

Evaluation of the effectiveness of the use of the TDI (Traffic Densification Index) for the prediction of the behavior of nano-modified asphalt mixtures against permanent deformation

Evaluación de la efectividad del uso del índice TDI (Traffic Densification Index) para la predicción del comportamiento de las mezclas asfálticas nanomodificadas frente a la deformación permanente

J. Staub de Melo ^{1*}, J. Villena ^{**}

* Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis - SC, BRASIL

** Universidade Federal do Paraná – Paraná, BRASIL

Fecha de Recepción: 07/01/2020

Fecha de Aceptación: 01/10/2020

PAG 322-335

Abstract

This article shows the results of a study on the evaluation of the use of the TDI (Traffic Densification Index) for the prediction of the behavior of a conventional asphalt mixture and two nano-modified asphalt mixtures (one with 2% of carbon nanotubes, CNTs, and another with 3% of organophilic nanoclay, NA) against permanent deformation. The mixtures were designed with equivalent granulometries and different asphalt binders (a conventional and two nano-modified binders). The design of the mixtures was made according to the Superpave method, and the TDI of the mixture was determined from the curves obtained in the compaction test (%Gmm vs number of cycles). For each mixture under study, two slabs measuring 50 x 18 x 5 cm were compacted on the BBPAC slabs compactor of IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'Aménagement et des Réseaux). These slabs were subsequently subjected to the permanent deformation test in the French traffic simulator, Orniéreur. The TDI obtained was compared with the performance of the mixtures in the permanent deformation test. The results obtained show that the TDI was not effective in predicting the behavior, in terms of permanent deformation, of asphalt mixtures with asphalt binders different from the conventional binder (nano-modified).

Keywords: Traffic densification index; nano-modified asphalt mixtures; prediction, permanent deformation

Resumen

Este artículo muestra los resultados de un estudio sobre la evaluación del uso del índice TDI (Traffic Densification Index) para la predicción del comportamiento de una mezcla asfáltica convencional y dos mezclas asfálticas nanomodificadas (una con 2% de nanotubos de carbono - NTC y otra con 3% de nanoarcilla organofílica - NA) frente a la deformación permanente. Las mezclas fueron diseñadas con granulometrías equivalentes y ligantes asfálticos distintos (un convencional y dos nanomodificados). El diseño de las mezclas fue realizado según el método Superpave y a partir de las curvas obtenidas en el ensayo de compactación (%Gmm vs número de giros) fue determinado el índice TDI de las mezclas. Para cada mezcla estudiada, fueron compactadas dos placas, con dimensiones de 50 x 18 x 5 cm, en la máquina compactadora BBPAC del IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux); estas placas fueron, posteriormente, sometidas al ensayo de deformación permanente en el simulador de tráfico francés Orniéreur. El índice TDI obtenido fue comparado con el desempeño de las mezclas en el ensayo de deformación permanente. Los resultados obtenidos indican que el índice TDI no se mostró eficaz al momento de predecir el comportamiento, cuanto a la deformación permanente, de las mezclas asfálticas con ligante asfálticos distintos al convencional (nanomodificados).

Palabras clave: Índice de densificación del tráfico; mezclas asfálticas nanomodificadas; predicción, deformación

1. Introducción

En los últimos años, diversas investigaciones (Soares, 2014); (Onofre et al., 2011); (Lopes et al., 2011); (Nascimento, 2008); (Mahmoud y Bahia, 2004); (Bahia et al., 1998) han buscado desarrollar una forma de predecir el desempeño de la mezcla asfáltica a partir de parámetros relacionados al ensayo de compactación, el cual es realizado como parte del procedimiento de diseño de mezclas del método Superpave (Superior Performance Asphalt Pavements). En ese ensayo, las mezclas son compactadas por efecto de amasado y, con los datos obtenidos, es posible la construcción de una curva que relaciona el aumento de la gravedad específica bruta, la cual es igual a un porcentaje de la gravedad específica teórica máxima medida (%Gmm) de la mezcla, y el número de giros aplicados; esta curva es denominada como curva de densificación.

¹ Autor de Correspondencia:

Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis - SC,
BRASIL
E-mail: joao.victor@ufsc.br



A partir de los datos utilizados para la construcción de la curva de densificación, es posible determinar dos índices: el Construction Densification Index (CDI) y el Traffic Densification Index (TDI). De acuerdo con (Bahia et al., 1998), el parámetro CDI es determinado como siendo igual al área debajo de la curva de densificación en el intervalo desde el número de giros inicial (Ninicial) hasta el número de giros que corresponde a un valor de 92% de la Gmm (gravedad específica teórica máxima medida en el ensayo de Rice) de la mezcla (Figura 1). Por consiguiente, el parámetro CDI estaría relacionado con la energía necesaria para compactar la mezcla asfáltica en campo durante la construcción del pavimento, la cual, por su vez, está relacionada con la trabajabilidad del material asfáltico. Por lo tanto, una mezcla asfáltica que presente un valor elevado de CDI estaría reflejando la necesidad de un gasto energético grande para lograr su compactación durante la construcción de la carretera.

Cuanto al TDI, para (Mahmoud y Bahia, 2004), este índice representa la cantidad de energía que se requiere para compactar la mezcla desde una densidad correspondiente a 92% de la Gmm hasta la densidad correspondiente a 98% de la Gmm. El valor del índice es igual al área debajo de la curva de densificación entre los dos puntos mencionados (Figura 1) y estaría relacionado con la capacidad de la mezcla, una vez endurecida, para resistir la deformación permanente. El límite de 98% de la Gmm es utilizado para calcular el TDI debido a que se trata de una densidad crítica, que corresponde al momento en que la mezcla está en la zona de rotura plástica. Para (Nacimiento, 2008), cuando los valores de TDI son más altos, mejores son las expectativas de que la capa asfáltica resista las tensiones impuestas por el tráfico de los vehículos durante su vida de servicio.

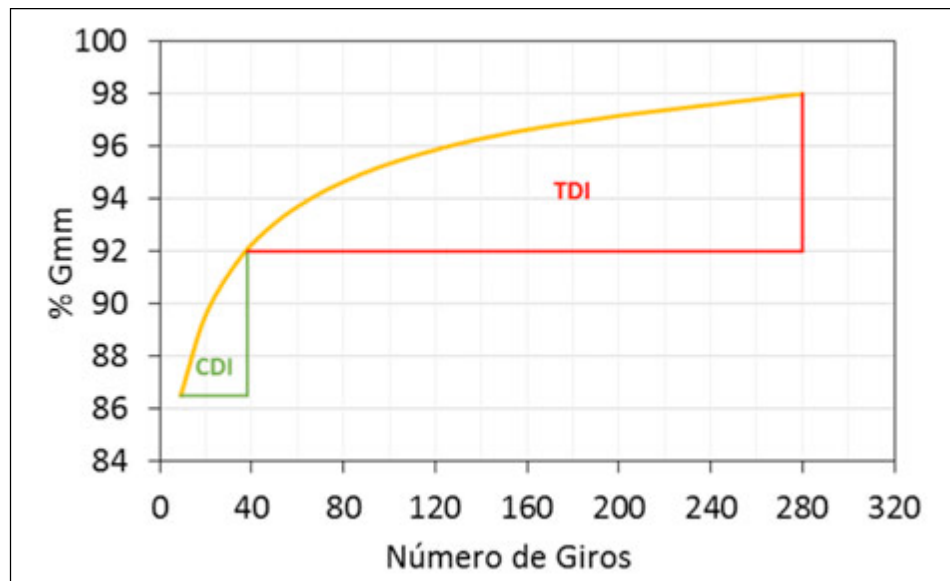


Figura 1. Representación gráfica de los índices CDI y TDI

Para un volumen de tránsito alto, (Bahia y Faheem, 2007) proponen que el valor de TDI, para obtener un buen desempeño frente a la deformación permanente, sea de 1200; sin embargo, estos autores enfatizan que tales límites tienen que ser validados en campo. Cuanto a las carreteras brasileñas, (Nascimento, 2008) recomienda que uno de los criterios adoptados para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa es que el valor del TDI sea superior a 400. Sin embargo, es posible que el uso de tal índice no sea adecuado para predecir el comportamiento de mezclas asfálticas no convencionales, tales como mezclas con material reciclado, con polímeros o con otro tipo de aditivos.

En ese sentido, para poder contribuir con el conocimiento existente hasta el momento, este trabajo muestra y evalúa los resultados de una investigación sobre la capacidad del uso del índice TDI para poder pronosticar el comportamiento frente a la deformación permanente de mezclas asfálticas nanomodificadas, ensayadas en el simulador de tráfico francés Orniéreur.

2. Materiales

Para el diseño y la producción de las mezclas estudiadas fueron utilizados los siguientes materiales: ligante asfáltico convencional, nanoarcilla organofílica (NA), nanotubo de carbono (NTC), agregados minerales y cal hidratada tipo CH-1. El ligante convencional y las nanoarcillas fueron utilizados para producir dos tipos de ligantes modificados: un ligante asfáltico modificado con NA y un ligante asfáltico modificado con NTC. Con estos materiales fueron diseñadas tres mezclas asfálticas en laboratorio; una mezcla de referencia sin aditivos, una mezcla modificada con nanotubos de carbono (NTC) y una mezcla con nanoarcilla organofílica (NA).

La nanoarcilla organofílica está compuesta por carbono (45.5%), silicio (33.42%), aluminio (16.08%), hierro (3.60 %), cloro (0.80%), titanio (0.31%), potasio (0.27%) y estroncio (0.02%); estos datos fueron obtenidos por fluorescencia de Rayos X. Adicionalmente, la nanoarcilla tiene una estructura cristalina constituida por capas de tetraedros de sílice y octaedros de aluminio (estructura dioctaédrica), tamaño de partículas de 1×500 nm y densidad de 1.7. El aspecto morfológico de las capas de silicatos de la nanoarcilla es mostrado en la microfotografía de la (Figura 2).

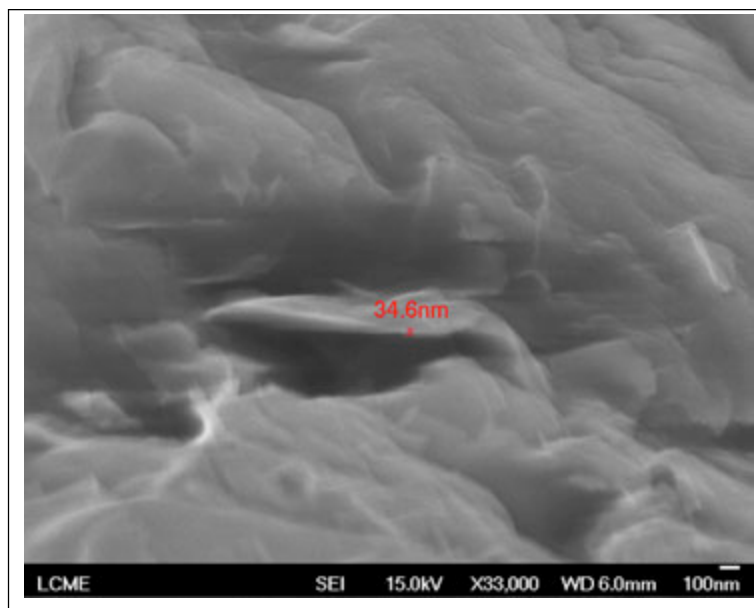


Figura 2. Microfotografía de la nanoarcilla con ampliación de 33,000 veces

La nanoarcilla (NA) utilizada es derivada del mineral arcilloso montmorillonita y está modificada por sales cuaternarias de amonio (catión orgánico). El catión orgánico utilizado en la preparación de la nanoarcilla organofílica es el dimetil amonio, con dos cadenas alquílicas. Esta sal es un tensoactivo, es decir, posee una extremidad con cadenas alquílicas de características hidrofóbicas, apolar y con afinidad por los aceites, y otra extremidad con características hidrófilas, polar y con afinidad por el agua.

Los nanotubos de carbono (NTC) utilizados muestran varias capas, diámetro externo variando entre 50 y 80 nm, diámetro interno de 5 a 15 nm, longitud de 10 a 20 μ m, densidad de 2.1 y superficie específica de 60 a 80 m^2/g . Los resultados del ensayo de fluorescencia de Rayos X, realizados en una máquina Philips modelo PW 2400, mostraron que el NTC está constituido principalmente por carbono (97.37%), níquel (1.86%), hierro (0.55%), cloro (0.20%) y azufre (0.02%). Estos resultados indican que el material tiene un alto grado de pureza debido a que el porcentaje de carbono es mayor que 95%. La (Figura 3) muestra una microfotografía del NTC.

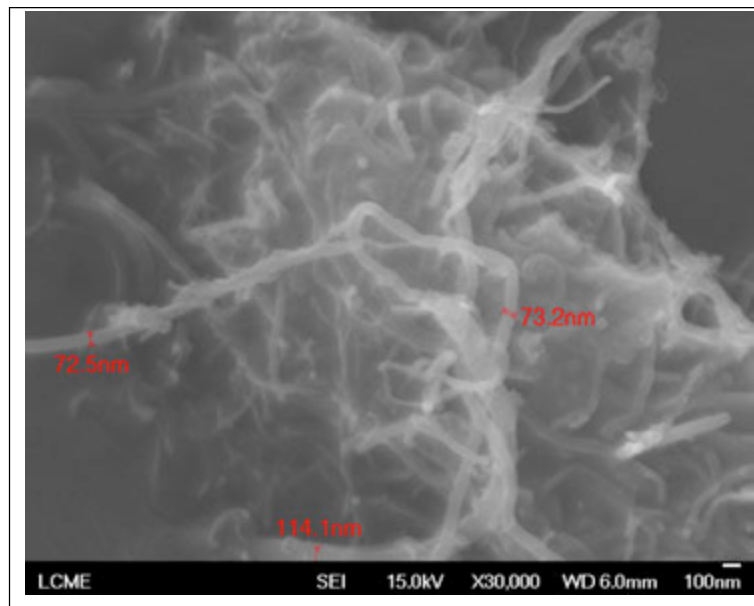


Figura 3. Microfotografía de los nanotubos de carbono con ampliación de 30,000 veces

El ligante asfáltico utilizado es de tipo convencional con Grado de Desempeño (Performance Grade - PG) de 58-22. Cuanto a los otros dos ligantes nanomodificados, uno de ellos fue producido mediante la mezcla de ligante asfáltico convencional y 2% de NTC y el otro mediante la mezcla de ligante convencional con 3% de NA. Estos porcentajes de concentración de los nanomateriales en el ligante asfáltico fueron definidos a partir de valores presentes en diversas investigaciones consultadas previamente (You et al., 2011); (Yao et al., 2012); (Zare-Shahabadi et al., 2010); (Jahromi y Khodaii, 2009); (Ashish et al., 2016); (Melo y Trichês, 2016); (Amin et al., 2016); (Steyn et al., 2013); (Hasan et al., 2012). Para realizar la incorporación de los nanomateriales fue utilizado un mezclador de alto cizallamiento, con velocidad de 5,000 RPM, temperatura del ligante asfáltico de 150 °C (viscosidad de 1.486 poise) y con 100 minutos de compatibilización. La (Tabla 1) muestra las propiedades físicas y reológicas de los ligantes utilizados.

Tabla 1. Propiedades de los ligantes asfálticos

Propiedades	Ligante convencional	Ligante con 3% de NA	Ligante con 2% de NTC
Grado de desempeño - PG (Tabla 3 de la AASHTO M320, 2017)	58-22	64-22	64-16
Penetración (ASTM D5, 2019)	57 (1/10 mm)	55 (1/10 mm)	54 (1/10 mm)
Punto de ablandamiento (ASTM D36, 2014)	47.9 °C	50.2 °C	51.9 °C
Índice de susceptibilidad térmica (IST)	-1.44	-0.92	-0.55
Viscosidad a 135 °C (20 RPM) (ASTM D4402, 2015)	2.922 poise	4.125 poise	4.050 poise
Viscosidad a 150 °C (50 RPM) (ASTM D4402, 2015)	1.486 poise	2.070 poise	2.050 poise
Viscosidad a 175 °C (100 RPM) (ASTM D4402, 2015)	0.597 poise	0.850 poise	0.815 poise

A partir de los resultados mostrados en la (Tabla 1), se puede verificar que los ligantes modificados con nanomateriales sufrieron una reducción de la penetración y un aumento del punto de ablandamiento; esto resultó en una menor sensibilidad a las variaciones térmicas, como puede ser verificado en los valores correspondientes al índice de susceptibilidad térmica (IST). La magnitud de este efecto fue mayor cuando se utilizó el NTC, aun siendo el porcentaje de este aditivo menor al del NA. En este sentido, considerando que el punto de ablandamiento y el IST están, generalmente, relacionados con la aparición de deformaciones plásticas permanentes en las mezclas asfálticas, es posible que cuanto menos susceptible sea el ligante asfáltico a la temperatura, menor sea la contribución del ligante para la aparición del fenómeno de ahuellamiento en la capa asfáltica. Por lo tanto, se podría decir que, cuanto a este fenómeno, el comportamiento del ligante asfáltico, será mejorado con la adición de los nanomateriales.

Los resultados de viscosidad aparente mostraron una alteración reológica del ligante asfáltico debido a la adición de los nanomateriales; así, se puede verificar que la resistencia al flujo de los nanocompuestos, al ser sometidos a tensiones, es superior a la del ligante asfáltico convencional. Por consiguiente, estos resultados retratarían la misma tendencia que los valores obtenidos para el punto de ablandamiento.

Cuanto al grado de desempeño (PG), se verificó un incremento de este parámetro para altas temperaturas como consecuencia de la incorporación de los nanomateriales; en específico, el aumento del PG fue de 6 °C. Ya en relación al PG a bajas temperaturas, este parámetro no sufrió alteración debido a la adición de la NA, pero si debido a la adición del NTC. La incorporación del NTC aumento el módulo de rigidez y redujo la tasa de relajación comparado con los resultados del ligante convencional, lo que estaría relacionado con una menor capacidad para disipar las tensiones debido a la contracción térmica; así, el uso de este aditivo dejó el ligante susceptible a un posible agrietamiento por efecto térmico. En este caso, la adición de NA causó la disminución del desempeño del ligante en 6 °C, por lo que no sería recomendable el uso de este ligante en regiones con clima muy frío.

El agregado natural utilizado es de origen basáltica y fue ensayado con el objetivo de determinar los valores de las propiedades físicas más importantes que están relacionadas a la aceptación de ese material según los criterios del método Superpave para carreteras de volumen de tráfico pesado. Los resultados de los ensayos de caracterización física son mostrados en la (Tabla 2)..

Tabla 2. Características físicas de los agregados

Características físicas	Resultados	Criterios Superpave
Gravedad específica real del agregado grueso (ASTM C127, 2015)	2.953 g/cm ³	n/a
Massa específica aparente del agregado grueso (ASTM C127, 2015)	2.880 g/cm ³	n/a
Absorción del agregado grueso (ASTM C127, 2015)	0.85%	n/a
Gravedad específica real del agregado fino (DNER-ME 084, 1995)	2.974 g/cm ³	n/a
Gravedad específica real del filler (DNER-ME 085, 1994)	2.804 g/cm ³	n/a
Angularidad del agregado grueso* (ASTM D5821, 2017)	100%/100%	100%/100% min.
Angularidad del agregado fino (ASTM C1252, 2017)	49.2%	45% min.
Partículas planas y alargadas (ABNT NBR 5564, 2014)	9.6%	-
Terrones de arcilla (AASHTO T176, 2017)	61.2%	50% min.
Dureza (Los Ángeles) (ASTM C131, 2014)	11.6%	35-45% máx.
Sanidad (ASTM C88, 2018)	2.1%	10-20% máx.
Partículas delezables (AASHTO T112, 2017)	0%	0.2-10% máx.

* 100%/100% significa que 100% del agregado grueso tiene un o más caras fracturadas y que 100% tiene dos o más caras fracturadas



Según la (Tabla 2), los valores de angularidad del agregado grueso y fino son adecuados. El agregado grueso se muestra completamente fracturado, debido a su proceso de producción por chancado, lo que garantiza un alto grado de fricción interna entre las partículas. Ya el agregado fino posee una angularidad superior al mínimo, debido a las caras fracturadas y rugosidad de las partículas. Estas características van a permitir que la mezcla asfáltica tenga una buena resistencia a la deformación permanente. Con relación a la forma de las partículas, la misma es tolerable aun estando cerca del valor máximo; este resultado permite una buena trabajabilidad de la mezcla, evita un consumo elevado de ligante y disminuye la posibilidad de fractura de los agregados durante la compactación. Los resultados del ensayo de equivalente de arena, utilizado para determinar la cantidad de terrones de arcilla, también se mostró satisfactorio, evidenciando que la cantidad de minerales de arcilla que se encuentran en la superficie de los agregados no irán a comprometer la integridad de la mezcla. Los agregados mostraron, también, poco desgaste, medido en la máquina de Los Ángeles, mostrando que las partículas serán resistentes a varios procesos de manipulación como chancado, almacenaje, mezclado, compactación y a las tensiones provenientes del tráfico de los vehículos. En el ensayo de sanidad, los agregados perdieron una cantidad de peso de 2.1%, mostrando elevada resistencia a la desintegración debido al clima. De la misma manera, no fue identificada la presencia de partículas deleznable.

La definición de la curva granulométrica (Figura 4) se basó en los criterios del método Superpave para un tamaño máximo nominal de 19 mm. Así, esta curva se constituyó de 43% de agregado grueso, que pasa por el tamiz $\frac{3}{4}$ " y es retenido en el tamiz N° 4; 15.5% de agregado fino, que pasa por el tamiz N° 4 y es retenido en el tamiz N° 200; 40% de polvo de piedra; y 1.5% de cal.

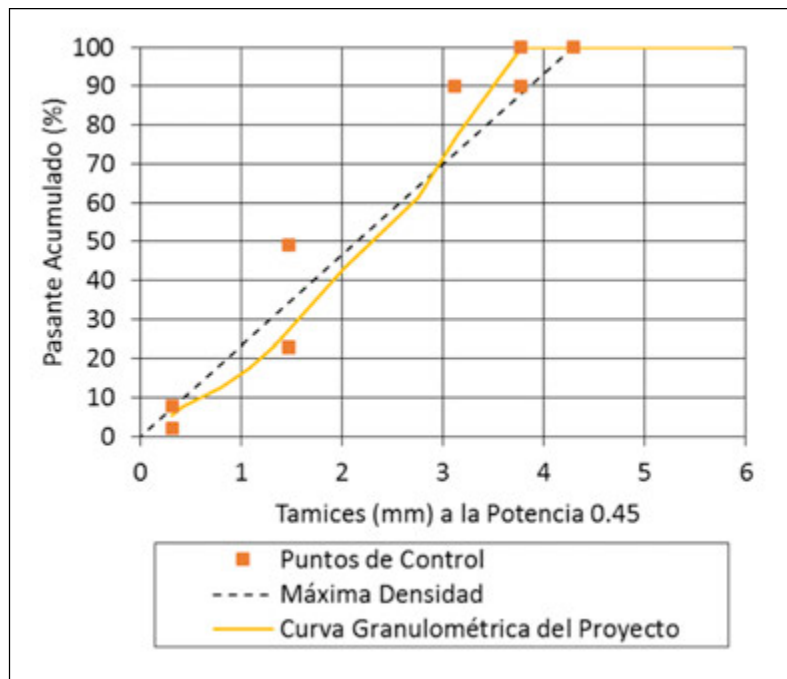


Figura 4. Curva granulométrica

La cal hidratada utilizada es el del tipo CH-I, dolomítica clasificada según la norma (AASHTO M303, 2019) como tipo II. Las características físicas y químicas de este material son mostradas en la (Tabla 3).



Tabla 3. Características físicas y químicas de la cal hidratada

Característica	Valor
Perdida al fuego	18.6%
Residuo insoluble	1.9%
Anhídrido carbónico (CO ₂)	2.5%
Óxido de calcio (CaO)	45.1%
Óxido de magnesio (MgO)	33.5%
Óxidos totales no volátiles (CaO + MgO)	96.5%
Óxidos totales no hidratados	27.6%
Óxidos de CaO no hidratados	0.0%
Calcio (Ca)	32.2%
Magnesio (Mg)	20.2%
Densidad	3.0

3. Método

3.1 Diseño de la mezcla asfáltica

El contenido óptimo de ligante asfáltico de las mezclas fue determinado siguiendo las recomendaciones de las normas (AASHTO M323, 2017) y (AASHTO R35, 2017). La compactación de los testigos cilíndricos, de 150 mm de diámetro, fue realizada en el compactador giratorio Superpave bajo las siguientes condiciones: ángulo de compactación de 1.25°, presión de compactación de 0.6 MPa y velocidad de giro de 30 RPM. El diseño fue realizado para que las mezclas pudieran soportar un volumen de tráfico elevado (Ninicial = 9 giros, Ndiseño = 125 giros e Nmáximo = 205 giros). El contenido óptimo de ligante fue determinado para cumplir los siguientes criterios del método Superpave, para un tamaño máximo de agregado de 19 mm: volumen de aire (Va) en Ninicial > 11%, en Ndiseño = 4% y en Nmáximo > 2%; vacíos en el agregado mineral (VMA) ≥13%; vacíos llenos con asfalto (VFA) entre 65% y 75%; y, relación filler/asfalto entre 0.8 a 1.6. Para el diseño de la mezcla asfáltica fue utilizado el ligante asfáltico convencional.

3.2 Compactación de los testigos cilíndricos para determinar el Traffic Densification Index (TDI)

Después de terminado el diseño de la mezcla asfáltica de referencia, fueron compactados tres testigos cilíndricos, con 150 mm de diámetro e igual contenido óptimo de ligante que el de la mezcla de referencia, para cada una de las tres mezclas estudiadas. En esta etapa, los testigos fueron compactados, en el compactador giratorio Superpave, hasta un número de giros tal que se obtuviera una densificación de 98% de la G_{mm} .

Para calcular el índice TDI fueron determinadas las áreas bajo las curvas de densificación (% G_{mm} vs número de giros) que fueron generadas durante la compactación de los testigos. Las áreas fueron determinadas utilizando la técnica de rectangularización (Figura 5) como mostrado en las (Ecuación 1) y (Ecuación 2) (DNIT 426, 2020).

$$TDI = \sum_{N@92\%G_{mm}}^{N@98\%G_{mm}} A_N \quad (1)$$

$$A_N = \left[\left(\frac{\%G_{mm}@N + \%G_{mm}@(N+1)}{2} \right) \right] - \%G_{mm}@LI \quad (2)$$

Donde: TDI es el Traffic Densification Index; $N@92\%G_{mm}$ es el número del giro equivalente a 92% de la G_{mm} ; $N@98\%G_{mm}$ es el número del giro equivalente a 98% de la G_{mm} ; A_N es el área de un rectángulo N cualquiera; $\%G_{mm}@N$ es el porcentaje de la G_{mm} en un giro N; $\%G_{mm}@(N+1)$ es el porcentaje de la G_{mm} en un giro (N+1); $\%G_{mm}@LI$ es el porcentaje de la G_{mm} en el límite inicial, que en el caso del TDI es de 92%.



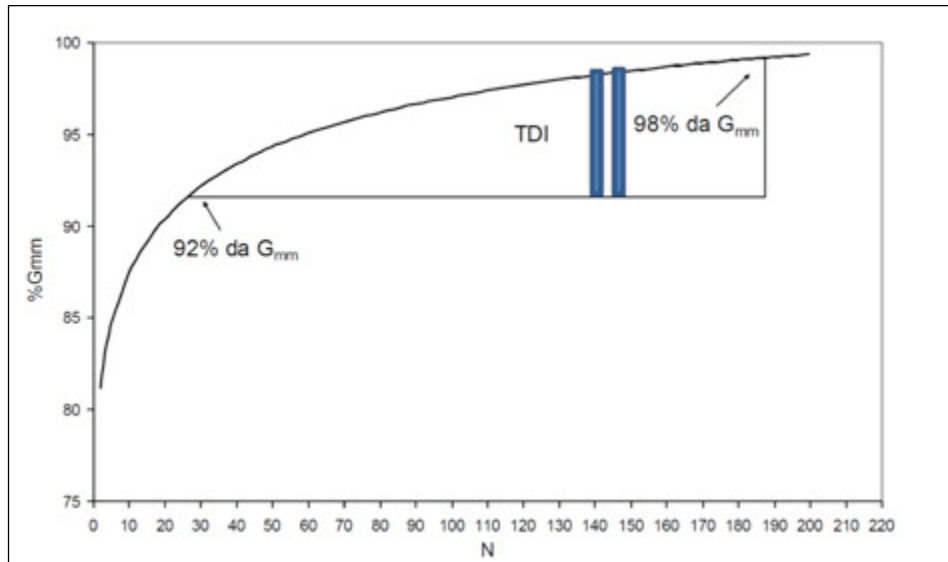


Figura 5. Esquema del método de rectangularización para calcular TDI (DNIT 426, 2020)

3.3 Resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas

La resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas fue determinada en placas rectangulares de 50 x 18 x 5 cm, ensayadas en el simulador de tráfico francés Orniéreur, siguiendo las recomendaciones de la norma francesa (AFNOR NF P98-253-1, 1993). Para el ensayo, fueron compactadas dos placas para cada una de las tres mezclas estudiadas. Las placas fueron producidas con el mismo contenido óptimo de ligante y las mismas características volumétricas obtenidas, en el diseño de mezclas por el método Superpave, para la mezcla de referencia. Las placas fueron compactadas en la mesa compactadora BBPAC del IFSTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux) siguiendo las recomendaciones de la norma francesa (AFNOR NF P98-250-2, 1991).

El ensayo de deformación permanente fue realizado en el simulador de tráfico a una temperatura de 60 °C, mediante el paso de 30,000 ciclos de un eje simple de rueda simple sobre la superficie de las placas aplicando una carga vertical de 5 kN, frecuencia de 1 Hz y presión interna del neumático de la rueda de 0.6 MPa; en este ensayo, el paso de la rueda en ida y vuelta corresponde a un ciclo. La profundidad del ahuellamiento producido por la rueda fue medida a los 100; 300; 1,000; 3,000; 10,000 y 30,000 ciclos en 15 puntos (Figura 6) localizados en la superficie de las placas. El resultado de la deformación permanente total es igual al promedio de las medidas realizadas una vez terminado el ensayo y fue calculado según la (Ecuación 3).

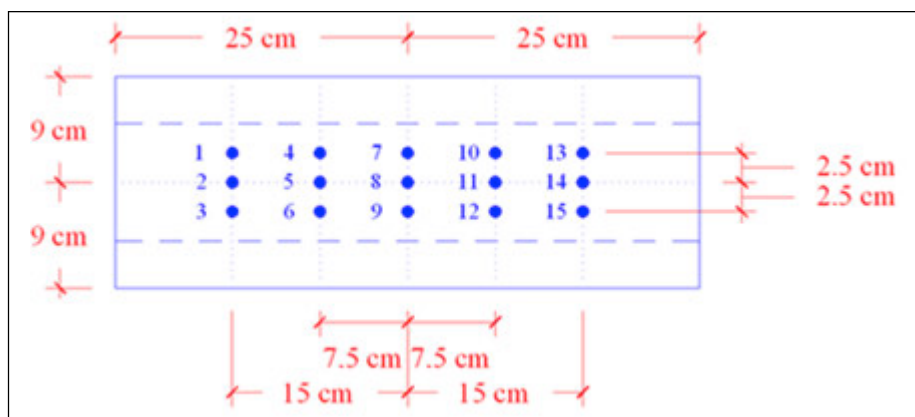


Figura 6. Puntos de lectura del ahuellamiento en las placas de las mezclas asfálticas



$$P_i(\%) = 100 \times \frac{\sum_j (m_{ij} - m_{0j})}{15 \times ES} \quad (3)$$

Donde: P_i % es el porcentaje promedio de ahuellamiento en la superficie de la placa en el ciclo i ; j es el punto de lectura de la deformación permanente, en la placa, que varía de 1 a 15; m_{ij} es la medida de la profundidad, en el ciclo i , del punto j ; m_{0j} es la medida de la profundidad inicial, en el ciclo 0, del punto j ; ES es el espesor de la placa.

3.4 Análisis de la efectividad de uso del índice TDI para la predicción de la deformación permanente de las mezclas asfálticas

Terminado el ensayo de deformación permanente, fue realizado el análisis para relacionar el índice TDI y el ahuellamiento observado en las placas ensayadas. Este análisis fue realizado para evaluar la capacidad que tendría el índice TDI en poder predecir el comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la deformación permanente.

4. Presentación y discusión de resultados

4.1 Diseño de las mezclas

Las curvas de densificación de los testigos cilíndricos, producidos en el compactador giratorio Superpave, son mostradas en la (Figura 7). En la figura, las curvas corresponden a los contenidos de ligante utilizados para el diseño de las mezclas. También se muestra la curva para el contenido óptimo, el cual fue estimado en 4.35%. Este contenido de ligante establecido en el diseño de la mezcla de referencia fue también utilizado para la producción de las mezclas nanomodificadas. En la (Tabla 4) son mostradas las características volumétricas de la mezcla asfáltica diseñada, las cuales se encuentran dentro de los requisitos exigidos por la especificación Superpave.

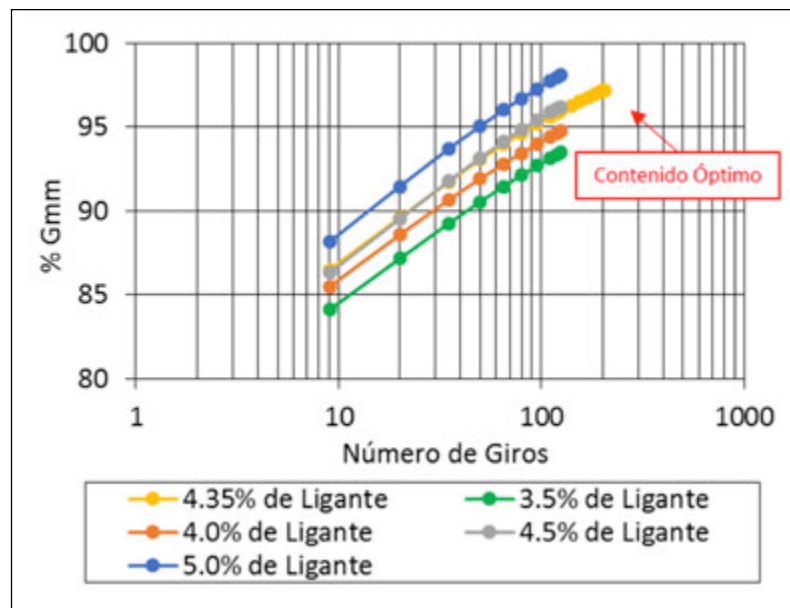


Figura 7. Curvas de densificación de las mezclas asfálticas



Tabla 4. Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica diseñada

Propiedades	Resultados	Criterios de la especificación Superpave
Contenido (%)	4.35	-
% G_{mm} ($N_{inicial}=9$)	86.5	< 89
% G_{mm} ($N_{diseño}=125$)	95.9	= 96
% G_{mm} ($N_{máximo}=205$)	97.2	< 98
G_{mb} ($N_{diseño}=125$) (g/cm^3)	2.577	-
G_{mm} (g/cm^3)	2.685	-
Va (%)	4.01	= 4,00
VMA (%)	14.12	\geq 13.0
VFA (%)	71.57	65-75
Relación filler/asfalto	1.37	0.8-1.6

4.2 Compactación de los testigos para la determinación del TDI

Los valores del índice TDI, calculado según las (Ecuación 1) y (Ecuación 2), para las mezclas de referencia, nanomodificada con NTC y nanomodificada con NA son mostrados en la (Tabla 5).

Tabla 5. Índices TDI para las mezclas asfálticas

Misturas Asfálticas	% Ligante	TDI
Referencia (CAP 50-70)	4.35	1010.7
NA (CAP 50-70 + 3% NA)	4.35	751.37
NTC (CAP 50-70 + 2% NTC)	4.35	757.59

De acuerdo con los resultados de la (Tabla 5), el índice TDI de la mezcla de referencia fue, por lo menos, 25% superior al calculado para las mezclas nanomodificadas. Así, es posible afirmar que la adición de los nanomateriales en el ligante asfáltico generó una reducción en la resistencia a la densificación, mejorando la trabajabilidad de las mezclas y, por consiguiente, se puede concluir que las mezclas nanomodificadas necesitarían de menos energía para ser compactadas al mismo nivel que la mezcla de referencia.

Si se consideran los límites propuestos por (Bahia y Faheem, 2007), las mezclas producidas no cumplirían los requisitos de resistencia a la deformación permanente ya que todos los valores de TDI encontrados fueron menores a 1200. Sin embargo, si se considera el límite mínimo de 400, sugerido por (Nascimento, 2008), todas las mezclas producidas con el contenido óptimo mostrarían un buen desempeño frente a la deformación permanente.

4.3 Resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas

Para poder comparar el comportamiento frente a la deformación permanente, fueron compactadas y ensayadas dos placas de cada tipo de mezcla asfáltica en el simulador de tráfico francés Orniéreur. La (Figura 8) muestra los resultados de la formación del ahuellamiento en función del número de ciclos para las tres mezclas producidas.



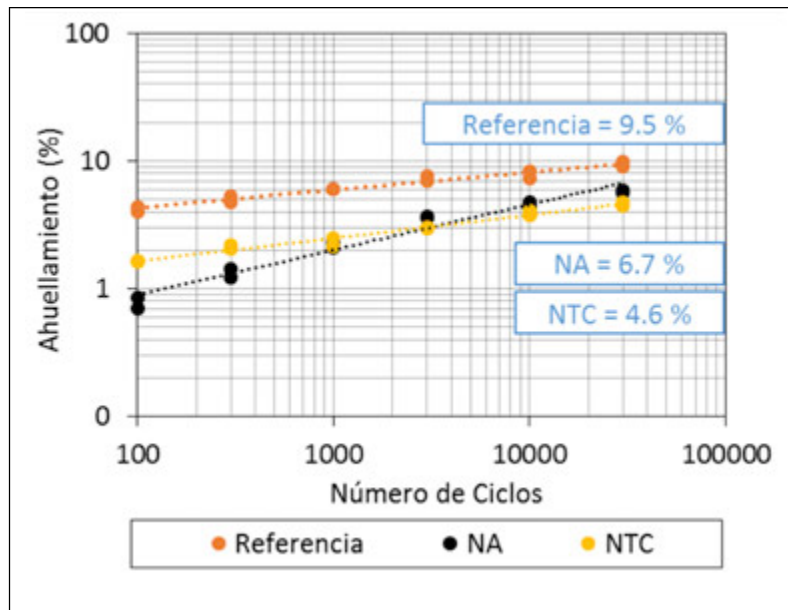


Figura 8. Comparativo del desempeño de las mezclas producidas frente a la deformación permanente

El ahuellamiento en la superficie de la capa del pavimento asfáltico está asociado a diversos factores, en especial a la composición de la granulometría y al diseño adecuado de la mezcla (contenido óptimo del ligante). No obstante, las propiedades del ligante asfáltico influyen directamente en la respuesta de la mezcla frente a la deformación permanente. Partiendo de este enfoque, las diferentes respuestas del comportamiento que son mostradas en la (Figura 8) están relacionadas con las características de los ligantes asfálticos utilizados, ya que el contenido de ligante y la composición granulométrica no fueron alterados. Para poder entender mejor los resultados, la (Tabla 6) muestra la mejora obtenida por los nanocompuestos, mostrada como un porcentaje de la reducción de la deformación permanente, en comparación con la mezcla de referencia, para 30,000 ciclos.

Tabla 6. Reducción de la deformación (30,000 ciclos)

Mezcla asfáltica	Ahuellamiento (%)	Reducción de la deformación (%)
Referencia (CAP 50-70)	9,5	-
NA (CAP 50-70 + 3% NA)	6,7	29,5
NTC (CAP 50-70 + 2% NTC)	4,6	51,6

Como se puede ver en la (Figura 8) y en la (Tabla 6), la mezcla de referencia y las nanomodificadas con NA y NTC, presentan un ahuellamiento de 9.5%, 6.7% y 7.6% a los 30,000 ciclos, respectivamente. La incorporación de 3% de NA y de 2% de NTC en la mezcla causan una reducción de 29.5% y 51.6% de la deformación en comparación con la mezcla de referencia, respectivamente. Según las especificaciones francesas (IFSTTAR), el valor obtenido en el ensayo, para 30,000 ciclos, debe ser de 10%, como máximo, para capas asfálticas (Manuel LPC, 2007); sin embargo, existen especificaciones europeas (European Commission, 1999) que limitan las deformaciones permanentes a 5% para el caso de mezclas densas que fueran a ser usadas como capas asfálticas para niveles de tráfico pesado. Para este segundo caso, solamente la mezcla asfáltica con 2% de NTC cumpliría con esas exigencias.



Así, las mezclas asfálticas con nanocompuestos obtuvieron un mejor desempeño en comparación la mezcla de referencia; y, además, se puede verificar que el NTC es más eficiente que la nanoarcilla para resistir a la deformación permanente; esto cuando la cantidad incorporada es de 2%.

4.4 Análisis de la efectividad del uso del Traffic Densification Index (TDI) para la predicción de la deformación permanente de las mezclas asfálticas

El índice TDI, obtenido a partir de la compactación giratoria para el diseño de la mezcla asfáltica, ha sido considerado por algunos investigadores como adecuado para caracterizar las mezclas partiendo de la hipótesis principal de que el comportamiento del material en este proceso de amasado tiene una correlación con su estabilidad durante la vida útil del material endurecido.

En la (Figura 9) se muestra la correlación obtenida entre el índice TDI y el ahuellamiento en la superficie de las placas de mezcla asfáltica. Esta correlación fue resultado del ensayo de deformación permanente de las placas producidas con CAP 50-70 y con los nanocompuestos NA y NTC.

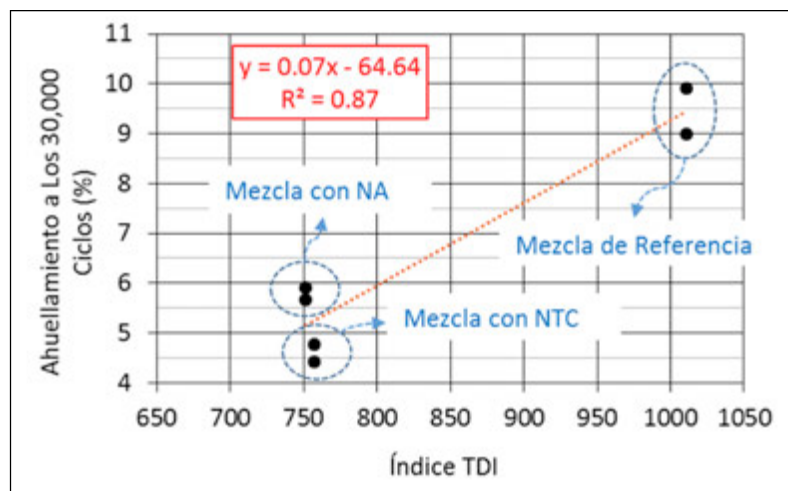


Figura 9. Correlación entre el índice TDI y la deformación permanente de las mezclas asfálticas a 30,000 ciclos

Observando la (Figura 9), se puede notar una buena correlación entre el parámetro TDI y el ahuellamiento para 30,000 ciclos; así, para las dos mezclas con menores valores de TDI les corresponden los menores valores de ahuellamiento, mientras que para la mezcla con mayor valor de TDI le corresponde el mayor valor de ahuellamiento. No obstante, esta relación entre el TDI y la deformación permanente parece ir en contra de las hipótesis defendidas por los autores previamente estudiados, los cuales indican que cuando mayor es el valor del TDI, menor deberá ser la deformación permanente prevista.

De esta forma, los resultados mostrados en la (Figura 9), muestran la falta de eficacia del uso del índice TDI para la predicción de la deformación permanente, cuando se comparan mezclas asfálticas con las mismas granulometrías, pero con ligantes asfálticos distintos; en este caso, convencional y nanomodificados. Eso ocurre porque el proceso de compactación de las mezclas es realizado a altas temperaturas, las cuales son ajustadas para garantizar que los diversos tipos de ligantes asfálticos, inclusive los nanomodificados, tengan la misma viscosidad durante ese proceso. Por esa razón, asociar el índice TDI de forma aislada al comportamiento global de las mezclas asfálticas frente a la deformación permanente es equivocado pues durante la compactación el efecto de la consistencia de los ligantes es casi, completamente, eliminado.

Del mismo modo, a partir de la compactación giratoria, no es posible extraer características reológicas de los ligantes asfálticos como, por ejemplo, módulo dinámico, ángulo de fase, comportamiento elástico, comportamiento no recuperable, etc. Como también, no pueden ser extraídos aspectos relacionados a la adhesividad y afinidad química del ligante con la matriz pétreo, que, en conjunto, van a contribuir para el desempeño frente a la deformación permanente.



Además, es bueno tener en cuenta que el índice TDI, el cual es estimado a partir de la compactación giratoria, está relacionado, principalmente, a la estabilidad del esqueleto pétreo y al contenido de ligante asfáltico, sufriendo poca influencia del tipo de ligante asfáltico. Por lo tanto, el hecho de que las mezclas con los nanocompuestos NA y NTC tengan los menores valores del índice TDI está relacionado únicamente con los nanomateriales, los cuales mejoran la trabajabilidad, ocasionando un efecto lubricante entre las partículas y permiten, en ese caso, que se llegue más fácilmente al nivel de densificación deseado para la mezcla.

5. Conclusión

Las mezclas asfálticas nanomodificadas presentan elevada resistencia a la deformación permanente cuando comparadas a la mezcla asfáltica de referencia producida con ligante convencional sin aditivos. La incorporación de 3% de NA y 2% de NTC en la mezcla, induce a una reducción de la deformación permanente de 29.5% y 51.6%, respectivamente.

El uso del índice TDI se muestra poco eficaz para la predicción de la deformación permanente cuando se comparan las mezclas asfálticas con igual granulometría y diferentes ligantes asfálticos; en este caso ligante asfáltico convencional con ligantes nanomodificados con NTC y NA. De ahí que asociar este índice de forma aislada al comportamiento global de las mezclas asfálticas frente a la deformación permanente es equivocado. A partir de la compactación giratoria, no es posible extraer las características reológicas de los ligantes asfálticos que van a interferir en el comportamiento de la mezcla endurecida frente a la deformación permanente. El índice TDI, estimado a partir de la compactación giratoria, está relacionado principalmente con la estabilidad del esqueleto pétreo, con el contenido de ligante asfáltico, y con la presencia de aditivos que pueden mejorar la trabajabilidad de la mezcla, sufriendo poca influencia de la naturaleza y tipo del ligante asfáltico.

Finalmente, la relación entre el índice TDI y la resistencia a la deformación permanente de las mezclas estudiadas, no demostró resultados resaltantes que puedan servir para predecir el comportamiento de las mezclas nanomodificadas. No obstante, a pesar de no haberse obtenido resultados prometedores en este estudio, los autores creen que no se debe dejar de considerar la posibilidad de correlacionar el índice TDI con el desempeño mecánico frente a la deformación permanente. Se entiende, con base a otros estudios desarrollados, que resultados prometedores pueden estar relacionados con diferentes composiciones granulométricas de las mezclas asfálticas, así como con distintos tamaños máximos nominales de agregados.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Rede Temática do Asfalto/Petrobras por la inversión realizada en el Laboratorio de Pavimentación de la Universidad Federal de Santa Catarina – UFSC, a las agencias CAPES y CNPq por la concesión de la beca de estudios, al Laboratorio Central de Microscopia Electronica – LCME/UFSC y al Nanotec/UFSC por la ayuda para la realización de ciertos ensayos.

7. Referencias

- AASHTO M 323. (2017).** Standard specification for Superpave volumetric mix design. Washington, USA.
- AASHTO M303. (2019).** Standard specification for lime for asphalt mixtures. Washington, USA.
- AASHTO M320. (2017).** Standard specification for performance-graded asphalt binder. Washington, USA.
- AASHTO R 35. (2017).** Standard practice for Superpave volumetric design for hot-mix asphalt (HMA). Washington, USA.
- AASHTO T112. (2017).** Standard method of test for clay lumps and friable particles in aggregate. Washington, USA.
- AASHTO T176. (2017).** Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test. Washington, USA.
- ABNT NBR 5564. (2014).** Via férrea – Lastro ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil.
- AFNOR NF P 98-250-2. (1991).** Essais relatifs aux chaussées - préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques. France.
- AFNOR NF P 98-253-1. (1993).** Préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 1: essai d'orniérage. France.
- Amin, I., El-Badawy, S. M., Breakah, T., Ibrahim, M. H. Z. (2016).** Laboratory evaluation of asphalt binder modified with carbon nanotubes for Egyptian climate. *Construction and Building Materials*, v. 121, p. 361-372. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.168>.
- Ashish, P. K., Singh, D., Bohm, S. (2016).** Evaluation of rutting, fatigue and moisture damage performance of nanoclay modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 341-350. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.057>.
- ASTM C 88. (2018).** Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. USA.
- ASTM C1252. (2017).** Standard test methods for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture and grading). USA.
- ASTM C127. (2015).** Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. USA.



ENGLISH VERSION.....

- ASTM C131. (2014).** Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. USA.
- ASTM D36. (2014).** Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus). USA.
- ASTM D4402. (2015).** Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. USA.
- ASTM D5. (2019).** Standard test method for penetration of bituminous materials. USA.
- ASTM D5821. (2017).** Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate. USA.
- Bahia, H. U., Fahenn, A. F. (2007).** Using the Superpave gyratory compactor to estimate rutting resistance of hot-mix asphalt. Transportation Research Circular EC124, Practical approaches to hot-mix asphalt mix design and production quality control testing, p. 45-61, Washington, USA.
- Bahia, H. U., Friemel, T. P., Peterson, P. A., Russell, J. S., Poehnel, B. (1998).** Optimization of constructibility and resistance to traffic: a new design approach for HMA using the Superpave compactor. *Asphalt Paving Technology, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.*
- DNER-ME 084. (1995).** Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, Brasil.
- DNER-ME 085. (1994).** Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, Brasil.
- DNIT 426. (2020).** Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação dos parâmetros CDI e TDI – Instrução de ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. Brasília, Brasil.
- European Commission. (1999).** Cost 333 development of new pavement design method - Final report of the action. Brussels, Belgium.
- Hasan, Z., Kamran, R., Mohammad, F., Ahmad, G., Hosein, F. (2012).** Evaluation of different conditions on the mixing bitumen and carbon nano-tubes. *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, 12 (6), p. 12-53.
- Jahromi, S. G., Khodaii, A. (2009).** Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials, Elsevier*, v. 23, p. 2894-2904. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.027>.
- Lopes, M. M., Linhares, M., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. L. B. (2011).** Estudo do processo de densificação e da deformação permanente de misturas asfálticas. ANPET. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Mahmoud, A. F. F., Bahia, H. (2004).** Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures. Wisconsin Highway Research Program, Project Number 0092-01-02.
- Manuel LPC. (2007).** Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Groupe de Travail RST "Formulation des Enrobés", p. 199, Paris, France.
- Melo, J. V. S., Trichês, G. (2016).** Evaluation of rheological behavior and performance to permanent deformation of nanomodified asphalt mixtures with carbon nanotubes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 43, p. 472-479. Doi: <https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0546>.
- Nascimento, L. A. H. (2008).** Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de Mestrado, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.
- Onofre, F. C., Bessa, I. S., Castelo Branco, V. T. F., Soares, J. B. (2011).** Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos. *Revista Transportes*, v. 19, n.1, p. 13-22.
- Soares, J. S. (2014).** Investigação da relação entre parâmetros da compactação giratória e de deformação permanente em misturas asfálticas densas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Steyn, W. J., Bosman, T. E., Galle, S., Heerden, V. J. (2013).** Evaluating the properties of bitumen stabilized with carbon nanotubes. *Advanced Materials Research*, v. 723, Trans Tech Publisher, p. 312-319. Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.312>.
- Yao, H., Li, L., You, Z., Shi, X., Goh, S. W., Mills-Beale, J., Wingard, D. (2012).** Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay. *Construction and Building Materials, Elsevier*, v. 35, p. 159-170. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.056>.
- You, Z. et al. (2011).** Nanoclay-modified asphalt materials preparation and characterization. *Construction and Building Materials, Elsevier*, v. 25, p. 1072-1078. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.070>.
- Zare-Shahabadi, A., Shokuhfar, A., Ebrahimi-Nejad, S. (2010).** Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles. *Construction and Building Materials, Elsevier*, v. 24, p. 1239-1244. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.013>.

