

Modelos de comportamiento de adherencia neumático calzada

Marta Beatriz Pagola, pagola@fceia.unr.edu.ar

Oscar Hugo Giovanon, jgiovanon@gmail.com

IMAE Universidad Nacional de Rosario, Berutti y
Riobamba, Rosario

Argentina

En el presente trabajo se muestran los modelos de comportamiento obtenidos para los parámetros macrotextura y coeficiente de fricción, ambos condicionantes de la adherencia neumático calzada que brinda la superficie de rodamiento y permite realizar las maniobras de conducción en forma segura. Las formas de medición consideradas son con equipos estáticos, para la macrotextura medición con Círculo de Arena, y para el coeficiente de fricción con Péndulo de Fricción.

Los modelos han sido desarrollados para:

- Carpeta de rodamiento construida con mezcla asfáltica en caliente de granulometría discontinua tipo MAC F10 con cemento asfáltico modificado con polímero del tipo SBS.
- Agregados pétreos graníticos de la provincia de Buenos Aires.
- Tramos ubicados en autopista con control de acceso y banquetas pavimentadas.
- Superficie limpia, solo contaminada por el polvo ambiental.

En los modelos se muestran:

- Las constantes halladas para los tramos de análisis.
- La sensibilidad frente a variaciones en el tránsito.
- En el modelo de coeficiente de fricción, la relación con los resultados de coeficiente de pulido acelerado de los agregados pétreos.
- En el modelo de macrotextura, el tiempo necesario para alcanzar una macrotextura de 0.4 mm en función del valor inicial y del tránsito.

Palabras clave: adherencia neumático calzada, macrotextura, fricción, modelos.

In the present paper, behavior models for macrotexture and friction are shown, both parameters determines the road adherence that pavement surface gives to users and let them drive safely.

Measurements were made with static equipment, sand patch for macrotexture, and TRRL Friction Pendulum for friction coefficient.

Models have been developed for the following conditions:

- Road surface built with hot asphalt mix, with discontinuous gradation type MAC F10, and modified asphalt cement with SBS type polymer.
- Granitic stone aggregates from Buenos Aires Province.
- Sections located on highway with access control, and paved shoulders.
- Clean surface, only contaminated by environmental dust.

In the models are shown:

- Constants obtained.
- Sensitivity with traffic variations.
- In friction model, the relationship with results of accelerated polishing coefficient of aggregates.
- In macrotexture model, the time needed to reach a 0.4 mm macrotexture based on initial macrotexture value and traffic.

Keywords: road adherence, macrotexture, friction, models.

1. Introducción

Existen en la bibliografía algunos modelos para predecir esta evolución. Ellos fueron desarrollados para ciertos equipos y para condiciones particulares de regiones, climas y tránsito, valorando ambos parámetros: coeficiente de fricción y macrotextura, en forma independiente. No existe ningún modelo que analice el IFI (índice de fricción internacional), sino que fueron analizados por separado los dos parámetros que lo forman, fricción y textura, particularizados para el equipo de medición.

En Argentina, las carpetas de rodamiento asfálticas eran tradicionalmente diseñadas con mezclas asfálticas pensadas para satisfacer criterios estructurales, sin tener en cuenta al usuario y por consiguiente a la seguridad. Recién a partir de la década del 90, cuando se implementó un Sistema de Concesión de rutas donde el Concesionario debía brindar una determinada calidad de servicio a los usuarios, controlada por indicadores de deterioro, comenzaron a incorporarse carpetas de rodamiento consideradas especiales, las cuales pasaron a ser diseñadas para satisfacer las necesidades de los usuarios, fundamentalmente en autopistas y carreteras rápidas con elevado tránsito. A partir de entonces los parámetros relacionados con la adherencia neumático calzada comenzaron a ser tenidos en cuenta.

El presente estudio tiene como objetivo principal cuantificar la variación que presenta la adherencia neumático calzada con el tiempo en servicio bajo tránsito, mostrar los modelos de predicción desarrollados, valorar la sensibilidad de los mismos, y valorar la relación que existe con el tipo de agregado pétreo utilizado.

2. Mediciones realizadas

Se realizaron mediciones periódicas en tramos ubicados en una de las autopistas con mayor tránsito de Argentina, durante 11 años en servicio bajo tránsito.

El coeficiente de fricción se evaluó empleando un péndulo tipo TRRL propiedad de la empresa concesionaria de la ruta, mientras que la macrotextura se midió con Círculo de Arena, utilizando esferas de vidrio. Durante todo el período de mediciones, se dispuso de los mismos equipos de medición y se utilizó idéntica metodología. Los registros se efectuaron sobre la huella izquierda del carril de circulación. [1, 2]

Se definieron 4 sectores de 1000 m para cada carril objeto de seguimiento. Las mediciones se realizaron en siete posi-

ciones dentro de cada sector, separadas en 50 metros y ubicadas en los últimos 300 metros de cada Km. En cada posición se efectuaron 5 mediciones espaciadas entre sí de un metro. En cada oportunidad de ejecución de ensayos se obtuvieron 140 valores en cada carril. A los efectos de definir tendencias a lo largo del tiempo, se trabajó con el valor medio de cada parámetro y para cada carril.

La macrotextura se midió con mayor frecuencia en el primer año de servicio, en cuanto al coeficiente de fricción, las mediciones comenzaron a practicarse luego de un período de servicio de aproximadamente siete meses luego que se gastó la película de material asfáltico que recubría la superficie de los agregados. [3]

3. Características de la carpeta de rodamiento, el clima y el tránsito de los tramos

Para la mezcla asfáltica de la carpeta de rodamiento se utilizó agregado pétreo granítico triturado proveniente de la zona de Olavarría, en el centro de la Provincia de Buenos Aires. En relación a su resistencia al Pulimento acelerado (parámetro muy relacionado con la adherencia neumático calzada), este material tiene un valor inicial sin pulir de 63 y un valor final de 40, esa pérdida o pulido se da progresivamente en el tiempo debido a la acción del tránsito y a la suciedad existente en la superficie, que actúa como abrasivo; o sea, que recién construida la capa, los agregados colaboran a la adherencia neumático calzada con un valor alto, que se va puliendo en el tiempo.

Para la mezcla de agregados se empleó el huso granulométrico F10 de la normativa española.

El cemento asfáltico base empleado fue de penetración 70–100 (1/10 mm), que se modificó en obra con la adición de un 4% de polímero del tipo SBS.

El clima de la zona es templado, caracterizándose por veranos calurosos e inviernos bastante frescos. La temperatura media anual es de 17 °C. El mes más frío es julio, con una temperatura media de 10 °C. Heladas y nevadas se dan en contadas ocasiones. El mes más caluroso es enero, con una temperatura media de 25 °C. Por otro lado, las precipitaciones son de 1100 mm/año.

El tránsito medio diario anual (TMDA) para ambos sentidos de circulación inicial fue del orden de 130000 vehículos. Haciendo un análisis por cada carril, el TMDA y la cantidad de vehículos pesados (VP) varían. Por ejemplo, para el carril rápi-

do interno el TMDA inicial fue 18000 y los VP 100, mientras que para el carril lento externo el TMDA inicial fue 6000 y los VP 3500.

4. Desarrollo de modelos de predicción de la adherencia neumático calzada

En base a los resultados de mediciones obtenidos en estos tramos, se desarrollaron modelos que permiten predecir cuál sería la evolución de los mismos a partir de valores conocidos desde su construcción.

De acuerdo a las bibliografías analizadas, el tránsito tiene distinta influencia según sea el parámetro que se está analizando. La cantidad total de vehículos tiene más influencia en el desgaste superficial debido al pulido de los agregados, por ese motivo el TMDA fue el parámetro incorporado en los modelos de coeficiente de fricción; mientras que la cantidad de vehículos pesados tienen más influencia en el amasado de la mezcla de la carpeta de rodamiento y como consecuencia en la reducción de la macrotextura y así fue considerado en el modelo de macrotextura.

Se aclara que los mismos tienen validez para las condiciones vigentes en los tramos donde se realizó la experiencia, los cuales son: superficie limpia de suciedad (los tramos se encuentran ubicados en autopista sin presencia de accesos laterales y con banquetas pavimentadas), y clima moderado (temperatura moderada, lluvia abundante y sin nieve).

4.1 Modelo de macrotextura

El modelo de evolución de la macrotextura obtenido es:

$$H = H_{ini} - 3.1 \cdot 10^{-6} \cdot edad \cdot \log_{10}(VP_{ini}) - 0.00265 \cdot (edad \cdot VP_{ini} \cdot r)^{0.432} \quad (1)$$

donde H es la macrotextura a una determinada edad en servicio en mm, Hini es el valor inicial de macrotextura en mm, VPini es la cantidad de vehículos pesados por día inicial, edad es la edad en servicio en días y r es la tasa de crecimiento del tránsito.

En la Figura 1 se observan las predicciones del modelo para una misma mezcla, con igual macrotextura inicial y dos volúmenes de tránsito pesado distintos.

Los coeficientes utilizados en la ecuación, son los que minimi-

zaron el error de estimación de la macrotextura aplicando mínimos cuadrados. El error de estimación de la macrotextura de este modelo, calculado en base a los resultados obtenidos en dos tramos, es de 0.07 mm.

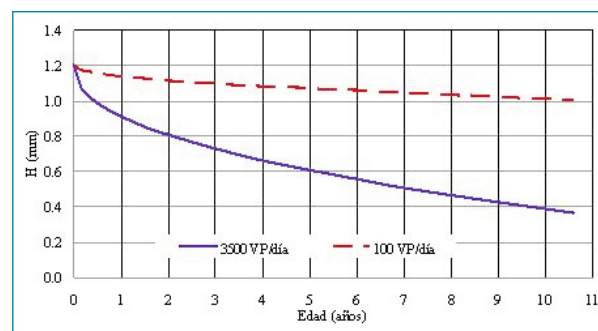


Figura 1: Predicción del modelo de macrotextura, para un H inicial de 1.2 mm, dos volúmenes de tránsito pesado y una tasa de crecimiento de 4%

En base a este modelo desarrollado fue analizada la duración en años que tendría una carpeta antes de alcanzar un valor mínimo de macrotextura de 0.4 mm, partiendo de distintos valores de macrotextura inicial y con distintas intensidades de tránsito pesado. En la Figura 2 se observan los resultados obtenidos para superficies con distinta macrotextura inicial, para una tasa de crecimiento del tránsito de 4%, y tres intensidades de tránsito pesado de 30, 400 y 3000 vehículos pesados por día.

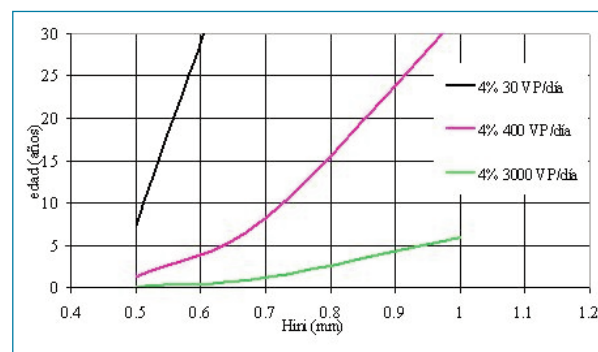


Figura 2: Duración en años antes de alcanzar una macrotextura de 0.4 mm

En este modelo se parte de conocer el valor de macrotextura inicial, aspecto que es difícil de saber antes de construir la carpeta. Como complemento, habría que definir un modelo de predicción de ese valor inicial a partir de las características de los agregados. Pero como en este estudio se trabajó con un único tipo de mezcla asfáltica esa tarea no pudo ser realizada. Para sal-

Modelos de comportamiento de adherencia neumático calzada

var este aspecto, puede utilizarse el modelo desarrollado en el Virginia Tech Transportation Institute [4] que se indica a continuación:

$$Hini = -2.896 + 0.2993 * TMN + 0.0698 * VAM \quad (2)$$

donde Hini es la estimación de la macrotextura inicial, TMN es el tamaño máximo nominal en mm y VAM son los vacíos del agregado mineral en %.

Aplicando este modelo para la mezcla asfáltica de los tramos, con TMN 10 mm y VAM 16%, el Hini estimado es 1.21 mm, lo cual concuerda con el valor inicial obtenido en obra, esto indica que puede ser recomendable su aplicación.

4.2 Modelo de coeficiente de fricción

El modelo de evolución del coeficiente de fricción obtenido es:

$$CRD = CPA * 1.53 - 0.00470 * \left(TMDAini * \left(1 + r \right)^{\left(\frac{edad}{365} \right)} \right)^{0.46} * edad^{0.407} \quad (3)$$

donde CRD es el valor de Péndulo de Fricción a una determinada edad en servicio, CPA es el coeficiente de pulimento acelerado del agregado grueso, TMDAini es el tránsito medio diario anual inicial, edad es la edad en servicio en días y r es la tasa de crecimiento del tránsito.

En forma similar al modelo de macrotextura, los coeficientes utilizados en la ecuación, son los que minimizaron el error de estimación del coeficiente de fricción aplicando mínimos cuadrados. El error de estimación del coeficiente de fricción de este modelo, calculado en base a los resultados obtenidos en dos de los tramos, es de 1.4 CRD.

Los valores de CRD de mediciones de campaña, utilizados para el desarrollo del modelo, se encuentran corregidos a una temperatura de 20°C, de manera de independizarse de la influencia que la misma tiene en los resultados del coeficiente de fricción.

En esta ecuación se observa que el valor inicial del CRD tiene dependencia directa con el CPA del agregado, ya que el otro término depende del TMDA y de la edad, que son iguales a cero en el inicio de la vida de la carretera.

En la Figura 3 se observa la predicción del modelo para dos tramos con CPA igual a 40 y dos intensidades de TMDA, 1500 y 20000.

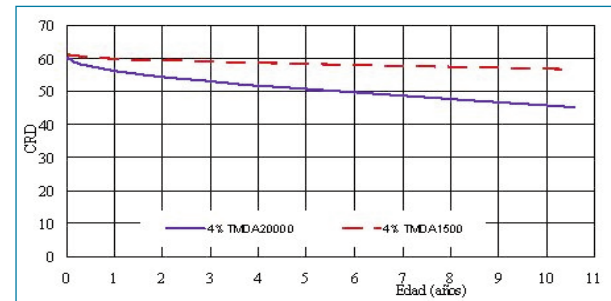


Figura 3: Predicción del modelo de coeficiente de fricción, para un CPA del agregado de 40, dos TMDA y una tasa de crecimiento de 4%

4.3 Modelo de IFI

El IFI se describe como una escala de referencia de la adherencia neumático calzada de la superficie del pavimento, de aplicación internacional. Esta escala fue definida en el Experimento Internacional de Comparación y Armonización de las Medidas de Textura y Resistencia al Deslizamiento organizado por la Asociación Internacional Permanente de Congresos de la Ruta (AIPCR). Las conclusiones del mismo han definido que el IFI se expresa por dos números calculados a partir de las mediciones de coeficiente de fricción y de macrotextura. En la Norma ASTM E 1960 se encuentran indicadas la metodología para el cálculo del IFI y las constantes de algunos equipos de medición. [5]

Este índice se expresa por dos números indicados entre paréntesis y separados por una coma IFI (F60,SP); donde F60 depende del coeficiente de fricción y de la macrotextura, mientras que el valor SP depende únicamente de la macrotextura superficial. Para el caso de medición de parámetros planteada en esta experiencia con Péndulo de Fricción y Círculo de Arena, las ecuaciones aplicadas son:

$$SP = -11.5981 + 113.63 * H \quad (4)$$

$$FR60 = CRD * e^{((10-60)/SP)} \quad (5)$$

$$F60 = 0.07784 + 0.00709 * FR60 \quad (6)$$

donde H es la macrotextura expresada como altura del círculo de arena, en (mm), CRD es el valor del péndulo de fricción, y e es la base de logaritmos neperianos.

Respecto al parámetro F60 no se desarrolló ningún modelo

en particular, lo que se hizo fue calcular la macrotextura y el coeficiente de fricción con los modelos indicados previamente y luego, en base a esos resultados se calculó el F60 que se informaría. Las tendencias obtenidas se muestran en forma gráfica en la Figura 4.

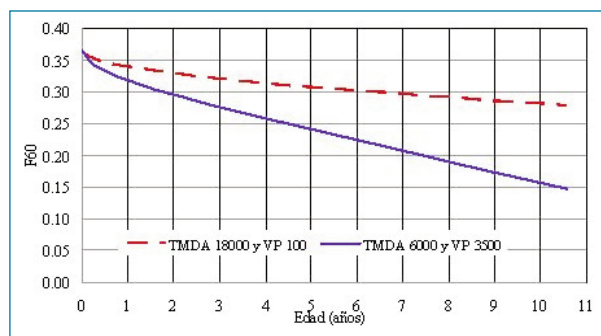


Figura 4: Evolución del F60 calculado a partir de los modelos de macrotextura y coeficiente de fricción

5. Análisis de la influencia del coeficiente de pulimento de los agregados

Como fue indicado previamente, la resistencia al pulimento de los agregados tiene gran influencia en el comportamiento de la superficie de rodamiento respecto a la adherencia neumático calzada.

Cuando se recién se construye la mezcla, los agregados pétreos colaboran a la adherencia neumático calzada con un valor superior al indicado en el ensayo CPA, ya que el material no está pulido. Esa pérdida o pulido se da progresivamente en el tiempo debido a la acción del tránsito y a la suciedad existente en la superficie, que actúa como abrasivo; o sea, que recién construida la capa, los agregados colaboran a la adherencia neumático calzada con un valor alto, que se va puliendo en el tiempo. [6]

5.1 Análisis del CPA de los agregados en Argentina

En Argentina, en estudios previos de los autores, se realizó el análisis de resistencia al pulimento de la mayoría de los agregados procedentes de canteras comerciales que se utilizan en la elaboración de mezcla asfáltica en las rutas del país. [7]

Se han tomado muestras de casi todas las canteras que se encuentran en explotación comercial en la zona Central y Litoral de la Argentina, que es la zona del país más crítica en cuanto a la disposición de agregados, o sea existen pocas fuentes de pro-

ducción de materiales pétreos y es donde existe la mayor concentración de rutas, o sea donde la demanda es mayor. En otras zonas del país existe agregado pétreo a disposición con lo cual la explotación se hace a demanda y en el lugar más cercano a la obra.

Para los agregados más usuales, granitos y basaltos, se analizaron los resultados según origen y su ubicación geográfica, o sea por provincia, con el objetivo de ver si se obtienen respuestas diferenciadas según su ubicación, dado la gran extensión de Argentina, Figura 5.

Desde el punto de vista de su origen mineralógico puede decirse que los agregados graníticos poseen peores CPA (menores valores) que los agregados basálticos.

Del análisis de los resultados obtenidos para los agregados graníticos en las provincias de Córdoba y Buenos Aires se considera que no se observan grandes diferencias ni tendencias muy definidas. En la Provincia de Buenos Aires los granitos ensayados presentan valores de CPA cercanos a 40, mientras en la Provincia de Córdoba, el entorno de resultados se encuentra desplazado hacia valores mayores, siendo todos superiores a 44.

Como se observa en los resultados de la Figura 5, los valores de CPA para los agregados de Argentina son bajos. El agregado utilizado en la carpeta de rodamiento de los tramos analizados es granito proveniente de la Provincia de Buenos Aires y tiene un valor de coeficiente de pulimento acelerado CPA igual a 40.

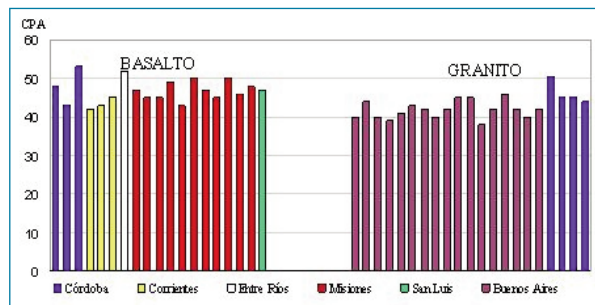


Figura 5: Resultados CPA para canteras comerciales de la zona Central y Litoral de la Argentina

Según las especificaciones técnicas de muchos países, el mismo no podría ser utilizado en carpetas de rodamiento. Pero el análisis de materiales muestra que no hay materiales disponibles que satisfagan valores más altos, excepto si se trabaja con basaltos. Siendo esto un problema, ya que muchos de los basaltos estudiados poseen alto riesgo de meteorización, con lo cual su uso no es posible para carpetas de rodamiento.

A pesar de estos resultados, los agregados se utilizan, y el aná-

lisis del comportamiento de las superficies con estos materiales fue uno de los objetivos del presente estudio.

Para valorar el aporte de los agregados estudiados en su estado virgen, sin uso, se les realizó la valoración con Péndulo de Fricción sobre las pastillas de pulimento acelerado, antes de someterlas a pulido. Para el agregado utilizado en los tramos, el valor inicial fue de 63. Esto indica que la relación entre virgen y pulido es de 1.58.

5.2 Análisis del desgaste en la producción de la mezcla

En otros estudios previos, se analizó si el proceso de elaboración de la mezcla generaba algún desgaste y/o pulido superficial en los agregados. Para eso, se utilizó como procedimiento de desgaste el ensayo Micro Deval (MDE). Este ensayo provee la resistencia a la abrasión superficial de los agregados pétreos, sometidos a la acción de la abrasión que se produce entre las partículas de agregados y pequeñas esferas de acero en presencia de agua. Se tomó este ensayo, asumiendo que el roce entre partículas que se produce en el ensayo es similar al que se produce en el tambor secador mezclador de la planta asfáltica.

Una vez producido el desgaste MDE se valoró el coeficiente de fricción de igual manera que se realiza en el ensayo de pulimento acelerado, o sea utilizando el péndulo de fricción. Como se muestra en la Figura 6, el CRD posee variación respecto al material virgen y es distinto del coeficiente después del ensayo CPA. Se están manifestando entonces tres valores de CRD correspondientes a tres momentos en la vida de los agregados: un valor virgen que se corresponde al material cuando se recibe el material de cantera, un valor MDE que representa al agregado recién colocado luego del proceso de fabricación de la mezcla asfáltica y un valor CPA que es el valor que tendrá el agregado después de un cierto tiempo en servicio bajo la acción del tránsito y el clima.

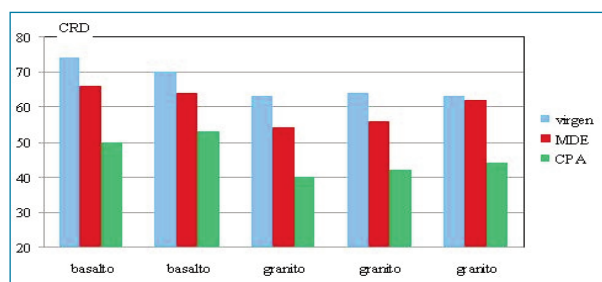


Figura 6: Resistencia a la fricción del agregado en distintos momentos de su vida

En función de ese análisis puede decirse que el CRD del agregado al momento del inicio de vida de la carretera estará comprendido entre el valor virgen y el valor después de MDE. Para el agregado utilizado en los tramos del estudio, los valores correspondientes a los tres estadíos son: 63, 54 y 40.

5.3 Análisis

En el modelo de evolución del CRD desarrollado (ecuación 3), el coeficiente que acompaña al CPA es 1.53, lo cual diría que para un agregado con desgaste CPA igual a 40 el valor inicial de CRD de la carretera sería de 61.2.

Según los resultados de los agregados mostrados en los puntos previos, el valor inicial de coeficiente de fricción de la carretera se encontraría entre el correspondiente al valor del agregado virgen, 63, y del agregado desgastado en la producción de la mezcla, 54.

Esto estaría indicando:

- No se comporta con el valor virgen, sino con un valor menor.
- El valor indicado por el modelo está comprendido entre el valor virgen y el valor después del MDE.
- Parece ser que el ensayo MDE produce un mayor desgaste que la producción de la mezcla o que sea una particularidad de la técnica de producción utilizada.
- Habría que controlar con otros procesos de producción.

6. Conclusiones

Se han desarrollado modelos de predicción de la macrotextura medida con Círculo de Arena y del coeficiente de fricción medido con el Péndulo de Fricción TRRL. El modelo de macrotextura puede ser complementado con el modelo de predicción de la macrotextura inicial a partir de las características de los agregados del Virginia Tech Transportation Institute.

Se aclara que los modelos desarrollados tienen validez para las condiciones vigentes en los tramos donde se realizó la experiencia: superficie sin suciedad (estos tramos se encuentran ubicados en autopista sin presencia de accesos laterales y con banquetas pavimentadas), clima moderado, temperatura moderada, lluvia abundante y sin nieve.

Se puso de manifiesto que los agregados colaboran al coeficiente de fricción inicial de la carpeta con un valor superior

al indicado en el ensayo de pulimento acelerado, pero que es menor que el coeficiente obtenido para un agregado virgen debido al desgaste producido en la elaboración de la mezcla asfáltica.

Para el agregado utilizado en los tramos del estudio, el desgaste superficial producido en el ensayo MDE es superior al producido durante la elaboración de la mezcla asfáltica.

5. Referências bibliográficas

[1] IRAM 1555. Determinación del coeficiente de resistencia al deslizamiento con el péndulo TRRL.

[2] IRAM 1850. Método de determinación de la profundidad de la macrotextura superficial de un pavimento mediante el círculo de arena.

[3] Esteban, D., Páramo, J., Pagola, M., Vilicich, G. y Represas, A. "Evolución del comportamiento de carpeta de rodamiento tipo F10 en 11 años de servicio bajo tránsito en autopista". XVI Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

[4] Flintsch, G., De León, E., McGhee, K. y Al-Qadi, I. "Pavement surface macrotexture, measurement and application". TRB Annual Meeting. 2003.

[5] ASTM E 1960. Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface.

[6] Hosking R. (1992). Road aggregates and skidding. Transport Research Laboratory.

[7] Pagola, M., Giovanon, O., Ruiz, M., Natchygal, G. y Santamaría, E. "Caracterización de agregados pétreos para ser utilizados en mezclas asfálticas". 1er Congreso Argentino de Áridos, Mar del Plata, Argentina, 2008.