



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS MEDIANTE COEFICIENTE DE FRICCIÓN OBTENIDO EN LA RODERA EXTERNA Y AL CENTRO DEL CARRIL.

Domingo Pérez Madrigal¹, Luis Enrique Segura Mendez², Ángel Contreras Morales³

¹YUTAVE Ingeniería, Veracruz, México. domingopm@yutave.com. ²YUTAVE Ingeniería, Veracruz, México. luisesequera@yutave.com. ³YUTAVE Ingeniería, Veracruz, México. angelcm@yutave.com

Resumen

La determinación del coeficiente de fricción se debería de realizar perennemente en la rodera externa (derecha) del carril, debido a que dicha zona tiene las características superficiales más desfavorables, sin embargo, se ha podido evidenciar en la práctica profesional, que varios de los que ejecutan estas mediciones lo realizan en el centro del carril. En este artículo se presentan los resultados de la investigación realizada con respecto a la variación e influencia de la trayectoria realizada por el equipo de rueda oblicua tipo Mu meter MK6, para la determinación del coeficiente de fricción. Para la realización de esta investigación se realizaron mediciones en tres tramos de dos kilómetros, cuyas características superficiales, geométricas y flujo vehicular difieren entre sí, para la determinación del coeficiente de fricción se realizaron las mediciones a una velocidad promedio de 65 km/h, y obteniendo valores a cada 20 metros en la rodera externa y al centro del carril, manteniendo las mismas condiciones entre ambas mediciones para cada tramo. A través de análisis estadísticos se realizó una prueba de diferencia de medias, con la prueba t de Student y graficas de probabilidad de ocurrencia en el software Minitab, con los datos obtenidos en la superficie de cada tramo, variando la trayectoria recorrida por el equipo, con lo cual se determinó que existe una diferencia significativa en los valores con respecto a la zona de medición, con lo que se demostró que el efecto del pulimiento es mayor con respecto al centro del carril, es por ello la importancia de realizar las mediciones en las roderas, ya que estas zonas son las que cuentan con menor coeficiente de fricción debido al desgaste de los agregados al estar en contacto con los neumáticos, añadiendo a esto, el agua de lluvia que podría acumularse debido a la formación de roderas lo cual contribuye aún más a la pérdida de contacto entre el neumático el pavimento.

Palabras clave: Auscultación, Fricción, Pulimiento, Deslizamiento

1. Introducción:

La adherencia neumática – pavimento es un factor indispensable en la seguridad de los vehículos al transitar sobre una superficie de pavimento, debido a que permite mantener el control del vehículo, además de las distancias de frenado necesarias sobre todo en condiciones de lluvia [1]. Esta adherencia depende principalmente de la Microtextura y Macrotextura, donde la primera se refiere a las asperezas y angularidades de las partículas del agregado pétreo, mientras que la Macrotextura se refiere a las oquedades existentes entre los agregados pétreos que conforman la capa de rodadura [2,3].

Actualmente el coeficiente de fricción (CF) es uno de los estándares de mayor importancia en la auscultación de carreteras, ya que, valores de fricción adecuados están directamente relacionados a la seguridad de los usuarios. Para coeficientes de fricción bajos existen riesgos de deslizamiento por lo que se incrementa la probabilidad de accidentes, principalmente en condiciones de lluvia. En el caso



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

de valores de CF muy altos, la superficie se torna demasiado áspera por lo tanto la contaminación por ruido y el desgaste de los neumáticos es mucho mayor [4,5].

La fricción presente en la superficie de un pavimento disminuye considerablemente debido, por una parte, a que los agregados expuestos al contacto con los neumáticos son susceptibles al desgaste, por lo que la Microtextura y Macrotextura se ven reducidos por el continuo paso de los vehículos, además de los efectos del ambiente que contribuyen a su intemperización y, por lo tanto, favorecen el pulimiento. [6, 7,8]. El grado de pulido de los agregados dependerá de las características mineralógicas y del flujo vehicular [9].

Existen diversos equipos y métodos utilizados para determinar el coeficiente de fricción, los cuales se clasifican principalmente por el rendimiento al momento de medir, donde aquellos que realizan mediciones de forma estática y puntual son considerados como de bajo rendimiento, mientras que los equipos que miden de forma dinámica y a velocidades comparables a las de operación se denominan como de alto rendimiento. [10,2].

En México actualmente es el equipo más empleado para determinar el coeficiente de fricción de un pavimento es el de rueda oblicua tipo Mu Meter [11], el equipo de prueba es remolcado a velocidad constante y cuenta con dos ruedas de ensayo con ángulo de esviaje con respecto a la dirección del movimiento, un sistema de riego se encargará de proporcionar una película de agua de 0.5 mm frente a los neumáticos de medición, obteniendo así el coeficiente de fricción de acuerdo a la normativa aplicable [12,13].

1.1 Objetivo

Determinar la variabilidad de los valores de coeficiente de fricción para una misma superficie de pavimento al cambiar la trayectoria del equipo de medición, utilizando el Mu meter MK6 para medir la fricción en la rodera derecha y al centro del carril, en tramos propuestos.

2. Análisis estadísticos de datos

2.1. Medición del coeficiente de fricción con equipo de rueda oblicua tipo Mu meter MK6

Se llevo a cabo la determinación del coeficiente de fricción con el equipo Mu meter MK6 en tres tramos carreteros: 1) Libramiento Cardel, 2) Tamarindo – Cardel y 3) APP. Coatzacoalcos – Villahermosa, ubicados en el estado de Veracruz. Las mediciones se realizaron en el carril de baja velocidad, las zonas evaluadas fueron al centro del carril y en la rodera derecha a una velocidad promedio de 65 km/hr, de acuerdo a lo indicado en la normativa M-MMP-4-07-010/17 “Determinación del coeficiente de fricción con equipo de rueda oblicua”. En la Tabla 1 se muestran los datos obtenidos de las mediciones del coeficiente de fricción para cada tramo en la rodera derecha y al centro del carril.

Con el objetivo de realizar las evaluaciones bajo las mismas circunstancias para cada tramo, las mediciones se realizaron el mismo día.

Tabla 1. Coeficientes de fricción medidos en los tramos de estudio

Tramo	Coatzacoalcos - Villahermosa		Libramiento José Cardel		Tamarindo – José Cardel	
	Rd	Cc	Rd	Cc	Rd	Cc
km	μ	μ	μ	μ	μ	μ
0+000	0.52	0.58	0.66	0.64	0.55	0.60



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

0+100	0.42	0.53	0.51	0.65	0.58	0.64
0+200	0.48	0.56	0.36	0.55	0.58	0.64
0+300	0.47	0.58	0.53	0.65	0.56	0.64
0+400	0.50	0.59	0.34	0.69	0.55	0.63
0+500	0.49	0.60	0.54	0.70	0.56	0.63
0+600	0.49	0.59	0.62	0.72	0.57	0.63
0+700	0.50	0.57	0.61	0.72	0.56	0.63
0+800	0.47	0.55	0.63	0.71	0.55	0.63
0+900	0.48	0.59	0.55	0.69	0.58	0.65
1+000	0.45	0.54	0.49	0.67	0.57	0.66
1+100	0.53	0.59	0.63	0.70	0.54	0.64
1+200	0.51	0.59	0.60	0.66	0.53	0.63
1+300	0.49	0.59	0.58	0.59	0.56	0.63
1+400	0.50	0.56	0.42	0.60	0.54	0.62
1+500	0.50	0.56	0.55	0.62	0.57	0.63
1+600	0.49	0.56	0.58	0.64	0.54	0.65
1+700	0.44	0.58	0.48	0.48	0.53	0.61
1+800	0.49	0.57	0.54	0.53	0.52	0.62
1+900	0.53	0.60	0.47	0.57	0.56	0.62
2+000	0.49	0.61	0.55	0.58	0.55	0.60

*Rd: Rodera derecha, Cc: Centro del carril

2.2. Prueba de normalidad

Para determinar el método estadístico más adecuado para el análisis de los datos de coeficiente de fricción obtenidos, se realizó una prueba de normalidad para cada tramo, utilizando un método gráfico y uno estadístico. Estas pruebas se realizaron con el objetivo de determinar si el conjunto de datos tiene una distribución normal. Como primera prueba de normalidad se realizó un método gráfico y como segundo método se llevó un análisis de normalidad mediante contraste de hipótesis, para lo cual se usó la prueba de Shapiro Wilk. A continuación, se presentan las gráficas de normalidad para cada tramo.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

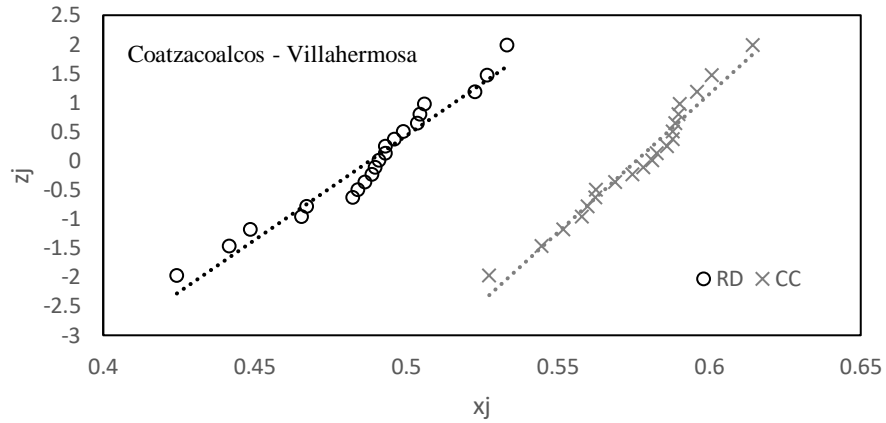


Figura 1 Gráfica de normalidad tramo Coatzacoalcos - Villahermosa

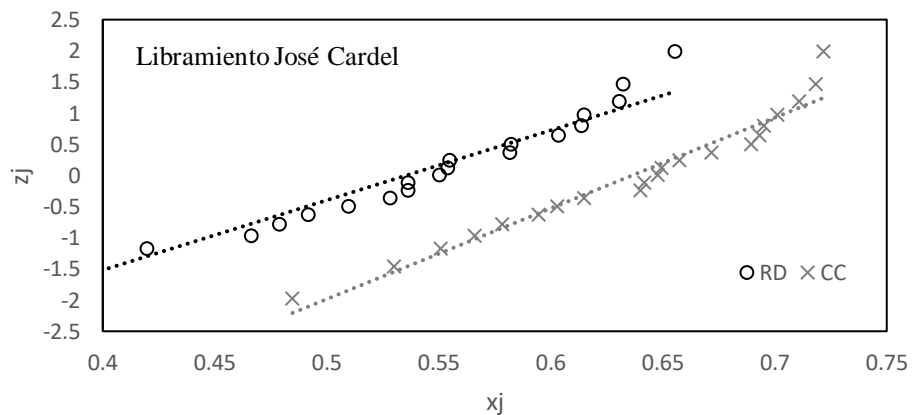


Figura 2. Gráfica de normalidad tramo Libramiento José Cardel

Con el método gráfico se observa que los datos mantienen una alineación rectilínea cercana a la diagonal del gráfico, por lo que se puede decir que los datos presentan una distribución normal. Se observa que los datos mantienen una diferencia notable entre las mediciones realizadas en la rodera derecha y al centro del carril, por lo que el efecto del pulimiento es notorio.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

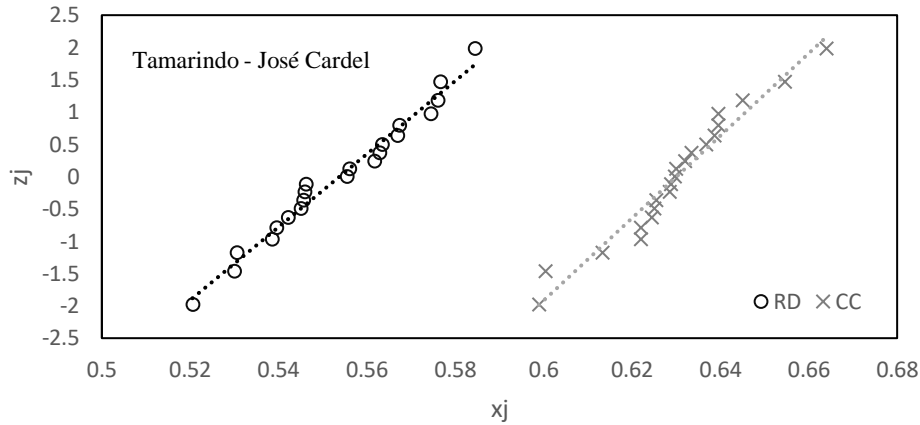


Figura 3 Gráfica de normalidad tramo Tamarindo - José Cardel

Debido al tamaño de la muestra es posible utilizar el método de Shapiro – Wilk ($n < 50$) se utilizó como análisis de normalidad mediante el contraste de hipótesis. Este método consta de plantear la hipótesis nula (ecuación 1) plantea que los datos se ajustan a una distribución normal, mientras que la hipótesis alternativa (ecuación 2) sostiene que la distribución no es normal. Se calculó la media y la varianza para cada conjunto de datos y el valor de significancia se estableció de 0.05. Se muestran en la Tabla 2 los resultados obtenidos de la prueba de normalidad.

$$H_0: X_i \approx N(\mu, \sigma^2) \quad (1)$$

$$H_1: X_i \neq N(\mu, \sigma^2) \quad (2)$$

Donde:

H_0 : Es la hipótesis nula (la distribución es normal)

H_1 : Es la hipótesis alternativa (la distribución no es normal)

Tabla 2. Resultados obtenidos de la prueba de Shapiro Wilk

Tramo	Coahuila de Zaragoza Villahermosa		- Libramiento José Cardel		Tamarindo – José Cardel	
	Rd	Cc	Rd	Cc	Rd	Cc
	μ	μ	μ	μ	μ	μ
SWc	0.948	0.969	0.933	0.943	0.973	0.957
SWt	0.908	0.908	0.908	0.908	0.908	0.908
p-value	0.306	0.713	0.156	0.249	0.794	0.461



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

Donde:

SWc: Coeficiente de correlación calculado.

SWt: Coeficiente de correlación mínimo requerido.

p-value: Valor P de verdadera significancia del coeficiente SWc.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la prueba, se observa que la correlación calculada es mayor a la correlación mínima necesaria, además de que el valor P de verdadera significancia para todos los casos es mayor al valor de significancia de 0.05 empleado para la prueba, por lo tanto, no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula, por lo que los valores de fricción medidos de cada conjunto de datos se ajustan a una distribución normal.

2.3. Análisis de diferencia de medias entre dos grupos

El análisis realizado para determinar la diferencia entre la media de dos conjuntos de datos se realizó mediante la prueba T de Student, la cual nos permite comparar la media de dos grupos de datos y determinar si son significativamente diferentes entre sí. Esta prueba se utiliza bajo los requerimientos de que la distribución es normal y que las muestras son independientes.

El método establece una hipótesis nula (ecuación 3), la cual establece que no hay diferencias significativas en la media de las muestras independientes y una hipótesis alternativa (ecuación 4) que acepta que hay diferencias significativas.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (3)$$

$$H_0: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (4)$$

La ecuación 5 representa el estadístico de prueba

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_c^2}{n_1} + \frac{S_c^2}{n_2}}} \quad (5)$$

Donde: \bar{x}_1 y \bar{x}_2 son las medias de cada conjunto de datos, S^2_c es la varianza común, n_1 y n_2 se refiere al número de elementos de cada conjunto, t es el estadístico t calculado.

La varianza común es calculada a través de la ecuación 6

$$S_c^2 = \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (6)$$

Donde S_1 y S_2 , se refiere a las varianzas de cada grupo.

La hipótesis nula se rechazará cuando el valor absoluto calculado sea mayor que el valor crítico obtenido con la siguiente expresión (ecuación 7):

$$t > t_{(1-\frac{\alpha}{2}), (n_1+n_2-2)} \quad (7)$$

De la prueba T de Student se obtuvieron los siguientes resultados que se presentan en la Tabla 3.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Tabla 3. Resultados obtenidos de la prueba t de Student

Tramo	Coatzacoalcos - Villahermosa		Libramiento José Cardel		Tamarindo - José Cardel	
	Rd	Cc	Rd	Cc	Rd	Cc
Media	0.488	0.576	0.535	0.636	0.55	0.63
Varianza	0.00073	0.00042	0.00737	0.00443	0.00	0.00
Estadístico t	-11.88		-4.25		-15.13	
p valor	1.08E-14		1.23E-04		3.80E-18	
Valor crítico de t	2.02107539		2.02107539		2.02107539	
α	0.05		0.05		0.05	

Como se muestra en los resultados obtenidos de la prueba de diferencia de medias t de student para cada tramo, se obtuvo que el p valor es menor que el valor de $\alpha:0.05$ establecido por lo que indica que para los valores obtenidos al centro del carril y en la rodera derecha cumplen con la hipótesis alterna, debido a que existen diferencias significativas entre las medias de los grupos.

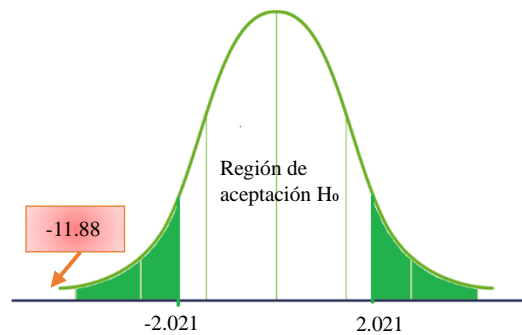


Figura 4. Gráfica de la distribución t de Student, Tramo Coatzacoalcos – Villahermosa

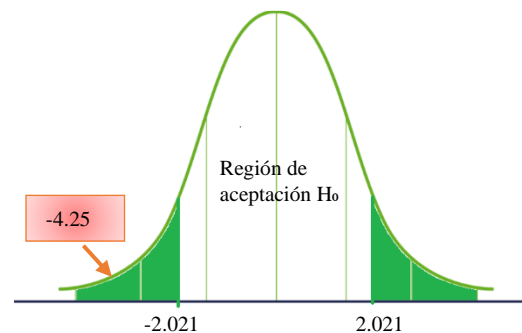


Figura 5. Gráfica de la distribución t de Student, Tramo Libramiento José Cardel



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

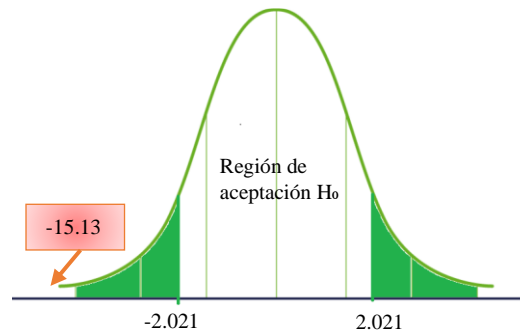


Figura 6. Gráfica de la distribución t de Student, Tramo Tamarindo - José Cardel

2.4 Gráficas de probabilidad en Minitab

Con el uso del software de Minitab se realizaron gráficas de probabilidad entre los datos obtenidos para la rodera derecha y centro de carril, de la Figura 7 a la 9 se observan las gráficas obtenidas, donde ambas presentan una distribución normal, sin embargo, es notorio la diferencia de valores de coeficiente de fricción de una con respecto a la otra.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

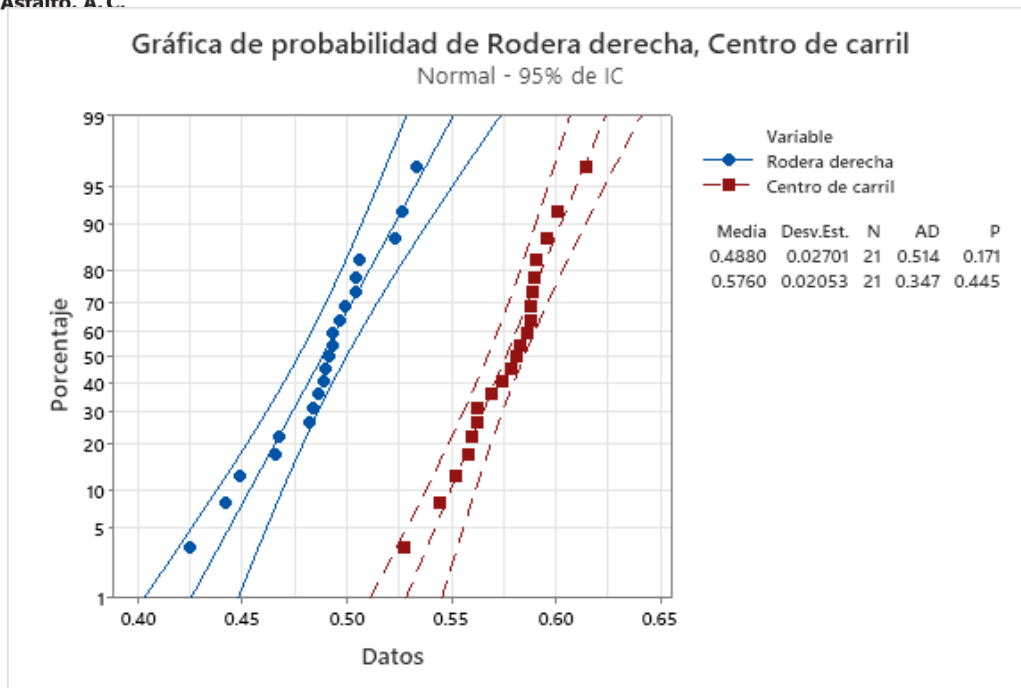


Figura 7. Gráfica de probabilidad de ocurrencia de la distribución normal. Tramo Coatzacoalcos - Villahermosa

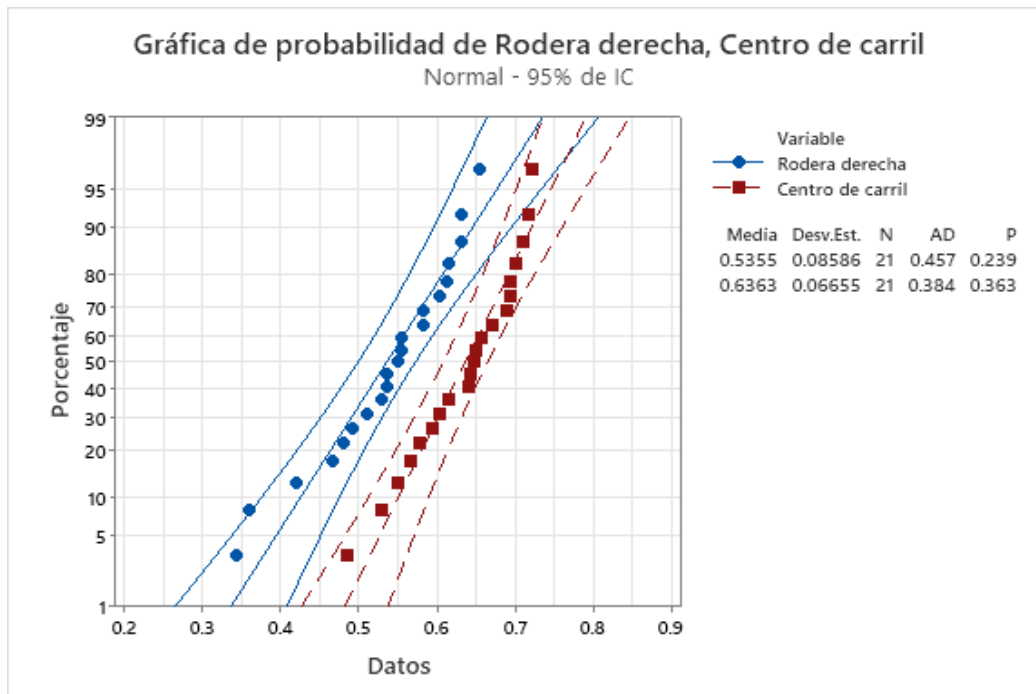


Figura 8. Gráfica de probabilidad de ocurrencia de la distribución normal. Tramo Libramiento José Cardel



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

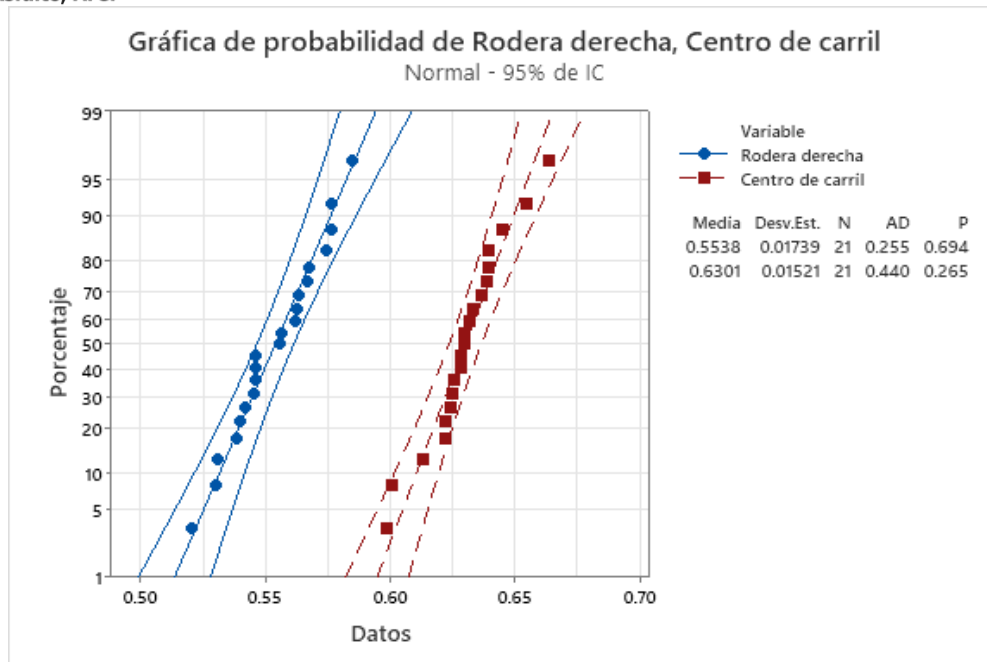


Figura 9. Gráfica de probabilidad de ocurrencia de la distribución normal. Tramo Tamarindo - José Cardel

3. Conclusiones

El coeficiente de fricción presente en la capa de rodadura influye directamente en la seguridad de los usuarios al circular sobre las carreteras, sobre todo en situación de lluvia que representa la condición de tránsito más desfavorable. La acumulación de agua en las roderas formadas debido al continuo paso de los vehículos, provocan que, la fricción se reduzca a niveles inseguros y peligrosos para los usuarios.

Los agregados pétreos que conforman la capa de rodadura están continuamente expuestos a los efectos del ambiente y al volumen de tránsito que circula diariamente, es por ello que la superficie que se encuentra constantemente en contacto con los neumáticos tiende a sufrir un proceso de pulimiento acelerado respecto a las zonas que no lo están. Por lo tanto, los materiales empleados para la elaboración de la capa de rodadura determinarán la capacidad de mantener los valores de Microtextura y Macrotectura.

Las pruebas de normalidad realizadas, indican que los datos obtenidos para cada zona de estudios mantienen una distribución normal tanto por el método gráfico como con el método de Shapiro Wilk donde los niveles de correlación sobrepasaron el 93%. En la prueba grafica es apreciable la disparidad entre los coeficientes de fricción determinados en la rodera derecha y al centro del carril. Para demostrar lo anterior se realizó una prueba estadística de diferencia de medias entre dos grupos, utilizando la prueba t de Student, donde los valores calculados de t sobrepasaban a los valores t críticos, además de la prueba realizada en el software de Minitab a través de las gráficas de probabilidad de ocurrencia donde los datos mantienen una distribución normal, demostrando que existe una diferencia significativa entre los datos obtenidos para la rodera y el centro del carril, evidenciando que el proceso de pulimiento es mayor.



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

Por lo tanto, las mediciones realizadas para la determinación del coeficiente de fricción deben realizarse en la zona más crítica siendo esta la rodera externa y manteniendo el equipo en todo momento en la trayectoria de la rodera, ya que, si el equipo de medición mueve su trayectoria hacia otra zona distinta, los valores de coeficiente de fricción se verán afectados y en consecuencia no pueden ser representativos de las condiciones reales de la superficie evaluada. Del mismo modo cabe destacar la importancia en la selección de materiales para la construcción de la capa de rodadura, ya que la composición mineralógica de los materiales, dictaminará la resistencia al pulimento que presenten los agregados, así como la velocidad en la que la resistencia al deslizamiento se verá disminuida.

4. Referencias

- [1] Arriaga M.C. y Garnica P. (1998). Diagnóstico de las características superficiales de los pavimentos, Instituto Mexicano del Transporte. ISSN 0188-7297.
- [2] Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M. and Nejad, F. (2016) Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 6, 537-565. doi: 10.4236/ojce.2016.64046.
- [3] Hogervorst, D. (1974). Some properties of crushed stone for road surfaces. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* **10**, 59–64. <https://doi.org/10.1007/BF02634635>
- [4] Pérez A. y López G. Auscultación de carreteras nacionales y evaluación superficial en carreteras. Instituto Mexicano del Transporte. 16 de dic. De 2020. [video en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=L145LU-HuQw>
- [5] Alexandros G. Kokkalis, Olympia K. Panagouli, Fractal Evaluation of Pavement Skid Resistance Variations. I: Surface Wetting, Chaos, Solitons & Fractals, Volume 9, Issue 11, 1998, Pages 1875-1890, ISSN 0960-0779, [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(97\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(97)00138-0).
- [6] Flores M., Gómez J. (2010). Evaluación de la evolución del coeficiente de fricción en tramos carreteros del estado de Coahuila. Instituto Mexicano del Transporte.
- [7] Roco V., Fuentes C., & Valverde S. Evaluación de la resistencia al deslizamiento en pavimentos chilenos. Gauss S.A.
- [8] Gaete R., De Solminihaç H., Echeverría G. Estudio de la resistencia al deslizamiento en pavimentos asfálticos en Chile. *Revista de Ingeniería en Construcción*. No.4. pp. 41-76 [En línea]
- [9] Pérez A., López G. y Franco M. (2021). Valor del pulimento acelerado en los agregados del país. Instituto Mexicano del Transporte. no.192. Disponible en: [Resumen boletines - Instituto Mexicano del Transporte \(imt.mx\)](#)
- [10] N·CSV·CAR·1-03-007/17. Determinación del Coeficiente de Fricción (CF). Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Coyoacán 1895, CD MX.
- [11] López G., Pérez A., Garnica P., Ramírez A. y Robles N. (2016). Modelo de ajuste para la determinación del índice internacional de fricción (IFI) en carreteras mexicanas con equipo Mu-meter. Instituto Mexicano del Transporte. No. 163. Disponible en: [Resumen boletines - Instituto Mexicano del Transporte \(imt.mx\)](#)
- [12] ASTM E 670-94. Estándar Test Method for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter. American Society For Testing and Materials.
- [13] N·MMP·4-07-010/17. Determinación del Coeficiente de Fricción con Equipo de Rueda Oblicua. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Coyoacán 1895, CD MX