

# Influencia de la graduación de los agregados a la deformación permanente

Breno Salgado Barra, M.Sc., Leto Momm, Dr.  
Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil  
Leidi Légi Bariani Bernucci, Dr.  
Escuela Politécnica de la Universidad de San Marcos, Brasil

## 1. Resumen

El trabajo evalúa el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas densas, a través de ensayos de laboratorio de deformación permanente, ejecutados a 60 °C en la frecuencia de 1 Hz, en placas moldeadas en la mesa de compactación neumática. Para comparar las mezclas asfálticas, fueron utilizados agregados provenientes de la región Amazónica (Estado de Pará), y cemento asfáltico de petróleo (CAP 50/60) entregado por la refinadora Lubricante y Derivados de Petróleo del Noreste (LUBNOR). Fueron comparadas mezclas asfálticas con granulometrías situadas en los límites de Faja C del Departamento de Infraestructura de Transportes (DNIT), en relación a las curvas elaboradas con la ecuación de Fuller o Talbot, denominadas curva práctica (CP) o teórica (CT), respectivamente. La búsqueda apunta resultados más satisfactorios para las curvas teóricas, cuando se le compara con la curva práctica normalmente utilizada en la región amazónica.

## 2. Introducción

El principal defecto que afecta el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas en la región amazónica está relacionado con la deformación permanente. Entre las causas más inherentes están la metodología de concepción en el tipo de cemento asfáltico utilizado.

En el estado de Pará, particularmente, las mezclas asfálticas están siendo concebidas a partir de parámetros tradicionales, con la adopción de fajas granulométricas homologadas por las especificaciones técnicas del Departamento Nacional de

Infraestructura de Transportes (10), dotadas de una gran amplitud en sus límites porcentuales.

Las mezclas asfálticas concebidas con granulometrías situadas en los límites de las fajas citadas, pueden tener comportamientos dinámicos diversos, generando mezclas asfálticas con débil desempeño mecánico (12).

La viscosidad del cemento asfáltico de petróleo (CAP 50/60), fortalecido para la región es baja, lo que le confiere susceptibilidad a ambientes con temperaturas altas, como las de la zona climática ecuatorial, significando que posee un punto de ablandamiento bajo y una penetración relativamente alta, o sea, mecánicamente poco resistente para las condiciones climáticas del Estado. En este contexto, el polvo calcáreo regional se muestra como una alternativa técnicamente viable para confrontar este problema (6).

Este conjunto de factores reflejado en la ocurrencia de deformaciones permanentes por fluencia en las capas de revestimiento en el campo, conocidas como desempeños en las roderas, perjudicando los desempeños funcional y estructural de los pavimentos, acarreando consecuentemente el colapso de las capas subyacentes.

La investigación, con el objetivo de buscar soluciones particulares a la región mencionada, evalúa el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas, a través de ensayos de deformación permanente, formulados a partir de curvas granulométricas teóricas (CT), comparándolas a la de la mezcla representativa empleada en servicios de pavimentación de la región, denominadas curva práctica.

### 3. Deformación permanente

La degradación de la calidad del pavimento flexible, que se traduce por irregularidades en los perfiles longitudinales y transversales del pavimento, ocurre por los mecanismos que producen deformación permanente en los pavimentos.

Dentro de los mecanismos que se traducen en irregularidades de la superficie están la deformación permanente estructural, la deformación permanente por fluencia y la deformación permanente por uso (12).

La deformación permanente por fluencia se distingue por ser un problema inherente a la formulación de la mezcla del concreto asfáltico, características de los diversos constituyentes y de la ejecución de la mezcla.

La deformación permanente por fluencia, ó simplemente deformación permanente, en inglés *rutting* y en francés *orniérage*, también denominada desempeño de las roderas, puede ser descrita como una depresión en las roderas con una posible ocurrencia de una elevación a lo largo de los bordes de esa depresión (11).

La deformación permanente puede ser originada por la inestabilidad del concreto asfáltico ocasionado por la fluencia excesiva de la mezcla, agravada por temperaturas elevadas (4).

Por lo tanto, la deformación permanente en las capas asfálticas no debe ser confundida por daños causados por fatiga, que corresponden a un decrecimiento del módulo de rigidez de las mezclas asfálticas, generando la ruptura de los concretos asfálticos, en función de la pasada de cargas solicitantes.

El riesgo del desempeño en las roderas en las autopistas es más acentuado en localidades de bajas velocidades. En los tramos urbanos, donde las velocidades son menores, el defecto ocurre en los carriles de tráfico canalizado, cerca de las paradas de autobuses y en curvas acentuadas (13). También en las regiones de clima caliente, como

en el caso del área de influencia de la investigación es observada la susceptibilidad de las mezclas densas a la deformación permanente, principalmente en las autopistas de tráfico intenso y pesado. Con todo, la mala distribución granulométrica de las curvas que están siendo utilizadas, y el empleo de un CAP (50/60) con baja consistencia, para las condiciones climáticas de la región amazónica, contribuyen para la aparición de las roderas.

La formulación de un concreto asfáltico pudiendo evitar la deformación permanente por fluencia, busca obtener un esqueleto mineral estable y eficaz en la transmisión de esfuerzos, con mayor número de puntos de contacto entre las partículas de los materiales granulares, lo que resulta en un ángulo de fricción interno elevado y duradero entre las partículas referidas, por lo tanto, empleando materiales de calidad.

### 3. Agregados Minerales Estudiados

Las circunstancias minerales estudiadas en el área de influencia de la investigación, fueron: agregado sienogranítico, arena cuarzosa de tajo y el polvo calcáreo (5). El agregado sienogranítico fue subdividido en dos fracciones distintas denominadas de la siguiente forma: 1 (con diámetro máximo de 1,91 mm) y 0 (con diámetro máximo de 9,50 mm).

El análisis por microscopía electrónica de barrido de alta resolución fue ejecutado con partículas de arena cuarzosa de tajo y polvo calcáreo, con el fin de evaluar la morfología de las partículas de estos agregados. Las figuras 1, 2 y 3 ilustran estos agregados.

Fue posible identificar diversas partículas con morfología redondeada en las muestras de arena cuarzosa de tajo, siendo un factor que contribuye sobremedida para el decrecimiento de la resistencia al cizallamiento de las combinaciones de los granos que componen las mezclas asfálticas, debido al ángulo de fricción deficiente formado entre las partículas.



Figura 1. Agregado sienogranítico

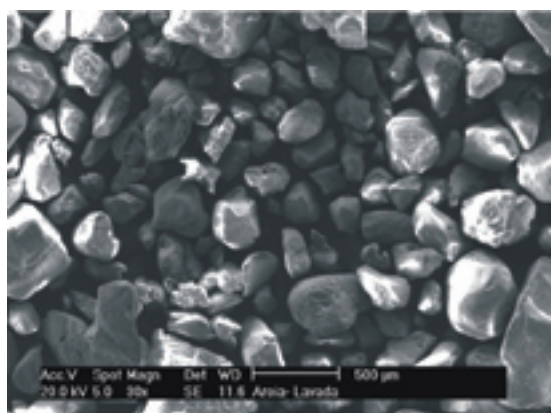


Figura 2. Arena cuarzosa de tajo

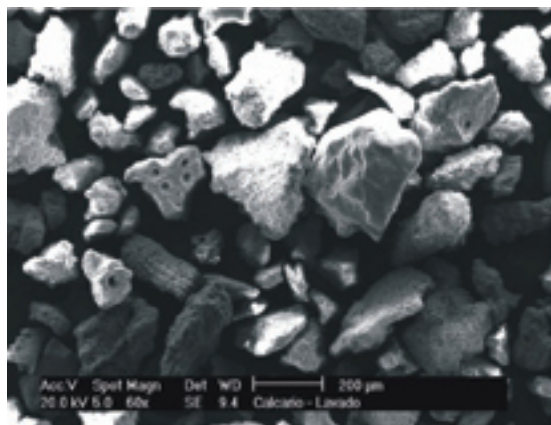


Figura 3. Polvo calcáreo

Situación opuesta fue observada cuando fue analizada la tendencia morfológica no esférica de la macrotextura de las partículas del polvo calcáreo, así como la aspereza relativa a su microtextura, luego, comprendiendo características adecuadas a la mejora de desempeño mecánico de las mezclas asfálticas en el campo.

#### 4. Curvas granulométricas proyectadas

Las combinaciones granulométricas fueron construidas con curvas granulométricas prácticas y teóricas, recibiendo denominaciones de CP y CT, respectivamente.

La granulometría CP, representativa de la región estudiada, fue proyectada respetando los límites porcentuales de falla granulométrica C de DNIT (10), obtenida con la suma de los productos de los porcentajes de las fracciones de cada agregado pasante en la serie de tamices normalizada por DNIT (10) por las proporciones porcentuales de cada material, de modo que se ajusta mejor en los límites de la Banda C (Tabla 1).

Las curvas granulométricas teóricas (CT1 y CT2), fueron construidas con el uso de la ecuación 1, en que se fija el diámetro máximo de los granos de distribución granulométrica y el porcentaje de material pasando en el tamiz de menor abertura de la serie de los tamices escogida por el proyectista. Por tanto, la ecuación de Fuller o Talbot fue la escogida para formular sus combinaciones granulométricas, siendo expresada por:

$$\text{Ecuación 1: } \%p = a \cdot (d/D)^n$$

Tamices	Abertura (mm)	Porcentaje en peso pasante (%)				
		Agreg. 1	Agreg. 0	Polvo de Piedra	Arena	Polvo Calcáreo
3/4"	19,1	100	100	100	100	100
1/2"	12,7	65,1	100	100	100	100
3/8"	9,5	19,2	91,0	100	100	100
Nº4	4,76	0,6	35,5	99,4	100	100
Nº10	2,2	0,4	5,9	82,6	99,8	100
Nº40	0,42	0,3	1,4	52,5	75,1	100
Nº80	0,2	0,3	0,6	35,6	21,6	77,1
Nº200	0,075	0,1	0,2	8,8	1,6	50,0
Proporciones porcentuales seleccionadas por tentativa		15%	30%	34%	17%	4%

Tabla 1. Distribución granulométrica de los agregados utilizados en la curva práctica (5)

Donde:

- %p= porcentaje en peso que pasa del tamiz de abertura d (en este caso, de 0,075 mm);
- a= constante, tomada igual a 100;
- d= abertura de un dado tamiz (mm);
- D= tamaño máximo, abertura del tamiz que pasa 100% (en este caso, de 19,1 mm) y
- n= exponente

La diferencia entre la CT1 y la CT2 está en la naturaleza del agregado empleado entre los tamices de 1,2 mm, 0,6 mm y 0,3 mm. CT1 utiliza arena natural de tajo y CT2 arena artificial producto de la trituración de roca, sin embargo, ambas están dentro de una misma serie de tamices (5) (tabla 2).

Tamices	Abertura (mm)	Distribución granulométrica de las Curvas Teóricas (% pasante)
3/4"	19,1	100,0
1/2"	12,7	81,3
3/8"	9,5	70,1
Nº4	4,76	49,4
Nº10	2,2	33,4
Nº16	1,2	24,5
Nº30	0,6	17,2
Nº50	0,3	12,1
Nº100	0,15	8,5
Nº200	0,075	6,0

Tabla 2. Distribución granulométrica de las curvas teóricas (5)

Como la variación fue en relación a la naturaleza y a la morfología de los agregados, y no en relación a los diámetros de los granos, las CT tuvieron trazados de sus curvas superpuestas, habiendo sido obtenido un exponente de 0,51 (figura 4).

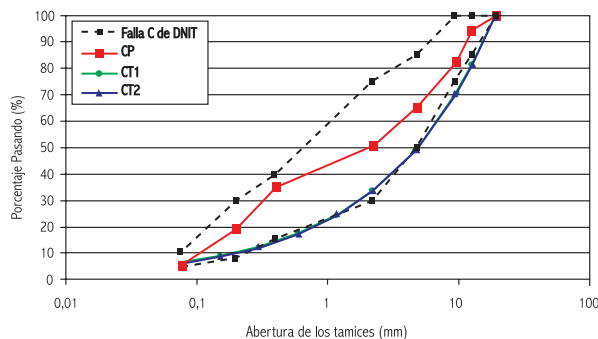


Figura 4. Curvas teóricas comparadas a la curva práctica en los límites de Banda C de DNIT

## 5. Dosificación de las mezclas asfálticas

La dosificación del cemento asfáltico de petróleo (CAP) de las mezclas asfálticas fue realizado siguiendo los procedimientos del ensayo Marshall (9), con la aplicación de 76 golpes en cada fase de los especímenes de prueba cilíndricos, alcanzando los porcentajes de CAP de 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%.

El análisis de los parámetros referentes a la masa específica aparente, estabilidad, porcentaje de vacíos, relación bitumen/vacíos, flujo y vacíos del agregado mineral, indicaron los siguientes contenidos óptimos de CAP para CP, CT1 y CT2, respectivamente: 6.1% y 5.5% (para ambos CT). Entre tanto, en el ensayo de deformación permanente, el contenido de CAP de CP fue reducido en 0.3%, con base en el trabajo desarrollado por Carvalho (7) que evaluó el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas, semejantes a CP de ésta investigación, compuestas por materiales provenientes de la misma región, indicando un contenido óptimo de CAP a través del ensayo Marshall (9) en 6.2%, reducido al 5.9%. En este trabajo, el contenido de CAP fue reducido en un 5.8% en la dosificación de CP.

## 6. Compactación de bloques de mezclas asfálticas.

La preparación de los bloques fue realizada en la mesa compactadora normalizada por el Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC), (1). Para cada tipo de mezcla asfáltica estudiada, fueron moldeados dos bloques destinados a la determinación de la deformación permanente.

Los agregados fueron colocados en el horno a una temperatura conforme determinada por la curva de viscosidad de CAP 50/60, por un período mínimo de 4 horas. El cemento asfáltico obedeció al control de temperatura de mezclado, también estipulado en la curva de viscosidad de CAP 50/60.

La cantidad de mezcla asfáltica necesaria a ser usada es determinada en función de la densidad aparente de la

mezcla compactada. Por la composición granulométrica, son establecidas las masas de cada fracción de agregado, siendo pesadas éstas fracciones, del agregado ya caliente, y colocadas en un recipiente mezclador, este a su vez, ya estando en temperatura compatible con la del agregado. Luego, se pesó el ligante que debe estar en la temperatura ideal para la mezcla de la masa, habiendo sido incorporado enseguida a los agregados.

Los bloques fueron compactados en moldes de acero con las siguientes dimensiones: 180mm de largo, 500mm de ancho y 50mm de altura (figura 5).

La compactación fue realizada por el amasamiento con llantas de hule, donde son variadas: las presiones de inflado, las cargas en el eje de sollicitación, y la trayectoria de la rueda sobre el bloque a ser compactado, todas controladas por comandos provenientes de terminales informatizadas (figura 6), en conformidad con la norma AFNOR (1).

## 7. Deformación permanente de bloques de mezclas asfálticas

Este ensayo es recomendado por la norma AFNOR (2). Los bloques de prueba compactados fueron instalados en la máquina de deformación permanente. Una sonda es implantada en el interior de la placa, a fin de garantizar la temperatura especificada de 60°C del ensayo a las mezclas asfálticas. Este equipo prueba dos bloques simultáneamente con la pasada de un eje simple de rueda simple de 5000 N + 50N (Figura 7).

Antes del calentamiento a 60°C de las mezclas asfálticas, se aplica una sollicitación de 1000 ciclos a una temperatura comprendida ente 15°C y 25°C. Un ciclo significa cada pasada de ida y vuelta del eje solicitante sobre el bloque de prueba. Luego, la máquina es regulada para mantener 60°C en el interior de la cámara de ensayo, donde son realizadas pasadas con 100, 300, 1000, 3000, 10000 y 30000 ciclos, para cada uno de estos conjuntos de ciclos, la media de los hundimientos generados por la acción de carga, en 15 puntos distintos en la dirección sollicitada (Figura 8).



Figura 5. Molde metálico de compactación de los bloques



Figura 6. Mesa compactadora de los bloques de las mezclas asfálticas



Figura 7. Cámara termo-regulada de la máquina de deformación permanente

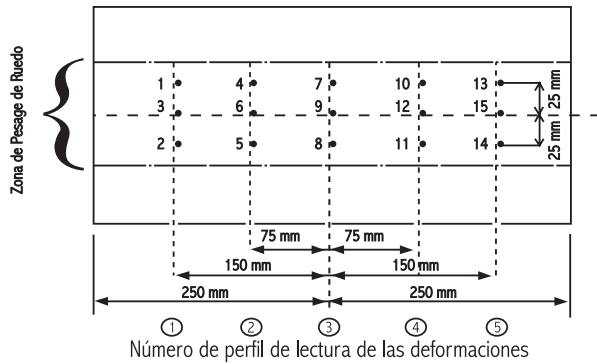


Figura 8. Diseño esquemático de la zona de transición de carga solicitante de la máquina de deformación permanente y los respectivos puntos de lectura de las deformaciones en el bloque.

Se interrumpe el ensayo siempre que el valor del hundimiento medio alcance 15% en relación al espesor del bloque.

Los porcentajes correspondientes a los hundimientos en las roderas son calculados a partir de la ecuación 2:

$$\text{Ecuación 2: } Y = A.(N/1000)^b$$

Donde:

Y= profundidad de deformación a N ciclos;  
 A= profundidad de deformación a 1000 ciclos;  
 N= número de ciclos; y,  
 b= inclinación de la recta en coordenadas logarítmicas

Las mezclas asfálticas estudiadas corresponden a BBSG (Bétun Bitumineux Semi-Grenus), en que el criterio de tolerancia de los fundamentos de las capas de rodamiento es de 5% del espesor del bloque, luego de 30000 ciclos de sollicitación (3).

Los investigadores, sobre las interpretaciones de los ensayos de deformación permanente, concluyen (12):

-En general, las mezclas asfálticas que presentan, en laboratorio, deformaciones permanentes en conformidad con las entradas especificadas para las capas de rodamiento en particular, en el campo no presentan deformación permanente; y,

-En los casos opuestos, esto es, cuando hubo deformación permanente en el campo, fueron encontradas una o más deficiencias de control de los materiales usados: cambio de origen de CAP, polución accidental de CAP (contaminación), heterogeneidad del material triturado, deficiencia en la evaluación de las densidades granulares, etc.

## 8. Presentación de resultados

Fueron evaluados ocho pares de bloques de mezclas asfálticas en la máquina de deformación permanente (2).

La reducción de 0,5% de CAP en la dosificación inicial de 5,5% fue necesaria, para el CT1, pues durante el proceso de compactación AFNOR (1), se observó fluencia excesiva de mezcla, en función de la cantidad elevada de CAP indicada por el Ensayo Marshall (9), situación confirmada en el ensayo de deformación permanente (2). Los resultados de los ensayos constan en la Figura 9.

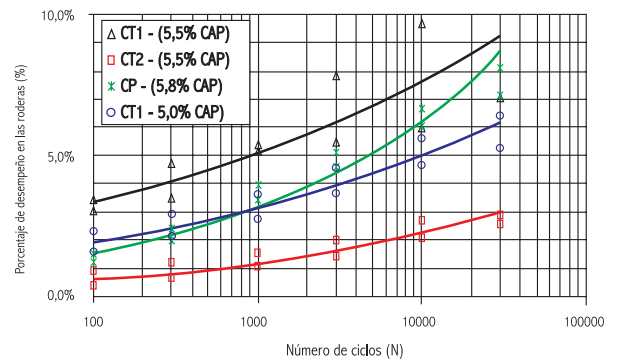


Figura 9. Porcentaje de desempeño de roderas en las mezclas asfálticas.

La CT2 fue la única que obtuvo el resultado, de 3,0%, encajado en el criterio de deformación máxima admisible previsto en la norma francesa AFNOR (3).

La CT1 y la CP deformaron en porcentajes arriba del especificado por la referencia mencionada, presentando hundimientos de 9,24% y 8,74%, respectivamente.

Con el ajuste de la dosificación del CAP, el porcentaje final de deformación de la CT1 sufrió una reducción de 3,07%, resultando en 6,17%, sin embargo, todavía encima del límite máximo admisible de 5%.

## 9. Conclusiones

Las combinaciones de los granos alcanzados en las mezclas con la granulometría de las curvas teóricas (CT) mostraron ser una alternativa más recomendable que lo obtenido a través de la curva práctica (CP).

El Ensayo Marshall (9) se mostró inadecuado como metodología de dosificación de los contenidos de CAP para las mezclas asfálticas, pues indicó contenidos considerados como óptimos que fueron alterados (reducidos), con base en los ensayos de compactación de los bloques (1) y también en el trabajo de Carvalho (7), caso de CT1 y de CP, respectivamente, debido a la cantidad excesiva de los hundimientos ocasionados en las roderas por encima de las expectativas.

Se recomienda que sean implantados, en el área de influencia de la investigación, sistemas de trituración secundario para viabilizar la producción de granos con morfología sub-angular más homogénea (tal como el triturador roca contra roca), bien como el fortalecimiento de un CAP dotado de consistencia adecuada, a fin de mejorar el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas.

## 6. Referencias bibliográficas

AFNOR (1993a) NF P 98-250-2 - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques. Association Francaise de Normalisation.

AFNOR (1993b) NF P 98-253-1 - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 1: Essai d'Orniérage. Association Francaise de Normalisation.

AFNOR (1999) NF P 98-130 - Enrobés Hydrocarbonés: Couches de Roulement et Couches de Liaison (Bétons Bitumineux Semi-Grenus - BBSG). Association Francaise de Normalisation.

Balbo, J.T., (1997) Pavimentos Asfálticos - Patologías e Manutencao. Ed. Plêiade, Sao Paulo.

Barra, B.S., (2005) Avaliacao do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas Utilizando Materiais do Estado de Pará com o Emprego de Pó Calcário. Dissertacao de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Barra, B.S., e L. Momm (2004) Caracterizacao e Influência do Pó Calcário do Estado do Pará nas Propriedades das Misturas Asfálticas. Anais da 35ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV), Associação Brasileira de Pavimentação (ABPV), Rio de Janeiro; CD-ROM, artigo 094-35, 9 p.

Carvalho, A.D., (1999) Propriedades das Misturas Asfálticas Densas com Brita e com Seixo Rolado Utilizadas como Reevestimento de Pavimentos no Pará. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo (SP).

CPRM (2005) Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais: Serviço Geológico do Brasil. Ministerio de Minas e Energia. [www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br). Último acesso em fevereiro de 2005.

DNER (1995) ME 43/95 - Misturas Betuminosas a Quente: Ensaio Marshall. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ).

DNIT (2002) Especificações Geris para Obras Rodoviárias. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Rio de Janeiro (RJ).

Domingues, F. A. A., (1993) MID - Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos, Ed. Felipe Augusto Aranha Domingues, São Paulo.

Momm, L. (1998), Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e Seu Comportamento Mecânico. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo (SP).

Santana, W. C. (2002) Estudo de Misturas de Areia-Asfalto a Quente para o Estado do Maranhão. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo (SP).