto se cumpla, el conductor debe distinguirla de forma clara, con anticipación, para tomar la decisión correcta. Existen varios criterios para evaluar la visibilidad de la señalización vial. Schwab plantea dos criterios: por un lado, aspectos "no cuantificables" como la visibilidad y legibilidad y; por el otro, "cuantificables" como el contraste y coeficiente de luminancia retroreflejada. De estos últimos, el contraste define la visibilidad diurna o en ambientes iluminados y el coeficiente de luminancia retroreflejada (retroreflectividad) define la visibilidad en lugares sin iluminación.

La medición de la **visibilidad diurna** de una demarcación está especificada en las normas UNE EN 1436/2009 y ASTM E2302/16, que definen el coeficiente de luminancia bajo iluminación difusa, Qd. El mismo reproduce de forma adecuada las condiciones de visibilidad que un conductor tiene de las marcas viales en condiciones de iluminación diurna o alumbrado público. En la Figura 7-7 se presentan las condiciones de medida establecidas para la obtención de Qd



según la normativa europea que considera un ángulo de observación de  $2,29^\circ$  y un iluminante patrón D65, como se define en la norma ISO/CIE 10526, alumbrada la zona de medida. Estas condiciones de medición simulan una distancia del observador a 30 m para el conductor cuyos ojos se encuentran a una altura de 1,20 m por encima de la calzada.

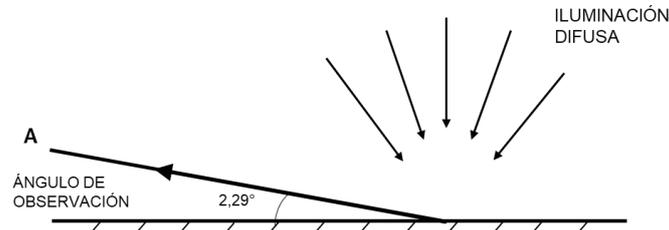


Figura 7-7. Condiciones de medida del coeficiente de luminancia bajo iluminación difusa

Fuente: Calavia (adaptación propia)

Cuando los pavimentos son de color muy claro (por ejemplo, en pavimentos de Hormigón), se recomienda hacer un rebordeo con un color que aumente el contraste con el pavimento. En la Figura 7-8 se presentan imágenes que ejemplifican lo mencionado. En ambas imágenes se observa que en las líneas de borde se ejecuta una línea interna color negro, con material acrílico, de 5 cm de ancho contigua a la línea de borde de calzada. Además, en el eje, se realiza un bastón color negro de 300 cm de longitud y del mismo ancho que el bastón blanco, antes de cada bastón blanco considerando el sentido del tránsito.



Figura 7-8. Ejemplos de Contraste en pavimentos de hormigón

Fuente: Manual de Señalamiento Horizontal DNV, 2012

La **visibilidad nocturna** tiene lugar cuando la iluminación de la marca vial se realiza desde los faros del vehículo. Schwab (1999) explica que la reflexión es un fenómeno natural de la luz y los objetos iluminados, y ocurre cuando un cuerpo o material refleja parte de la luz emitida por una fuente. Los distintos tipos de reflexión se presentan en la Figura 7-9, y se definen a continuación:

- **Reflexión difusa:** la reflexión difusa ocurre cuando la luz del faro incide sobre una superficie rugosa y los rayos de luz se reflejan en varias direcciones. En general, la señalización sin la adición de microesferas provoca este fenómeno. En este tipo de reflexión, escasa parte de la luz regresa a la fuente emisora.
- **Reflexión especular:** la reflexión especular ocurre cuando la luz incide sobre la superficie y se refleja en la dirección opuesta (el haz reflejado predominante tiene el mismo ángulo de reflexión que el haz incidente, respecto a la normal), y no hacia el conductor. Este tipo de



fenómeno se puede observar fácilmente cuando una película de agua cubre las señales de tránsito en el pavimento y la luz del faro brilla, provocando un efecto de espejo (especular).

- **Retroreflexión:** La retroreflexión se produce cuando la luz de los faros del vehículo incide sobre las marcas viales en el pavimento y se redirige a su fuente, haciendo que este material sea visible por la noche.

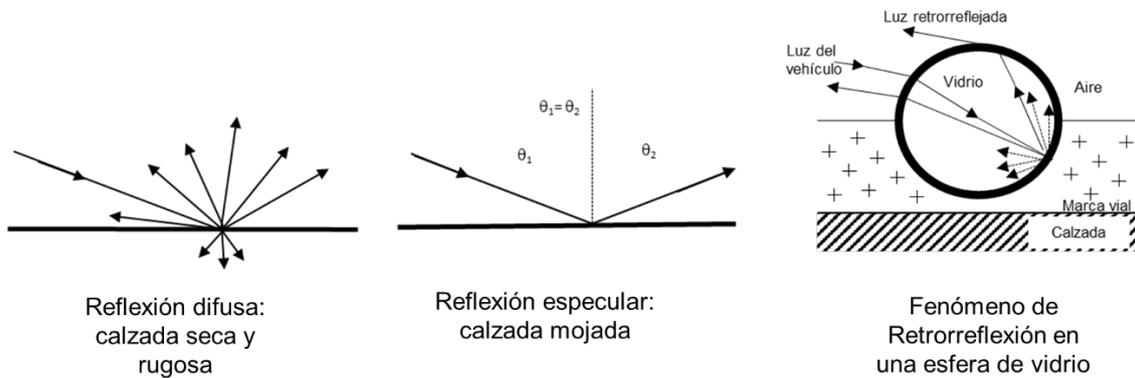


Figura 7-9. Fenómeno de retroreflexión en una microesfera de vidrio  
Fuente: Calavia (adaptación propia)

En consecuencia, el fenómeno de retroreflexión sugiere niveles de seguridad vial mayores que otros fenómenos que no lo contemplen. Por ello, el nivel de visibilidad se mide a través de la retroreflexión ofrecida por el sistema de demarcación vial utilizado. La retroreflexión se garantiza con el uso de las microesferas de vidrio que se añaden durante el proceso de pintado y permiten este fenómeno debido a que la luz procedente de los faros de un vehículo se refracta por la microesfera y gran parte del haz se refleja por la superficie hundida de la esfera, y retorna en la misma dirección de incidencia, Figura 7-10.

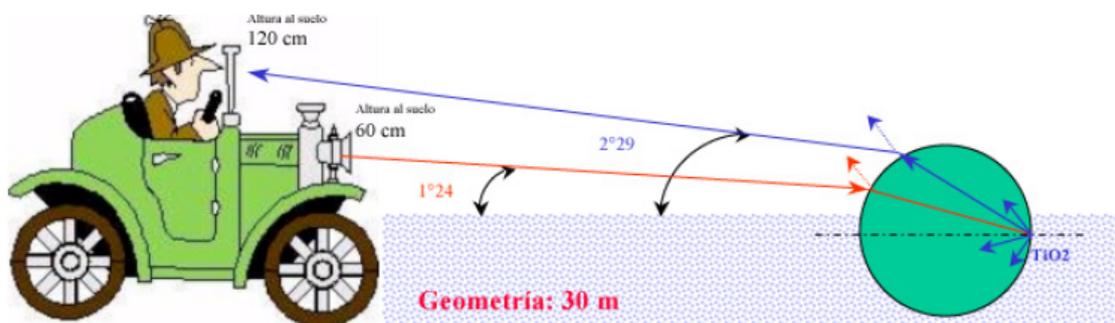


Figura 7-10. Fenómeno de retroreflexión y geometría de medida  
Fuente: Ministerio de fomento

Según la posición del elemento reflector, se encuentre situado a 15 o 30 metros, los ángulos de observación generados determinan la geometría del equipo "de 15 metros" o "de 30 metros". En diversas normativas se referencia la retroreflexión a 30 metros, entre ellas podemos nombrar la norma ASTM E 1710/18 y la norma UNE EN 1436/09 que, si bien no lo explicita como retroreflexión a 30 m, establece los ángulos correspondientes a dicha geometría. La Figura 7-11 presenta la configuración de ángulos correspondiente a la geometría a 15 metros y la Figura 7-12 muestra la configuración de la geometría a 30 metros.





Figura 7-3. Geometría a 15 metros según CIE  
Fuente: Moreira y Menegon, 2003 (adaptación propia)



Figura 7-4. Geometría a 30 metros según CIE  
Fuente: Moreira y Menegon, 2003 (adaptación propia)

Para la medición de la retrorreflexión se utilizan equipos conocidos como retrorreflectómetros. Estos dispositivos emiten luz sobre la demarcación del pavimento con un cierto ángulo de incidencia y capturan la cantidad de esta luz que retorna en una cámara cerrada, midiendo el coeficiente de luminancia retrorreflejada (RL). Los equipos también se diferencian por su geometría de medida ("a 15 m" o "a 30 m") y pueden ser portátiles como presenta la Figura 7-13 A o dinámicos de acuerdo con la Figura 7-13 B. El equipo portátil tiene la facilidad de transporte, almacenamiento de datos y lecturas rápidas. Algunas marcas proporcionan equipos con tecnología LED en su sistema óptico, lo que hace que el equipo sea más seguro para el mantenimiento, sin embargo, se debe tener cuidado en cuanto a la ubicación de recolección y seguridad del operador mientras utiliza el equipo en la vía. Los equipos dinámicos, son retrorreflectómetros que se acoplan a vehículos, con un sistema de localización, adquisición de datos y emisión que permite la generación de una superficie luminosa y un sistema de recepción de flujo luminoso.

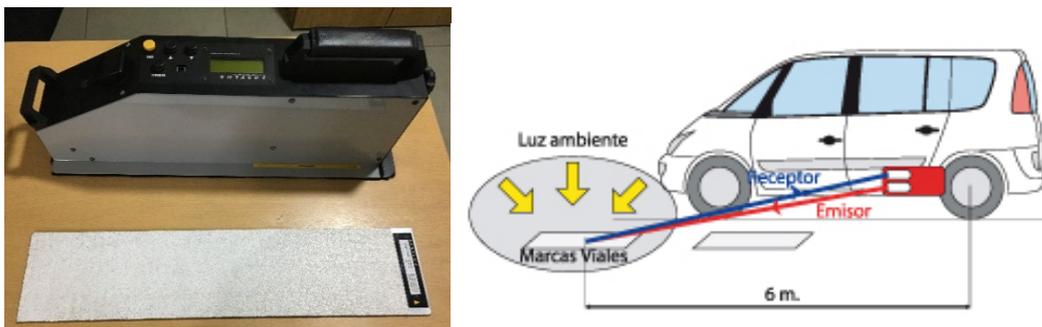


Figura 7-5 A. Retrorreflectómetro portátil, B. Retrorreflectómetro dinámico  
Fuente: A elaboración propia. B <http://www.euroconsultnt.es>

La **resistencia al deslizamiento** es la propiedad de una superficie circulada de mantener la adherencia de un neumático. Las marcas viales se aplican sobre la superficie del pavimento y modifican las propiedades superficiales del mismo. Esta variación es tanto mayor cuanto más gruesa sea la capa de pintura que cubre el pavimento, pues ello hace que no se transmita a la superficie de la marca vial la textura del pavimento, por tanto, a más dosificación (o mayor



número de capas) menor transmisión de textura. La medición de puntos se realiza utilizando el equipo portátil denominado Péndulo Inglés TRRL, Figura 7-15.



Figura 7-6. Péndulo Inglés TRRL del LEMaC

Fuente: elaboración propia

## Factores que afectan a los materiales de señalización vial

La integridad de la demarcación puede sufrir al menos tres **mecanismos de falla** diferentes: pérdida de material por desgaste abrasivo, falla de cohesión en la capa de pintura (dentro de la capa de pintura) y falla de adhesión entre la pintura y la superficie (interfase).

Como mecanismos que contribuyen a la falla del material, ya sea por falta de cohesión en la capa de pintura, o por adherencia con el sustrato se mencionan los ciclos de temperatura y humedad, el ataque químico de sales y ácidos, daños causados por radiación de la luz, ataque de solventes tales como gas oil, aceites, etc.

Con tantos mecanismos de falla posibles, es de esperar que exista una amplia variación en el rendimiento de varios tipos de material. También es la razón por la que las pruebas de abrasión no han tenido un éxito completo en la predicción de la vida útil de las marcas pintadas. Los factores que influyen en la degradación de la pintura se presentan en la Figura 7-15.

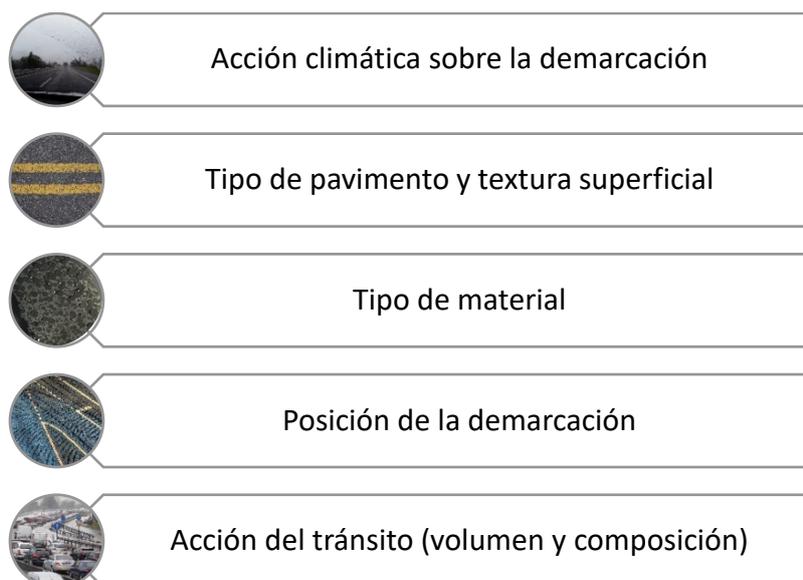


Figura 7-7. Factores que afectan a los elementos de señalización horizontal

Fuente: elaboración propia



## Desempeño de los materiales viales

Cualquier marca en el pavimento se deteriora gradualmente con el tiempo y la exposición al tránsito y al clima. De acuerdo con el Manual de delineación de carreteras de la FHWA (Federal Highway Administration) de Estados Unidos, la vida útil de las marcas viales se define como "el tiempo necesario para que una marca vial se vuelva ineficaz debido a la pérdida de su brillo, su retrorreflexión o se ha desgastado completamente del pavimento". En consecuencia, existen varias medidas que podrían usarse para definir la vida útil de la señalización vial, por ejemplo, presencia de material (es decir, durabilidad), cambio de color y visibilidad. En teoría, cualquier factor que modifique estas tres propiedades podría influir directamente en la vida útil las marcas viales.

### Degradación de la retrorreflexión

Existen modelos estadísticos con la finalidad de pronosticar la degradación de la retrorreflexividad de las marcas de pavimento. Este análisis se agrupa en categorías teniendo en cuenta la superficie de la marca, el color (blanco y amarillo) y el material base (termoplásticos y pinturas epoxi). En la Figura 7-16 se presentan tres patrones básicos de disminución o degradación de la retrorreflexión a lo largo del tiempo.

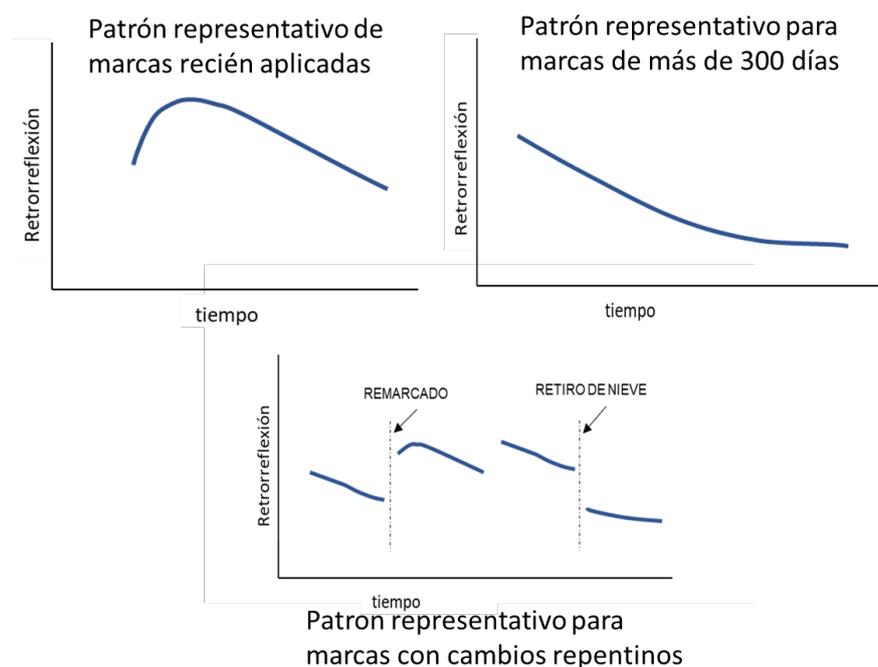


Figura 7-16. Patrones representativos de degradación de la retrorreflexión

Fuente: elaboración propia

### Tecnologías en el ámbito de la evaluación de las marcas viales

En algunos países, para evaluar el comportamiento de las marcas viales se utiliza el "ensayo de referencia" sin norma de aplicación. El ensayo consiste básicamente en aplicar el material en un tramo de ruta y observar su evolución en el tiempo siendo muy utilizado en la Argentina para analizar el comportamiento de los distintos materiales existentes.



Otro método para la evaluación del desempeño de los materiales de señalización horizontal es el **Ensayo de Campo o prueba de campo** que consiste en realizar las marcas viales de una manera determinada a lo largo de un tramo de ruta con los materiales a evaluar y así, estudiar el comportamiento en el tiempo. La norma ASTM D713 y la norma UNE EN 1824 proporcionan especificaciones para realizar pruebas de campo de las marcas viales en la carretera. En Estados Unidos, el NTPEP (National Transportation Product Evaluation Program) realiza secciones de prueba de campo utilizando la norma ASTM. Los tramos de prueba se encuentran ubicados en todo el país y los datos se agrupan para ser utilizados por cualquier agencia de transporte. En la Figura 7-17, se muestra una imagen de un campo de ensayo.



Figura 7-17. Campo de ensayo.

Fuente: Fors, 2015 "Nordic certification system for road marking materials"

En Europa, a partir del año 2011, bajo la Norma EN 13197 se utilizan los **simuladores de desgaste**. Dicho equipo está conformado por una mesa giratoria (parte móvil), de aproximadamente 6 metros de diámetro externo. Está compuesta por 4 ruedas neumáticas que permiten aplicar una carga. Las probetas son colocadas sobre un mecanismo plano sobre la mesa, la cual realiza un movimiento relativo que permite que las ruedas pasen repetidamente sobre las probetas. En este ensayo se utilizan ruedas comerciales. La Figura 10-18 presenta la vista general y el detalle de la rueda del Simulador de Desgaste "mesa giratoria" disponible en España.



Figura 7-18. Simulador de desgaste "Mesa giratoria"

Fuente: <https://www.aetec.es/>

Otro aspecto para considerar es la resistencia a la abrasión de las pinturas. En la Norma IRAM 1221/18, se estima el comportamiento de la película seca mediante la caída de un abrasivo. En



Europa, existen normas específicas donde se plantean dos ensayos de abrasión según la naturaleza del material a ensayar y si contienen microesferas de vidrio premezcladas, teniendo la opción de optar por el **método de caída de un abrasivo** (UNE 135203-2/10) o por el **método Taber** (UNE 135203-1/10).

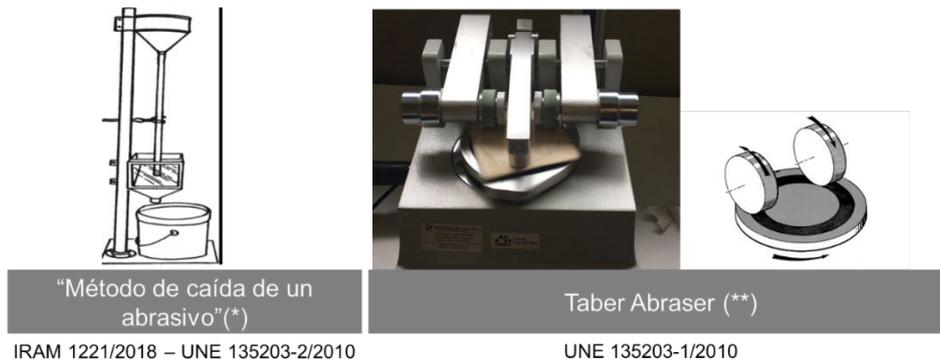


Figura 7-19. Métodos para la evaluación de la abrasión

Fuente: (\*) Slawson. (\*\*) COVES GARCÍA, J. A.,

## Comentarios sobre los ensayos normalizados

En la Figura 7-20 se presenta una breve reseña para comparar las características de los ensayos.

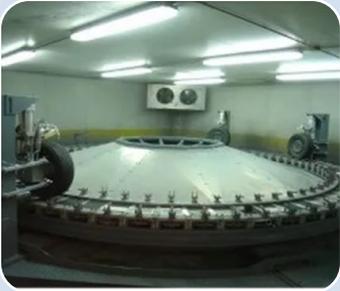
| SIMULADORES DE DESGASTE  | PRUEBAS DE CAMPO   | DISPOSITIVOS DE ABRASIÓN  |
|--|--|---|
|   |   |    |
| <p>Proporcionan la ventaja de obtener una preclasificación de las marcas viales durante un período de tiempo relativamente corto (inferior a las pruebas de campo).</p> <p>Son dispositivos de gran escala que se encuentran en contados sitios a nivel mundial y requieren una gran inversión para su construcción.</p> | <p>Son muy utilizados en EEUU mediante el uso de plataformas de prueba NTPEP, cuyo procedimiento se encuentra descrito por AASHTO y tienen en cuenta la variedad de condiciones climáticas en diferentes regiones geográficas de los Estados Unidos. Tienen la principal desventaja que dependen del lugar donde se aplique.</p> | <p>No tienen en cuenta las condiciones específicas de servicio a las que se encuentran sometidos los materiales de demarcación horizontal. Se informa de varios trabajos que indican que algunos ensayos de abrasión no tienen correlación con lo observado en la práctica.</p> |

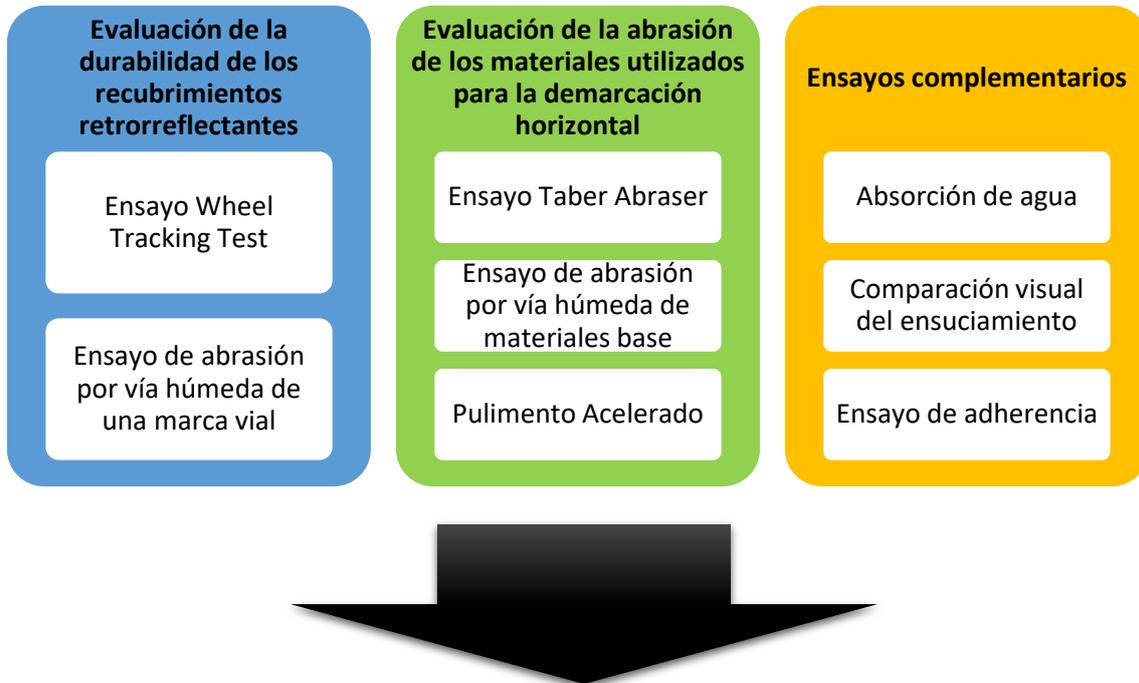
Figura 7-20. Comparación de ensayos normalizados

Fuente: elaboración propia



## Implementación de ensayos

En la tesis doctoral “Nuevas tecnologías en recubrimientos retrorreflectantes para demarcación vial” se profundizan estos temas y se estudia la implementación de ensayos utilizados en el ámbito vial para simular el desgaste producido en servicio de las pinturas acrílicas comerciales con la finalidad de obtener una valoración de su desempeño. En la Figura 7-21 se presentan los ensayos implementados en la tesis mencionada.



*Sobre muestras de pinturas denominadas S1, A1, A2 y A3*

*Figura 7-21. Ensayos implementados en la tesis doctoral*

*Fuente: elaboración propia*



## Bibliografía

ASTM (2016). "ASTM E2302: Standard Test Method for Measurement of the Luminance Coefficient Under Diffuse Illumination of Pavement Marking Materials Using a Portable Reflectometer".

Babić, D., Burghardt, T. E., & Babić, D. (2015). Application and characteristics of waterborne road marking paint. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 5(2), 150-169.

Calavia, D. (1995). "Demarcación horizontal – Seguridad vial – La visibilidad de las marcas viales – Aspectos fotométricos – Retrorreflexión", *Revista Carreteras*, Argentina, n 145, pp. 47 a 55, .

Calavia, D. (2013) "Progreso en señalización horizontal y seguridad viaria", *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, (190), 27-40.

García, J. A. C. (2016). Análisis de la visibilidad y la resistencia al deslizamiento de las marcas viales retrorreflectantes en carretera convencional (Doctoral dissertation, Universitat d'Alacant/Universidad de Alicante).

Cristacol (2016). Señalamiento horizontal. Marcación de áreas.

Cruz Alcalde, A. (2014). Optimización de pinturas decorativas base agua mediante aditivos dispersantes y espesantes.

García, D. (2011). "Demarcación Vial". Disponible en: <https://cupdf.com/document/principios-de-senalizacion-y-demarcacion-vial-definicion-las-demarcaciones.html>, 2011.

Migletz, J., Fish, J. K., & Graham, J. L. (1994). *Roadway delineation practices handbook* (No. FHWA-SA-93-001). United States. Federal Highway Administration.

Ministerio de Fomento (2012). "Guía para el proyecto y ejecución de obras de señalización horizontal", Editorial Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento (ISBN 978-84-498-0926-2), España.

Ministerio de justicia y derechos humanos. Presidencia de la Nación. (s.f.). Anexo al artículo 22. Anexo L. Sistema de señalización vial uniforme. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/30000-34999/30389/dto779-1995-anexoL.htm>.

Ministerio de justicia y derechos humanos. Presidencia de la Nación. (s.f.). Tránsito y seguridad vial. Decreto Nacional N°779/95. Decreto reglamentario de la ley de tránsito y seguridad vial. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/30000-34999/30389/norma.htm>.

Moreira H. & Menegon R. (2003). "Sinalização Horizontal", São Paulo: Master Set Gráfica, 2003.

Schwab, M. (1999). "Estudo do desempenho dos materiais de demarcação viária retrorrefletivos".

Slawson D. K. (2012). "Abrasion Resistance," in *Paint and Coating Testing Manual: 15th. Edition of the Gardner-Sward Handbook*, ed. J. Koleske (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012), 615-623. <https://doi.org/10.1520/MNL12228M>.

UNE (2009). "Norma UNE EN 1436: Materiales para señalización vial horizontal. Comportamiento de las marcas viales aplicadas sobre la calzada".

UNE (2012). "Norma UNE-EN 1824: Materiales para señalización vial horizontal. Pruebas de campo".



UNE (2012). “Norma UNE-EN 13197: “Materiales para señalización vial horizontal. Simulador de desgaste. Mesa giratoria”.

UNE (2010). “Norma UNE 135203-1: Equipamiento para la señalización vial. Señalización horizontal. Materiales. Ensayos de abrasión en laboratorio. Parte 1: Determinación de la resistencia a la abrasión mediante el método Taber”.

UNE (2010). “Norma UNE 135203-2: Equipamiento para la señalización vial. Señalización horizontal. Materiales. Ensayos de abrasión en laboratorio. Parte 2: Determinación de la resistencia a la abrasión mediante el método de caída de un abrasivo”.



# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>PRÓLOGO</b>   | <b>1</b>  |
| <b>DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS</b>  | <b>3</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>  | <b>3</b>  |
| <b>MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICOS</b>   | <b>4</b>  |
| MÉTODO CBR (1929)  | 4         |
| MARYLAND ROAD TEST (1950)  | 5         |
| WASHO ROAD TEST (1953-1954)  | 5         |
| AASHO ROAD TEST (1958-1960)  | 6         |
| OBJETIVOS DE LA AASHO ROAD TEST  | 6         |
| MATERIALES DE LA AASHO ROAD TEST   | 7         |
| GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 93   | 7         |
| COEFICIENTE DE APORTE ESTRUCTURAL  | 11        |
| SOFTWARE DE IMPLEMENTACIÓN Y LIMITACIONES DE AASHTO 93   | 12        |
| <b>MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO – MECANICISTA</b>  | <b>13</b> |
| <b>FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS – ASFALTO ALTAMENTE MODIFICADO</b>   | <b>16</b> |
| LA EVALUACIÓN DE LA FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICA EN LABORATORIO   | 17        |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>19</b> |
| <b>ASFALTO MODIFICADO CON POLVO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO</b>   | <b>20</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN - APLICACIÓN DE ASFALTO MODIFICADO CON NFU EN UNA MEZCLA CAC D20</b>                               | <b>20</b> |
| <b>LA MICRODISPERSIÓN POR VÍA HÚMEDA</b>   | <b>21</b> |
| MEZCLA DENSA CAC D19   | 22        |
| MICROAGLOMERADOS DISCONTINUOS EN CALIENTE  | 23        |
| <b>ASFALTOS ALTAMENTE MODIFICADOS CON POLVO DE NFU EN MEZCLAS ASFÁLTICAS RETARDANTES DE LA FISURACIÓN REFLEJA.</b> | <b>25</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b>  | <b>29</b> |
| <b>PRODUCCIÓN DE AGREGADOS PARA USO VIAL</b>   | <b>31</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN - DEFINICIÓN DE ÁRIDO</b>  | <b>31</b> |
| <b>CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS</b>  | <b>32</b> |
| <b>IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS AGREGADOS PÉTREOS</b>  | <b>32</b> |
| <b>PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS</b>   | <b>32</b> |
| VOLADURA   | 33        |



|   |           |
|---|-----------|
| TRANSPORTE  | 34        |
| TRITURACIÓN   | 34        |
| ALIMENTADORES   | 34        |
| SEPARACIÓN POR GRANULOMETRÍAS:  | 35        |
| TRANSPORTE DE MATERIAL ENTRE ETAPAS:                                  | 35        |
| ACOPIOS:  | 35        |
| <b>PROCESO DE TRITURACIÓN</b>   | <b>36</b> |
| LAS ETAPAS DE TRITURACIÓN   | 36        |
| ÍNDICE DE ABRASIÓN  | 37        |
| <b>TIPOS DE TRITURADORAS</b>  | <b>38</b> |
| TRITURACIÓN MÓVIL   | 39        |
| RENDIMIENTO DE LA TRITURADORA   | 40        |
| <b>INFLUENCIA DEL PROCESO DE TRITURACIÓN EN LA CALIDAD DEL ÁRIDO.</b> | <b>40</b> |
| <b>ESTADO DE AVANCE</b>   | <b>40</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | <b>44</b> |
| <br>  |           |
| <b>NANOMODIFICACIÓN DE ASFALTO</b>                                    | <b>45</b> |
| <br>  |           |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>   | <b>45</b> |
| <b>NANOMATERIALES</b>   | <b>45</b> |
| <b>COMPOSITOS</b>   | <b>46</b> |
| <b>OBTENCIÓN DE ASFALTO NANOMODIFICADO</b>                            | <b>47</b> |
| EJEMPLOS DE NANOPARTÍCULAS Y SU EFECTO EN ASFALTOS                    | 47        |
| NANOARCILLAS  | 49        |
| MICROESTRUCTURA DEL ASFALTO MODIFICADO                                | 51        |
| <b>EFFECTOS DE LA MODIFICACIÓN DE ASFALTO CON NANOARCILLAS</b>        | <b>53</b> |
| EFFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS                               | 53        |
| EFFECTO SOBRE LA ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO                        | 55        |
| EFFECTO SOBRE LA RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO                        | 56        |
| <b>CONCLUSIONES</b>   | <b>59</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | <b>60</b> |
| <br>  |           |
| <b>RIEGOS ASFÁLTICOS</b>  | <b>61</b> |
| <br>  |           |
| <b>INTRODUCCIÓN - IMPORTANCIA DE LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS</b>        | <b>61</b> |
| <b>TIPOS DE FALLAS POR FALTA DE ADHERENCIA:</b>                       | <b>62</b> |
| “SHOLVING” O CORRIMIENTOS   | 62        |
| MEDIA LUNA O ARCO   | 62        |
| CORRUGACIÓN   | 62        |
| <b>MATERIALES PARA RIEGOS DE LIGA</b>                                 | <b>63</b> |
| ASFALTOS DILUIDOS O CUTBACKS  | 63        |
| <b>EMULSIONES ASFÁLTICAS</b>  | <b>64</b> |
| EMULSIONES DIRECTAS   | 64        |
| MULSIONES INVERSAS  | 64        |
| • EMULSIONABILIDAD DEL BETÚN  | 64        |
| • ENERGÍA   | 64        |
| • TEMPERATURA   | 65        |



|   |                  |
|---|------------------|
| • EMULGENTES  | 65               |
| • LAS EMULSIONES ANIÓNICAS:   | 65               |
| • LAS EMULSIONES CATIONICAS   | 65               |
| <b>TIPOS DE PRODUCCIÓN</b>  | <b>66</b>        |
| PRODUCCIÓN CONTINUA   | 66               |
| PRODUCCIÓN DISCONTINUA O "BATCH"  | 67               |
| <b>ENSAYOS QUE SE REALIZAN A LAS EMULSIONES</b>   | <b>67</b>        |
| CLASIFICACIÓN DE CARGA  | 67               |
| ASENTAMIENTO  | 68               |
| VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL  | 69               |
| RESIDUO DE LA DESTILACIÓN   | 69               |
| DETERMINACIÓN DEL RESIDUO SOBRE TAMIZ $\mu\text{M}$ 850   | 70               |
| <b>MECANISMO DE ROTURA DE UNA EMULSIÓN</b>  | <b>70</b>        |
| <b>DOTACIÓN DEL RIEGO DE LIGA</b>   | <b>72</b>        |
| <b>FACTORES QUE INCIDEN EN LA CALIDAD</b>   | <b>73</b>        |
| CALIDAD DEL EQUIPO DE COLOCACIÓN  | 73               |
| CORRECTO FUNCIONAMIENTO DE LOS PICOS ROCIADORES   | 73               |
| TEMPERATURA Y PRESIÓN DE COLOCACIÓN DEL LIGANTE   | 73               |
| LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE   | 73               |
| ARRASTRE DE LIGA  | 74               |
| ENSAYO PARA EVALUAR LA CALIDAD PR EN 12697-48:  | 75               |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | <b>76</b>        |
| <br>  |                  |
| <b><u>RECICLADO EN CALIENTE DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA PARA USO VIAL</u></b>                | <b><u>77</u></b> |
| <br>  |                  |
| <b>INTRODUCCIÓN - DEFINICIÓN DE RAP</b>   | <b>77</b>        |
| <b>TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DEL RAP</b>  | <b>77</b>        |
| FRACCIONAMIENTO Y ACOPIO DEL RAP  | 79               |
| <b>¿CUÁNDO RECICLAR?</b>  | <b>79</b>        |
| ANALIZAR EL ESTADO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE   | 79               |
| <b>ECONOMÍA CIRCULAR</b>  | <b>82</b>        |
| <b>TIPOLOGÍAS DE RECICLADO EN CALIENTE</b>  | <b>84</b>        |
| IN SITU/IN PLACE  | 84               |
| EN PLANTA/OFF SITE  | 85               |
| <b>REQUISITOS A CUMPLIR PARA EL RAP SEGÚN CPA-2015</b>  | <b>86</b>        |
| <b>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL EMPLEO DE RAP</b>   | <b>86</b>        |
| <b>INNOVACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS</b>   | <b>86</b>        |
| <b>ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS RAP DERIVADO DE MEZCLAS CON ASFALTOS MODIFICADOS EN LA</b> |                  |
| <b>PRODUCCIÓN DE MEZCLAS EN CALIENTE PARA CARRETERAS</b>  | <b>87</b>        |
| OBJETIVOS:  | 88               |
| ESTADO DE AVANCE:   | 88               |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | <b>91</b>        |
| <br>  |                  |
| <b><u>DEMARCACIÓN HORIZONTAL</u></b>  | <b><u>92</u></b> |
| <br>  |                  |
| <b>INTRODUCCIÓN - IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA DEMARCACIÓN HORIZONTAL</b>                      | <b>92</b>        |
| <b>RECUBRIMIENTOS RETRORREFLECTANTES</b>  | <b>93</b>        |



|   |            |
|---|------------|
| PINTURAS DE SECADO FÍSICO   | 94         |
| PINTURAS DE SECADO FISICOQUÍMICO                                      | 94         |
| <b>PROPIEDADES DE LAS MARCAS VIALES APLICADAS EN LA CALZADA</b>       | <b>97</b>  |
| <b>FACTORES QUE AFECTAN A LOS MATERIALES DE SEÑALIZACIÓN VIAL</b>     | <b>101</b> |
| <b>DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES VIALES</b>                             | <b>102</b> |
| DEGRADACIÓN DE LA RETRORREFLEXIÓN                                     | 102        |
| <b>TECNOLOGÍAS EN EL ÁMBITO DE LA EVALUACIÓN DE LAS MARCAS VIALES</b> | <b>102</b> |
| <b>COMENTARIOS SOBRE LOS ENSAYOS NORMALIZADOS</b>                     | <b>104</b> |
| <b>IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS</b>                                      | <b>105</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | <b>106</b> |
| <br>  |            |
| <b>ÍNDICE</b>   | <b>108</b> |
| <hr/>   |            |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>  | <b>112</b> |



# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1-1. ESTRUCTURA DE UN EDIFICIO .....   | 3  |
| FIGURA 1-2. ENSAYO VALOR SOPORTE RELATIVO (VSR) .....   | 5  |
| FIGURA 1-3. AASHO ROAD TEST.....  | 6  |
| FIGURA 1-4. TRÁNSITO PESADO CONSIDERADO EN LOS MÉTODOS DE DISEÑO.....   | 7  |
| FIGURA 1-5. ESTADO DEL PAVIMENTO MUY BUENO (IZQ.) Y MUY MALO (DER.).....  | 8  |
| FIGURA 1-6. ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD. ....   | 8  |
| FIGURA 1-7. CONFIABILIDAD DE DISEÑO. ....   | 8  |
| FIGURA 1-8. DISTRIBUCIÓN NORMAL DE LOS DATOS DE ENTRADA. ....   | 9  |
| FIGURA 1-9. ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE (IZQ.) Y RESULTADO OBTENIDO (DER.).....   | 9  |
| FIGURA 1-10. CORRELACIONES ENTRE ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE Y CBR.....  | 10 |
| FIGURA 1-11. ECUACIÓN DE REGRESIÓN PROPUESTA POR LA GUÍA AASHTO 93.....   | 10 |
| FIGURA 1-12. ESQUEMA DEL NÚMERO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO .....   | 11 |
| FIGURA 1-13. COEFICIENTE DE DRENAJE EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD Y EL NIVEL DE SATURACIÓN .....                                       | 11 |
| FIGURA 1-14. COEFICIENTE DE APORTE ESTRUCTURAL DE BASE Y SUBBASE .....  | 11 |
| FIGURA 1-15. ABACO Y PROGRAMA DE DISEÑO EN BASE A LA GUÍA AASHTO 93 .....   | 12 |
| FIGURA 1-16. SISTEMA SIMPLIFICADO DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO Y LAS DEFORMACIONES EN LAS DISTINTAS DIRECCIONES.....                | 13 |
| FIGURA 1-17. MODULO RESILIENTE DE SUELOS Y SU CORRESPONDIENTE ECUACIÓN DE CORRELACIÓN.....  | 14 |
| FIGURA 1.18- EXTRACTO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.....                                    | 15 |
| FIGURA 1-19. SISTEMA SIMPLIFICADO DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO Y LAS DEFORMACIONES EN LAS DISTINTAS DIRECCIONES.....                | 16 |
| FIGURA 1-20. DISPERSOR DE ALTAS REVOLUCIONES PARA CONFORMAR EL ASFALTO CAUCHO. ....   | 17 |
| FIGURA 1-21. ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR TRACCIÓN INDIRECTA.....  | 17 |
| FIGURA 1-22. ENSAYO DE VIGA DE FATIGA DE CUATRO PUNTOS.....   | 18 |
| FIGURA 2-1. AHUELLAMIENTO .....   | 21 |
| FIGURA 2-2. EQUIPO DISPERSOR .....  | 22 |
| FIGURA 2-3. EQUIPO MEDICIÓN DE AHUELLAMIENTO .....  | 22 |
| FIGURA 2-4. PROBETAS ENSAYADAS A AHUELLAMIENTO.....   | 22 |
| FIGURA 2-5. MUESTRAS DE 30 X 30 DE MAC F10 CON ASFALTOS CON NFU Y SBS .....   | 23 |
| FIGURA 2-6. PROCEDIMIENTO DE CARGA CON EL WTT EN LAS PROBETAS - 3 PASADAS UNA AL LADO DE LA OTRA. ....                            | 23 |
| FIGURA 2-7. MEDICIÓN DE LA MACROTEXTURA CON EL PARCHE DE ARENA .....  | 24 |
| FIGURA 2-8. MEDICIÓN DE LA MICROTEXTURA CON PÉNDULO TRRL .....  | 24 |
| FIGURA 2-9. FISURACIÓN POR REFLEJO DE FISURAS.....  | 25 |
| FIGURA 2-10. EQUIPO POR CARGAS REPETIDAS IMPLEMENTADO .....   | 27 |
| FIGURA 2-11. ESQUEMA DE PROBETAS ENSAYAS.....   | 27 |
| FIGURA 2-12. APOYOS Y APLICACIÓN DE LA CARGA EN VIGA.....   | 28 |
| FIGURA 3-1. A LA DERECHA SE OBSERVA LA EXPLOTACIÓN EN EL CAUCE DE UN RÍO, MIENTRAS QUE A LA IZQUIERDA SE OBSERVA UNA CANTERA..... | 33 |
| FIGURA 3.2- ESQUEMA DEL PROCESAMIENTO DE AGREGADOS EN CANTERA. ....   | 33 |



|  |    |
|--|----|
| FIGURA 3-3. A LA DERECHA SE OBSERVA UN MARTILLO NEUMÁTICO, MIENTRAS QUE A LA IZQUIERDA SE OBSERVA CAMIÓN PERFORADOR. ....  | 34 |
| FIGURA 3-4. A LA DERECHA SE OBSERVA LA PLANTA DE TRITURACIÓN Y CINTAS TRANSPORTADORAS. A LA IZQUIERDA SE OBSERVA UNA PALA MECÁNICA CARGANDO UN CAMIÓN VOLCADOR PARA EL TRANSPORTE DEL MATERIAL HASTA LA PLANTA DE TRITURACIÓN. ....  | 34 |
| FIGURA 3-5. A LA DERECHA SE OBSERVA UN ALIMENTADOR. A LA IZQUIERDA SE OBSERVA UNA ZARANDA. ....  | 35 |
| FIGURA 3-6. SE OBSERVA ACOPIOS DE MATERIAL Y UNA GRÚA CARGANDO UN CAMIÓN PARA SU DESPACHO. ....  | 36 |
| FIGURA 3-7. EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA TASA DE REDUCCIÓN. ....   | 37 |
| FIGURA 3-8. TIPOS DE TRITURADORAS Y SUS PRESTACIONES. ....   | 37 |
| FIGURA 3-9. MECANISMOS DE REDUCCIÓN DE TAMAÑO PRIORITARIOS EN DISTINTOS EQUIPOS DE TRITURACIÓN. ....   | 37 |
| FIGURA 3-10. SELECCIÓN DE TRITURADORA DEPENDIENDO DE SU CAPACIDAD Y EL ÍNDICE DE ABRASIÓN DE LA ROCA. ....   | 38 |
| FIGURA 3-11. TIPOS DE TRITURADORA. ....  | 39 |
| FIGURA 3-12. COMPARACIÓN DE COSTOS DE DISTINTOS SISTEMAS DE TRITURACIÓN. ....  | 40 |
| FIGURA 3-13. ASPECTOS A CONSIDERAR PARA REALIZAR UN CONTROL DE CALIDAD ADECUADO. ....  | 41 |
| FIGURA 3-14. VARIABLES DEL PROCESO ANALIZADAS. ....  | 42 |
| FIGURA 3-15. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL CONTROL DE CALIDAD EN CANTERA. ....  | 42 |
| FIGURA 3-16. DASHBOARD Y FORMULARIO DE CARGA DE INFORMACIÓN EN BASE DE DATOS. ....   | 43 |
| FIGURA 3-17. ENSAYOS REALIZADOS A LAS MUESTRAS DE AGREGADOS PÉTREOS. ....  | 43 |
| FIGURA 4-1. DISTINTOS RANGOS DE DIMENSIONES Y SUS EJEMPLOS. ....   | 46 |
| FIGURA 4-2. DISPERSOR DE ASFALTO TIPO ROTOR-ESTATOR. ....  | 47 |
| FIGURA 4-2. IZQ: CACO <sub>3</sub> (FILLER), FRACCIÓN MENOR A 63 μm. DER: NANOSILICA. DISPERSOR DE ASFALTO TIPO ROTOR-ESTATOR. ....  | 48 |
| FIGURA 4-4. EXTRAÍDO DE: MOREA, F., PIQUÉ, T. M. (2020). EVALUACIÓN DE UN ASFALTO COMERCIAL CON LA ADICIÓN DE NANOSILICA Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA. 29° REUNIÓN DEL ASFALTO, COMISIÓN PERMANENTE DEL ASFALTO, NOVIEMBRE 2020. ....  | 48 |
| FIGURA 4-5. IZQ: INCREMENTO DEL PUNTO DE ABLANDAMIENTO TRAS ENVEJECIMIENTO UV DE ASFALTOS MODIFICADOS CON DIFERENTES NANOPARTÍCULAS. DER: ESPECTRO DE ABSORBANCIA UV-VIS DE TRES TIPOS DE NANOPARTÍCULAS UTILIZADAS PARA MODIFICACIÓN DE ASFALTO. ....   | 49 |
| FIGURA 4-6. ESTRUCTURA CRISTALINA DE LA MONTMORILLONITA NATURAL. ....  | 50 |
| FIGURA 4-7. ESTRUCTURA MOLECULAR DE UN SURFACTANTE CATIONICO TÍPICO (BROMURO DE CETILTRIMETILAMONIO). ....   | 50 |
| FIGURA 4-8. ESTRUCTURA SIMPLIFICADA DE UNA NANOARCILLA NATURAL (IZQ.) Y UNA NANOARCILLA ORGANOMODIFICADA (DER.). EL PROCESO DE ORGANOMODIFICACIÓN DE LA NANOARCILLA PRODUCE UN ENSANCHAMIENTO DE LOS ESPACIOS INTERCAPA, Y UN CAMBIO EN EL CARÁCTER HIDROFÍLICO/HIDROFÓBICO DEL NANOMATERIAL. .... | 51 |
| FIGURA 4-9. LOS TRES TIPOS DE MICROESTRUCTURA QUE SE PUEDEN OBTENER EN UN ASFALTO MODIFICADO CON NANOARCILLAS. ....  | 52 |
| FIGURA 4-1. VALORES MÁS COMUNES DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN. ....  | 52 |
| FIGURA 4.10. EFECTO DEL INCREMENTO DEL CONTENIDO DE DIFERENTES TIPOS DE NANOARCILLAS SOBRE EL PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE ASFALTOS. ....   | 53 |
| FIGURA 4-11. EFECTO DEL INCREMENTO DEL CONTENIDO DE DIFERENTES NANOARCILLAS (MODIFICADAS Y NO MODIFICADAS) SOBRE LA TEMPERATURA ALTA DE FALLA DE SUPERPAVE DE ASFALTOS. ....   | 54 |
| FIGURA 4-12. EFECTO DE LA ADICIÓN DE TRES TIPOS DE NANOARCILLAS A ASFALTOS MODIFICADOS CON TRES POLÍMEROS DIFERENTES. EN TODOS LOS CASOS SE UTILIZÓ UN 3% DE NANOARCILLAS. ARRIBA: EFECTO SOBRE EL PUNTO DE ABLANDAMIENTO. ABAJO: EFECTO SOBRE LA TEMPERATURA ALTA DE FALLA DE SUPERPAVE. ....     | 54 |



|  |    |
|--|----|
| FIGURA 4-13. EFECTO DE LA ADICIÓN DE TRES TIPOS DE NANOARCILLAS SOBRE LA VIDA A FATIGA DE ASFALTOS MODIFICADOS CON TRES POLÍMEROS DIFERENTES .....   | 55 |
| FIGURA 4-14. CAMBIO EN LA ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO DE ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMERO CON LA ADICIÓN DE NANOARCILLAS.....   | 56 |
| FIGURA 4-15. CAMBIO EN LA ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO DE ASFALTOS MODIFICADOS CON 4% DE POLÍMERO SBS CON ADICIÓN DE 2% DE DIFERENTES NANOARCILLAS .....  | 56 |
| FIGURA 4-16. PROPIEDADES DE BARRERA EN UN ASFALTO MODIFICADO CON NANOARCILLAS .....  | 57 |
| FIGURA 4-17. PÉRDIDA DE MASA DEBIDO A ENVEJECIMIENTO RTFOT Y PAV DE ASFALTOS MODIFICADOS CON DIFERENTES TIPOS DE NANOARCILLAS .....  | 57 |
| FIGURA 4-18. CAMBIO EN EL PUNTO DE ABLANDAMIENTO (ARRIBA) Y EL ÍNDICE DE ENVEJECIMIENTO DE VISCOSIDAD (ABAJO) DE DIFERENTES TIPOS DE ASFALTO BASE MODIFICADOS CON LA MISMA NANOARCILLA. ....                             | 58 |
| FIGURA 4-19. CAMBIO EN EL PUNTO DE ABLANDAMIENTO (ARRIBA) Y EL ÍNDICE DE ENVEJECIMIENTO DE VISCOSIDAD (ABAJO) TRAS ENVEJECIMIENTO UV DE DIFERENTES ASFALTOS BASE MODIFICADOS CON NANOARCILLAS .....                      | 58 |
| FIGURA 5-1. DETALLE DE LAS CAPAS DE LA ESTRUCTURA DE UNA CARRETERA .....   | 61 |
| FIGURA 5-2. FALLA DEL TIPO “SHOLVING” O CORRIMIENTO.....   | 62 |
| FIGURA 5-3. FALLA DEL TIPO FISURAS EN ARCO .....   | 62 |
| FIGURA 5-4. FALLA DEL TIPO CORRUGACIÓN .....   | 63 |
| FIGURA 5-5. ASFALTOS DILUIDOS O CUTBACKS.....  | 63 |
| FIGURA 5-6. TIPOS DE EMULSIÓN SEGÚN SUS FASES .....  | 64 |
| FIGURA 5-7. ESQUEMA DE ESTRUCTURA DE UNA EMULSIÓN ANIÓNICA .....   | 65 |
| FIGURA 5-8. ESQUEMA DE ESTRUCTURA DE UNA EMULSIÓN CATIÓNICA .....  | 66 |
| FIGURA 5-9. PLANTA CONTINUA .....  | 66 |
| FIGURA 5-10. PLANTA DISCONTINUA.....   | 67 |
| FIGURA 5-11. DISPOSITIVO PARA DETERMINAR LA CARGA DE LAS PARTÍCULAS.....   | 68 |
| FIGURA 5-12. DISPOSITIVO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO .....   | 68 |
| FIGURA 5-13. DISPOSITIVO PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD .....   | 69 |
| FIGURA 5-14. DISPOSITIVO PARA REALIZAR LA PRUEBA DE RESIDUO DE DESTILACIÓN.....  | 69 |
| FIGURA 5-15. PLANTA DISCONTINUA.....   | 70 |
| FIGURA 5-16. ROTURA DE UNA EMULSIÓN .....  | 70 |
| FIGURA 5-17. NORMA IRAM 6691 .....   | 71 |
| FIGURA 5-18. NORMA IRAM 6698.....  | 72 |
| FIGURA 5-19. TABLA 3 ENSAYO DE ADHERENCIA ENTRE CAPAS .....  | 72 |
| FIGURA 5-20. TERMÓMETRO PARA VERIFICAR TEMPERATURA.....  | 73 |
| DE ALMACENAMIENTO Y APLICACIÓN DE LA EMULSIÓN.....   | 73 |
| FIGURA 5-21. LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE A INTERVENIR .....  | 74 |
| CON BARREDORA MECÁNICA.....  | 74 |
| FIGURA 5-22. ARRASTRE DE LIGA DEBIDO AL TRÁNSITO DE .....  | 74 |
| VEHÍCULOS SOBRE LA EMULSIÓN .....  | 74 |
| FIGURA 5-23. VISTA ENSAYO SBT .....  | 75 |
| FIGURA 5-24. TABLA ENSAYO DE ADHERENCIA ENTRE CAPAS.....   | 75 |
| FIGURA 6-1. A LA DERECHA SE OBSERVA UNA MAQUINA FRESADORA ESTACIONADA A PIE DE OBRA, MIENTRAS QUE A LA IZQUIERDA SE OBSERVA UNA MAQUINARA EN EL PROCESO DE FRESADO, GENERANDO LA CARGA DEL MATERIAL SOBRE EL CAMIÓN..... | 77 |
| FIGURA 6-2. MINI CARGADORA CON ACCESORIO FRESADORA.....  | 78 |
| FIGURA 6-3. DEMOLICIÓN DE LA CARPETA ASFÁLTICA .....   | 78 |
| FIGURA 9-4. EN LA DERECHA SE OBSERVA LAS PILAS DE ACOPIO DURANTE EL PROCESO DE TRITURACIÓN Y EN LA IZQUIERDA LOS GALPONES DE ACOPIO DE RAP. ....   | 79 |



|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 6-7. PÉNDULO INGLÉS DE FRICCIÓN .....  | 80  |
| FIGURA 6-8. EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO.....   | 81  |
| FIGURA 6-9. EVALUACIÓN DE ESTADO .....  | 81  |
| FIGURA 6-10. ECONOMÍA CIRCULAR EN UNA OBRA DE PAVIMENTACIÓN FLEXIBLE.....   | 83  |
| FIGURA 6-11. PIRÁMIDE INVERTIDA CON ENFOQUE EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE .....  | 83  |
| FIGURA 6-12. PROCESOS QUE CONFORMAN EL CICLO DE VIDA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE .....   | 84  |
| FIGURA 6-13. ESQUEMA DEL PROCESO DE UNA ESTRUCTURA BICAPA.....  | 85  |
| TERMOREGENERACIÓN (REPAVING).....   | 85  |
| FIGURA 6-14. ESQUEMA DEL PROCESO DE UNA ESTRUCTURA BICAPA TERMORECICLADO.....   | 85  |
| FIGURA 6-15. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL RAP.....  | 86  |
| FIGURA 6-16. MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS .....   | 87  |
| FIGURA 6-17. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES RMAP.....  | 88  |
| FIGURA 6-18. MATERIAL RMAP1 SECO EN ESTUFA A 60° C. ....  | 89  |
| FIGURA 6-19. EQUIPO ROTOVAPOR EN FUNCIONAMIENTO. ....   | 89  |
| FIGURA 6-20. CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO ENVEJECIDO .....  | 90  |
| RECUPERADO DEL RMAP1.....   | 90  |
| FIGURA 6-21. CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO PÉTREO EXTRAÍDO DEL RMAP1,.....  | 90  |
| LUEGO DEL LAVADO CON SOLVENTE DONDE SE LO SEPARÓ DEL LIGANTE ASFÁLTICO. ....  | 90  |
| FIGURA 7-1. DEMARCACIÓN HORIZONTAL EN ZONA URBANA .....   | 92  |
| FIGURA 7-2. VISIBILIDAD DIURNA Y NOCTURNA EN RUTAS .....  | 93  |
| FIGURA 7-3. CONFORMACIÓN DE LAS MARCAS VIALES .....   | 93  |
| FIGURA 7-4. FENÓMENO DE SECADO POR COALESCENCIA .....   | 94  |
| FIGURA 7-5 A: MÁQUINAS DE APLICACIÓN DE TERMOPLÁSTICO POR PULVERIZACIÓN. B: MÁQUINAS DE<br>APLICACIÓN DE TERMOPLÁSTICO POR EXTRUSIÓN..... | 95  |
| FIGURA 7-6. A: APLICACIÓN CON MÁQUINA. B: APLICACIÓN MANUAL DE PLÁSTICO EN FRÍO.....  | 96  |
| FIGURA 7-7. CONDICIONES DE MEDIDA DEL COEFICIENTE DE LUMINANCIA BAJO ILUMINACIÓN DIFUSA .....   | 98  |
| FIGURA 7-8. EJEMPLOS DE CONTRASTE EN PAVIMENTOS DE HORMIGÓN .....   | 98  |
| FIGURA 7-9. FENÓMENO DE RETRORREFLEXIÓN EN UNA MICROESFERA DE VIDRIO .....  | 99  |
| FIGURA 7-10. FENÓMENO DE RETRORREFLEXIÓN Y GEOMETRÍA DE MEDIDA .....  | 99  |
| FIGURA 7-11. GEOMETRÍA A 15 METROS SEGÚN CIE .....  | 100 |
| FIGURA 7-12. GEOMETRÍA A 30 METROS SEGÚN CIE .....  | 100 |
| FIGURA 7-13 A. RETROREFLECTÓMETRO PORTÁTIL, B. RETROREFLECTÓMETRO DINÁMICO .....  | 100 |
| FIGURA 7-14. PÉNDULO INGLÉS TRRL DEL LEMAC .....  | 101 |
| FIGURA 7-15. FACTORES QUE AFECTAN A LOS ELEMENTOS DE SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL.....   | 101 |
| FIGURA 7-16. PATRONES REPRESENTATIVOS DE DEGRADACIÓN DE LA RETRORREFLEXIÓN.....   | 102 |
| FIGURA 7-17. CAMPO DE ENSAYO.....   | 103 |
| FIGURA 7-18. SIMULADOR DE DESGASTE “MESA GIRATORIA” .....   | 103 |
| FIGURA 7-19. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA ABRASIÓN .....  | 104 |
| FIGURA 7-20. COMPARACIÓN DE ENSAYOS NORMALIZADOS .....  | 104 |
| FIGURA 7-21. ENSAYOS IMPLEMENTADOS EN LA TESIS DOCTORAL.....  | 105 |



# Tecnología de los materiales viales.

Ignacio Zapata Ferrero      Adrián Segura  
Demian Daniel Palumbo      Federico Ortiz de Zárate  
Ramiro Nosetti      Nidia Nilda Estefanía Fretes  
Verónica Mechura

*En la actualidad existen diversas tecnologías y materiales que se involucran en la confección de los pavimentos.*

*En el libro "Tecnología de los materiales viales" se hace un recorrido por las técnicas que adicionan residuos como los neumáticos fuera de uso, incorporado dentro de las mezclas asfálticas como una dispersión dentro de asfalto para mejorar su desempeño frente a las patologías mas frecuentes.*

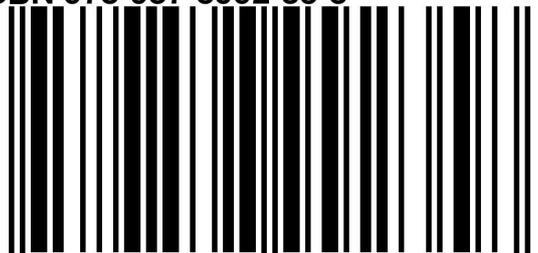
*Por otra parte, el estudio del pavimento reciclado y la incorporación de arcillas al asfalto, utilizado para mejorar la estabilidad y evitar el envejecimiento.*

*También se hace una revisión de los métodos históricos y recientes para el diseño estructural de pavimentos flexibles. Se especifican técnicas de trituración de agregados y las normativas existentes referidas a las emulsiones asfálticas. Por último, se muestra un detalle de las tecnologías a implementar en las pinturas de demarcación horizontal que juegan un rol fundamental en la seguridad vial.*

edUTecNe



ISBN 978-987-8992-35-8



9 789878 992358