

Artículo de investigación

Procedimiento para la estimación del coeficiente de fricción neumático-vía

procedure for estimating the tire / road friction coefficient

Procedimiento para estimar o coeficiente de atrito na pista do pneu

Edwin Enrique Remolina Caviedes^{a*} | Juan Francisco Higuera^b | Alejandra Julieth Bahena^c

^a <http://orcid.org/0000-0003-1674-5579> Centro de Investigación y Formación de Tránsito y Transporte, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia

^b Policía Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

^c Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia

- **Fecha de recepción:** 2019-09-10
- **Fecha concepto de evaluación:** 2019-11-04
- **Fecha de aprobación:** 2019-11-12
<http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v12i1.1031>

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Remolina Caviedes, E. E., Higuera, J. F., & Bahena, A. J. (2020). Procedimiento para la estimación del coeficiente de fricción neumático-vía. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 12(1), 71-83. <http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v12i1.1031>

RESUMEN

El artículo describe una metodología que permite estimar el coeficiente de fricción entre el neumático de un vehículo y la superficie de la vía, a partir de las maniobras de frenado de emergencia aplicables en el lugar donde se ha presentado un accidente de tránsito y mediante el uso de equipos de medición como el acelerómetro Vericom y, especialmente, el uso de un *smartphone*, que resulta ser un método confiable por su precisión en la adquisición de datos de aceleración. La metodología integra protocolos basados en la estandarización de procedimientos establecidos por la SAE y la norma internacional ISO-21994.

Palabras clave: acelerómetro, accidente de tráfico, técnicas de medición, estimación, fricción, frenos, neumáticos



* Autor para correspondencia. Correo electrónico: edremolina@uan.edu.co

SUMMARY

This article describes a methodology that allows the estimation of the coefficient of friction between the tire of a vehicle and the road surface, based on emergency braking maneuvers applicable at the place of the events where a traffic accident has occurred. , through the use of measurement hardware such as the Vericom accelerometer and especially, the use of smartphone as one of the reliable methods for its accuracy in the acquisition of acceleration data (Remolina, 2019) y (Baena, 2019).

The methodology integrates protocols based on the standardization of procedures established by the SAE (SAE International, 2010) and the international standard ISO-21994 (ISO 21994, 2007), which has been one of the results in the research of the comparative analysis of methods for the estimation of the tire-track friction coefficient applied in the reconstruction of traffic accidents (Baena, 2019), its application being important not only to obtain the coefficient of friction, but to provide security in the procedure and quality in the acquisition of information.

Keywords: Friction, accelerometer, traffic accident, measurement techniques, estimation, friction, brakes, tires

SUMÁRIO

El artículo describe una metodología que permite estimar el coeficiente de fricción entre el neumático de un vehículo y la superficie de la vía, a partir de las maniobras de frenado de emergencia aplicables en el lugar donde se ha presentado un accidente de tránsito y mediante el uso de equipos de medición como el acelerómetro Vericom y, especialmente, el uso de un smartphone, que resulta ser un método confiable por su precisión en la adquisición de datos de aceleración. La metodología integra protocolos basados en la estandarización de procedimientos establecidos por la SAE y la norma internacional ISO-21994.

Palavras-chave: acelerômetro, acidente de trânsito, técnicas de medição, estimativa, fricção, freios, pneus

La investigación compara la precisión de los dispositivos más utilizados en diferentes investigaciones en la estimación del coeficiente de fricción, a saber: el acelerómetro Vericom VC4000PC (Mechanical Forensics Engineering Services, 2007) y dispositivos de bajo costo como los *smartphone*, que permiten adquirir datos mediante aplicaciones móviles (Enciso, 2017). De esta manera, se ha podido crear un procedimiento sencillo y ajustado a los protocolos internacionales para la medición del coeficiente de fricción neumático-vía durante la maniobra de frenado de emergencia de un vehículo. Esto con el fin de que los investigadores y peritos en reconstrucción de accidentes de tránsito puedan realizar diferentes pruebas en el lugar de los hechos y durante el mismo día de los hechos (en lo posible, usando los vehículos involucrados en el suceso de tránsito o, en su defecto, vehículos de similares características).

Para lograr una acertada estimación de los coeficientes de fricción apropiados para cada suceso o accidente de

tránsito, es muy importante la labor adelantada en el lugar de los hechos, considerando diferentes factores que inciden en el deslizamiento de la llanta sobre la superficie vial, tales como su estado de humedad, o si, durante el bloqueo de las llantas, el vehículo viajaba en una curva vertical en ascenso o descenso, o dentro de una curva horizontal con peralte, o sobre una superficie en asfalto, tierra, adoquín, entre otros.

Los datos experimentales utilizados hoy en día para estimar coeficientes de fricción se obtienen de estudios realizados a nivel internacional por investigadores u organizaciones interesadas en el tema de la seguridad automotriz. Como resultado, se cuentan con algunas tablas de coeficientes de fricción, algunas de estas muy antiguas (Warner, 1983) y otras más actualizadas (Bedsworth, 2013; Rivers, 2010).

El coeficiente de fricción es una variable que puede verse afectada por diferentes factores, tanto ambientales y

de calzada como propios del vehículo, en particular, los neumáticos, que deben cumplir con las especificaciones del fabricante (ISO 21994, 2007). Por esa razón, para el investigador o perito en accidentes de tránsito resulta necesario realizar pruebas de frenado en el lugar del accidente, haciendo uso del vehículo involucrado, de ser posible, o de un vehículo con características similares (Daily, 2016). Dada esta necesidad, esta investigación presenta los procedimientos desarrollados en la aplicación simultánea de dos métodos durante varias pruebas de frenado de emergencia de un vehículo liviano (automóvil) a velocidades de 30 km/h y 45 km/h.

Los métodos son los siguientes: el acelerómetro Vericom VC4000PC y un *smartphone*. Este último es el método más sencillo y al alcance de cualquier investigador para estimar la aceleración de un vehículo durante la maniobra de frenado de emergencia, y su precisión es comparable a la que se obtiene de un acelerómetro Vericom o similar.

■ Metodología

Antes de iniciar cada prueba de frenado y de medición de la desaceleración, es necesario aplicar la presente metodología, que integra protocolos basados en la estandarización de procedimientos establecidos por la SAE (SAE International, 2010) y la norma internacional ISO-21994 (ISO 21994, 2007), entre otros.

Así, para la preparación de la prueba, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Seguridad.
- Estado y funcionamiento de los sistemas de seguridad activa y pasiva del vehículo.
- Condiciones de la vía y condiciones ambientales.
- Revisión de equipos de medición, para verificar que su configuración sea la misma para todas las pruebas.

Durante el procedimiento, de acuerdo con el protocolo establecido, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros y acciones:

- Para garantizar condiciones constantes en el experimento, todas las ejecuciones de prueba se harán en el mismo tramo de la vía.
- Se debe garantizar que ni el desgaste de la banda de rodadura ni el frenado frecuente puedan causar un cambio relevante de la superficie de la vía y, por lo tanto, un coeficiente de fricción de la carretera diferente.

- Los neumáticos y los frenos se deben someter a un procedimiento de acondicionamiento en la pista de prueba inmediatamente antes de iniciar los experimentos.
- La condición de conducción inicial es un tramo de vía en línea recta.
- Se debe determinar la fuerza mínima del pedal de freno así: el pedal de freno se aplicará muy rápido y con suficiente fuerza y la presión ejercida sobre el pedal debe ser lo suficientemente alta para garantizar el control de este, especialmente en el sistema de frenos ABS (*anti-lock braking system*), a lo largo de toda la fase de frenado de la prueba. La fuerza aplicada debe ser mínimo de 500 N (ISO 21994, 2007).
- Para poder mantener el vehículo correctamente en la pista, no se aplicarán correcciones de dirección importantes durante el frenado.
- Número de mediciones: una secuencia de medición consta de diez (10) mediciones individuales válidas.
- Se debe hacer la configuración de la aplicación, para que la captura de datos se realice con el mismo número de muestras por segundo.

Medición de la desaceleración mediante uso de un teléfono móvil (*smartphone*)

Antes de iniciar las pruebas, el conductor debe tomarse el tiempo necesario para familiarizarse con el vehículo y con la aplicación del teléfono celular, especialmente en lo referente a la toma de muestras por segundo en el equipo.

Asimismo, es importante realizar las pruebas de frenado en el mismo lugar del accidente. En el evento de que no se puedan realizar las pruebas en el mismo lugar, porque hay otras prioridades, se recomienda no realizarlas y continuar con el criterio técnico (Enciso, 2017).

El acompañante debe ubicar el *smartphone* calibrado en el plano horizontal del vehículo, sujetándolo a un objeto fijo lo más cercano al centro de masa del automotor.

De acuerdo con la velocidad propuesta para el ensayo, el conductor debe iniciar la marcha y mantener la velocidad seleccionada constante durante 1,5 segundos, antes de empezar la maniobra de frenado. El conductor tiene que dar aviso al acompañante de la velocidad obtenida. El acompañante debe comenzar la captura de los datos en la aplicación del teléfono celular.

Manteniendo una velocidad constante, de acuerdo con la propuesta para la prueba, el conductor tiene que accionar los frenos de forma intensa hasta la detención total del vehículo.

Una vez alcanzada la velocidad cero del vehículo, el acompañante debe detener la aplicación y grabar los datos obtenidos en el teléfono móvil.

Para hacer el análisis de los datos obtenidos mediante el *smartphone*, se debe descargar o compartir el archivo de prueba en formato CSV (del inglés *comma-separated values*) en un computador. Este es un formato sencillo que almacena una serie de datos en una tabla separados por un signo específico, siendo el más utilizado la coma (Fernández, 2012). Luego se debe abrir el archivo con el programa informático Excel u otro *software* similar, filtrar los datos que corresponden a la acción de frenado y seleccionar los datos que fluctúan alrededor del valor medio de la desaceleración.

Medición de la desaceleración mediante acelerómetro Vericom

Dado que los coeficientes de fricción a menudo varían considerablemente a lo largo de la vía de circulación, se debe garantizar que todas las pruebas de desaceleración se realicen en el mismo tramo de vía de circulación para obtener resultados de prueba reproducibles.

El conductor debe mantener constante la velocidad propuesta para cada prueba de frenado. El acelerómetro detecta la velocidad programada y emite un sonido que le indica al conductor que debe accionar el pedal del freno con fuerza y consistencia durante todo el proceso de detención.

Una vez finalizada cada prueba, el acelerómetro grabará la información de tiempo, aceleración, distancia total de detención y velocidad a la cual se inició la maniobra de desaceleración.

Para el tratamiento y análisis de los datos, hay varios aspectos que se deben tener en cuenta: la transformación de datos crudos en información utilizable, la conversión de lecturas del instrumento usando constantes de calibración, el cálculo de un coeficiente de fricción a partir de valores de distancia y velocidad, etc. En esta investigación se trabajó con los datos crudos en formato CSV y se hizo un análisis estadístico de comparación de los dos métodos empleados.

Procedimientos para la obtención y análisis de datos mediante los dos métodos de medición

A continuación, se describe el procedimiento realizado para la instalación, obtención y análisis de datos mediante los dos métodos de medición elegidos.

Se realizaron un total de ocho experimentos en diferentes fechas y condiciones ambientales, como se registra en la figura 1. En cada experimento, se hizo un promedio de diez pruebas de desaceleración en superficie de asfalto, en estado seco y húmedo, de acuerdo con las condiciones



Figura 1. Lugares utilizados para los experimentos.

ambientales que se presentaron durante el día de cada experimento. Los experimentos 3 y 4 se realizaron en condiciones climáticas de lluvia, de modo que la superficie asfáltica estaba completamente cubierta de agua (superficie húmeda o mojada). En el experimento 2, se consideró una superficie parcialmente húmeda, pues la capa asfáltica presentaba algunas zonas discontinuas con presencia de agua y material suelto. En cada prueba se utilizaron, simultáneamente, ambos métodos de medición: 1) acelerómetro Vericom VC4000PC y 2) *smartphone*.

Vehículo

El vehículo usado para cada uno de los experimentos, que comprendieron diez pruebas de desaceleración, fue un automóvil marca Chevrolet Evolution 1.6 con las siguientes características: sistema hidráulico de frenos ABS; discos ventilados, en llantas delanteras; tambor, en llantas traseras; longitud, 4310 mm; ancho, 1450 mm; altura, 1495 mm; distancia entre ejes, 2480 mm; peso al vacío, 1125 kg; capacidad de carga, 415 kg; tanque de combustible lleno, 11,88/45 gal/L; llantas marca General G-Max Rs 185/55 R15 82V, con presión de inflado de 32 Psi, conforme a ficha técnica.

Velocidades

El acelerómetro Vericom VC4000PC registra la velocidad a la cual se inicia el procedimiento de desaceleración del

vehículo. Por ende, se tomaron como referencia las velocidades registradas por dicho dispositivo entre 25 km/h y 45 km/h, velocidades seguras para las condiciones climáticas y de la vía y para la distancia total del sector en el que se podían hacer los experimentos.

Instalación del acelerómetro Vericom VC4000PC

El dispositivo puede adherirse al parabrisas del vehículo mediante una ventosa, con la pantalla orientada hacia la parte interna del automotor. La ventosa y el dispositivo se unen con un brazo y un tornillo, que debe ajustarse en el momento de tener nivelado el dispositivo, guiándose con los niveles frontal y lateral (Vericom Computers, 2013).

El acelerómetro Vericom VC4000PC (figura 2) tiene las siguientes partes generales:

- 1) Nivel frontal.
- 2) Botón para iniciar una prueba de frenado.
- 3) Botón para detectar el umbral de activación de G-Force (después de presionar “Frenado” o “Aceleración”).
- 4) Tornillo para ajustar e inmovilizar el dispositivo una vez que esté nivelado. Sin embargo, no es necesario tener precisión en la nivelación, pues el dispositivo la mantiene automáticamente.
- 5) Botón de ajuste de ventosa. Al ubicar la ventosa en la superficie deseada, se debe oprimir sucesivamente el botón hasta que la línea roja quede oculta en el dispositivo.
- 6) Ventosa que se ajusta a la superficie deseada.



Figura 2. Vericom VC4000PC.

Una vez instalado el dispositivo en el parabrisas del vehículo, hay que presionar el botón “2” (*Braking*) para medir la desaceleración del automotor y, seguidamente, el botón “3” (*Auto Start*) (figura 3).

Para la prueba, hay que mantener el automóvil a la velocidad inicial deseada para la desaceleración del vehículo y, luego, presionar los frenos con fuerza y rapidez, aplicando la máxima presión en el pedal del freno hasta que el vehículo se detenga completamente.

Para continuar con las demás pruebas de desaceleración, hay que ubicar el vehículo al inicio de la marcha y proceder nuevamente, presionando el botón “2” (*Braking*) para medir la desaceleración del automotor y, seguidamente, el botón “3” (*Auto Start*).

Al finalizar cada prueba, el dispositivo mostrará en la pantalla los resultados obtenidos, así como la gráfica de distancia, velocidad y aceleración con respecto al tiempo. Cada prueba e información es grabada en el dispositivo o en la tarjeta SD, según se elija, a fin de proceder con la descarga de datos al computador, mediante tarjeta o cable USB. Para hacer la descarga de datos directamente del dispositivo al computador, se debe tener instalado el software Profile 5.

Obtención de datos del Vericom VC4000PC usando Profile 5

Para importar los datos obtenidos por el Vericom VC4000PC, se puede conectar el dispositivo al computador

mediante cable USB o hacer uso de la memoria flash SD. Pero estos también se pueden importar y analizar usando el software Profile 5, el cual reconoce automáticamente al dispositivo, una vez este es conectado al computador. El software, además del análisis de datos, permite crear gráficos, tablas e informes de las pruebas de frenado y de aceleración (Vericom Computers, 2013).

Al seleccionar en el menú del software la opción Drag Factor Report, se puede obtener, en un archivo de formato PDF (figura 4), la gráfica y un resumen del promedio de aceleración, la velocidad al inicio de la desaceleración, la distancia total de detención y el tiempo total de la maniobra.

En la figura 4, se puede observar la información del reporte final del factor de arrastre de la prueba número 9 del experimento 2, que fue realizada el día 25 de febrero de 2018. En la tabla, se aprecia el valor medio de la aceleración ($a = 8,172 \text{ m/s}^2$) y el tiempo total de la maniobra de desaceleración (1,020 s) para una velocidad inicial de 30,01 km/h y una velocidad final de 0,0 km/h, con una distancia total de desaceleración de 4,575 metros.

En la tabla 1, se presenta un resumen de la información obtenida mediante el acelerómetro VC4000 durante la prueba número 9 del experimento 2 (25 de febrero de 2018) con respecto a las cuatro variables mencionadas.

Sin embargo, aunque el software Profile 5 permite obtener la desaceleración media respecto al tiempo y demás variables cinemáticas, en esta investigación fue necesario



Figura 3. Vericom VC4000PC instalado en el interior del vehículo.

Drag Factor Report

Average Table					
Vehicle	Run #	Time Secs	Accel M/s	Speed KPH	Dist meters
	9	1,020	-8,172	30,01	4,575
Averages		1,020	-8,172	30,01	4,575

Drag Factor by average method is: 8,172

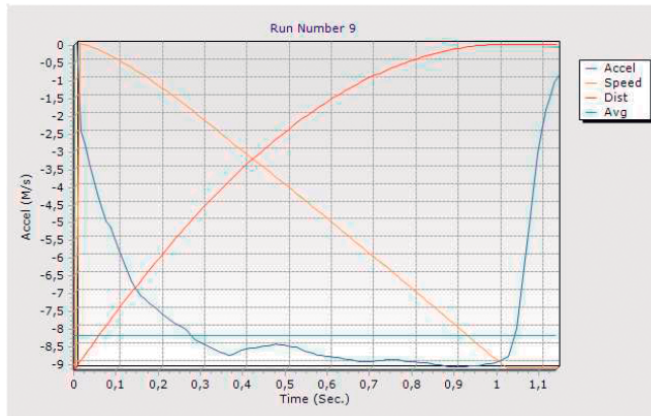


Figura 4. Imagen de un reporte de resultados (software Profile 5 de Vericom).

Fuente: elaboración propia.

Tabla I. Reporte de las mediciones hechas con el acelerómetro Vericom

Tiempo	Aceleración	Velocidad	Distancia
(s)	(m/s ²)	(km/h)	(m)
0	0	0	0
0,10	-5,86	28,45	0,82
0,20	-7,63	25,91	1,57
0,30	-8,50	22,99	2,25
⋮	⋮	⋮	⋮
0,90	-9,15	3,91	4,51
1,00	-8,96	0,64	4,57
1,02	-8,86	0,00	4,58

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de aceleración, velocidad y distancia con respecto al tiempo obtenidos durante la prueba de frenado de emergencia número 9 (véase la figura 4).

obtener los datos crudos (totales) registrados por el dispositivo Vericom VC4000PC, a fin de poder realizar el mismo procedimiento de análisis de la información que se obtiene mediante el otro método de medición, pues en el caso del *smartphone* es necesario procesar y analizar los datos para obtener la aceleración media.

Instalación del *smartphone*

El *smartphone* debe ubicarse lo más cerca al centro de masa del vehículo, cerca de la palanca de cambios en un automóvil o camioneta, nivelado y ajustado al vehículo de

tal manera que, ante una desaceleración de emergencia (bloqueo total de llantas), el celular no se mueva. Igualmente, teniendo en cuenta la posición de los tres ejes del celular, se ubicará el dispositivo con su eje y en la dirección del movimiento del vehículo durante la desaceleración.

Se recomienda usar cinta doble faz, para no sobreponer otros tipos de cinta sobre el celular y evitar que esto no permita la digitación en la pantalla a la hora de hacer las pruebas.

En la figura 5, se ilustra la posición del *smartphone* dentro del vehículo, debidamente asegurado con cinta doble cara y nivelado. Una vez instalado, se ejecuta la aplicación seleccionada para las pruebas de desaceleración. En esta investigación, se utilizó la aplicación Sensor Kinetic Pro, dentro de la cual se selecciona, del menú de sensores, la opción “Accelerometer Sensor”, que muestra seguidamente una pantalla con la gráfica de aceleración en m/s² con respecto al tiempo *t*. En esta pantalla, se debe hacer clic en la palabra “Start” para dar inicio a la grabación de datos, siempre y cuando ya esté el vehículo listo para iniciar la marcha, o se encuentre listo para iniciar una maniobra de frenado de emergencia en cada prueba.



Figura 5. Ubicación del *smartphone* dentro del vehículo.

Obtención de datos con el *smartphone* usando la aplicación Sensor Kinetics Pro

Al finalizar cada prueba de desaceleración, la aplicación Sensor Kinetic Pro presenta las gráficas para cada eje (figura 6). Una vez finalizada la prueba, se debe detener la grabación de datos en dicha aplicación. Seguidamente, en la parte superior derecha de la aplicación se debe desplegar un menú del que se debe elegir la primera opción (“Files & Sharing...”), para guardar los datos de la prueba con un nombre personalizado, y dar clic en “enviar archivo por correo electrónico”, para procesar luego la información en un computador.

Finalmente, el archivo CSV se descarga del correo electrónico al computador; se abre el archivo y se procede a procesar los datos.

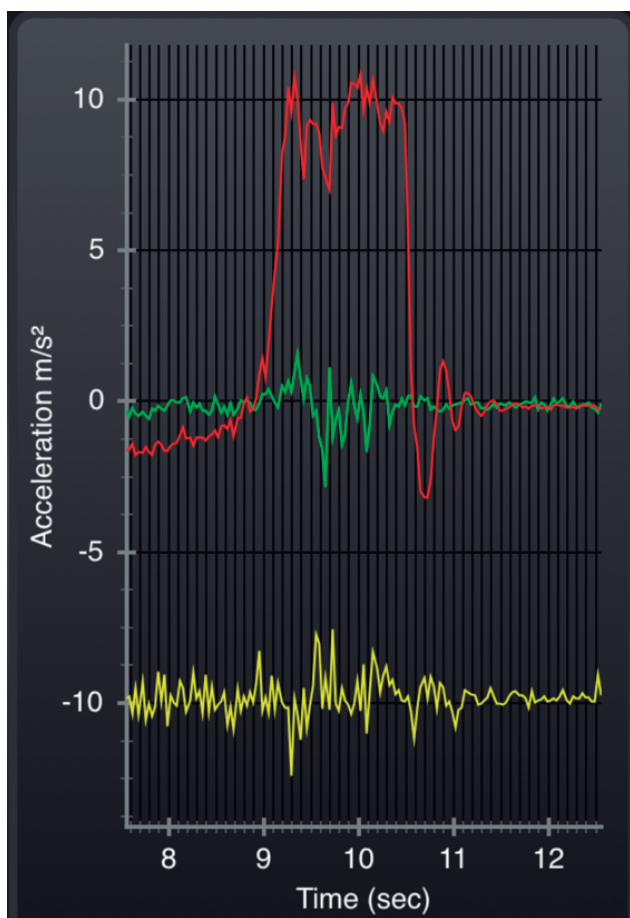


Figura 6. Imagen de los resultados de desaceleración usando un *smartphone*.

Procedimientos para el análisis de los datos

Una vez obtenida la base de datos de cada método en formato CSV o TEX, se procede a realizar el análisis de las

variables de aceleración y tiempo, además de las variables de velocidad y distancia que se adquieren del dispositivo Vericom VC4000PC. (La aplicación Sensor Kinetics del *smartphone* tan solo graba datos de aceleración y tiempo).

Para determinar la velocidad inicial de cada desaceleración en los diferentes experimentos, partiendo de que los dos métodos se utilizaron de manera simultánea en cada una de las pruebas, se utilizó el valor registrado por el acelerómetro Vericom VC4000PC, el cual se visualiza tanto en la pantalla del dispositivo como en el reporte del *software* Profile 5 (figura 4).

Durante el análisis de los datos obtenidos por cada dispositivo, se realizó una gráfica con la información de la aceleración (m/s^2) y del tiempo (t), a partir de la cual se determinó detalladamente el inicio y el final de la maniobra de desaceleración, como se ilustra en la figura 7 (que se creó a partir de 160 datos registrados por el acelerómetro Vericom PC4000 en la prueba número 1 del experimento 8). En la figura, se puede evidenciar una zona de incremento en donde la aceleración inicia aproximadamente en $0,0 (m/s^2)$ hasta la línea roja (valor medio), en donde se aprecia una zona que tiende a ser plana, pero que se ve afectada debido a la inclinación (cabeceo) del vehículo y al movimiento de la suspensión, zona a la cual hemos llamado “zona de estabilización” (Raymond, 1998; SAE International, 2010). En la gráfica, al lado izquierdo de la línea vertical, se aprecia una parte de la curva que representa el periodo de tiempo en que las llantas del vehículo inician el proceso de desaceleración hasta llegar al punto de bloqueo total.

En muchos de los casos, cuando el vehículo inicia el proceso de bloqueo total de sus llantas, se puede observar sobre la superficie de la vía el comienzo de la marca de deslizamiento, o huella de frenado, a partir de una sombra (marcación levemente oscura). Pero, a medida que la llanta bloqueada sigue su deslizamiento sobre la superficie asfáltica, la huella se convierte en una marca totalmente oscura, con algunos surcos o espacios sin marcas de neumático, los cuales dependen del tipo de labrado de la banda de rodadura de la llanta. Esta marca es producida por los efectos físico-químicos de la adherencia de material de la llanta al asfalto, la cual, a su vez, es provocada por la temperatura que resulta del frenado sobre la capa asfáltica (Reed, 1989). En algunos casos, es posible observar la huella de frenado durante la maniobra de emergencia o bloqueo total de llantas realizada por un vehículo con

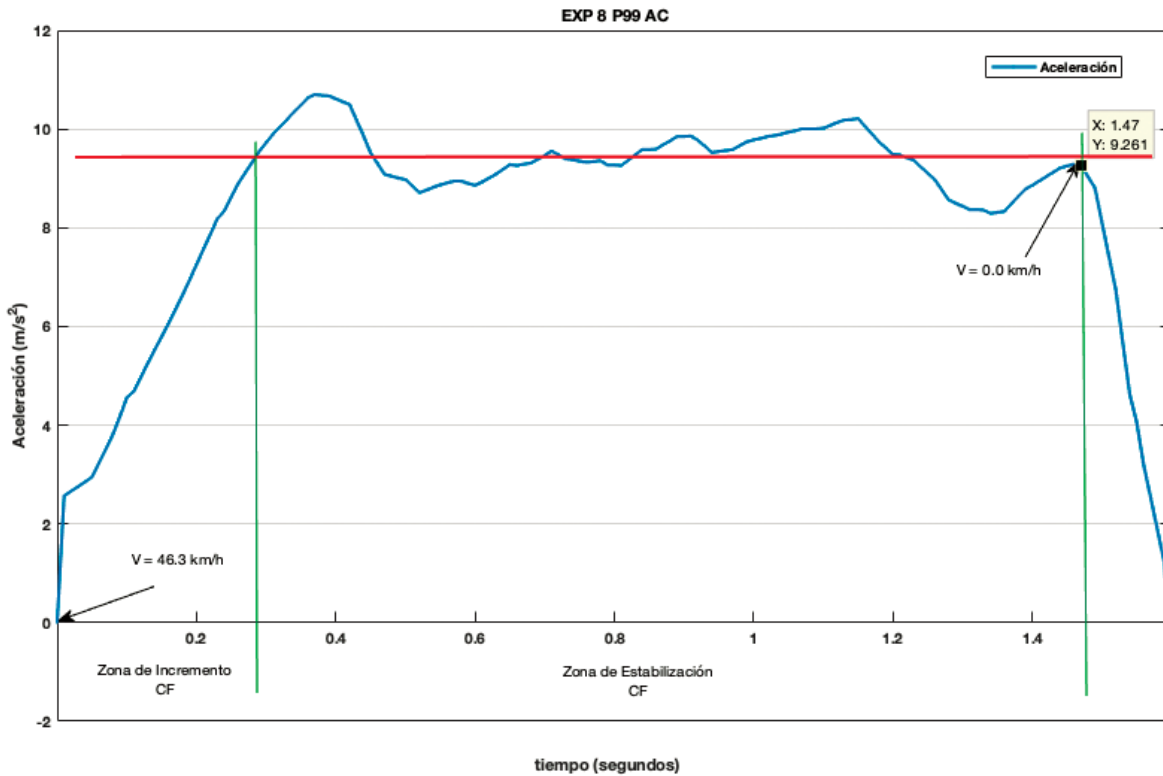


Figura 7. Imagen de los resultados de la prueba número 1 del experimento 8 (Vericom ACVC4000PC).

sistema de frenos ABS, huellas que son totalmente oscuras con marcación de segmentos cortos, que el investigador debe medir desde el inicio hasta el final de la marcación total (sin segmentar las medidas).

A partir del análisis de la gráfica, para cada una de las pruebas que conforman los experimentos se seleccionan los datos de tiempo y desaceleración que se ubican dentro de la zona de estabilización (SAE International, 2010). Para hallar los datos de la zona de estabilización, se selecciona uno de los valores de aceleración que se ubican entre la zona de incremento y la zona de estabilización, un valor cercano al promedio de la aceleración total de la meseta que se ilustra en las figuras 7 y 8. Asimismo, se selecciona el valor de la aceleración final de dicha zona. Filtrados los datos de interés, que se encuentran delimitados entre las filas 4 y 15, en su orden, de la tabla 2, se aplica la media móvil para cada par de valores de la desaceleración. Posteriormente, el valor medio obtenido debe ser dividido entre la aceleración de la gravedad, conforme a la ecuación (1). De esta manera se obtiene la estimación del coeficiente de fricción.

$$\frac{1}{4} = \frac{a}{g} \quad (1)$$

Tabla 2. Datos de la prueba número 1 del experimento 8 (Vericom ACVC4000PC)

v (km/h)	d (m)	t (s)	a (m/s ²)
46,29	0	0	0
46,19	0,13	0,01	2,5676
⋮	⋮	⋮	⋮
40,84	3,31	0,27	9,114
40,51	3,42	0,28	9,3296
40,16	3,54	0,29	9,55
39,81	3,65	0,30	9,72
39,46	3,76	0,31	9,90
39,09	3,87	0,32	10,05
38,73	3,98	0,33	10,19
⋮	⋮	⋮	⋮
1,00	10,03	1,44	9,21
0,67	10,03	1,45	9,25
0,33	10,03	1,46	9,29
0	10,03	1,47	9,26
0	0	1,48	9,04
⋮	⋮	⋮	⋮
0	0	1,6	-0,98

Fuente: elaboración propia a partir de 150 datos obtenidos de la prueba de frenado de emergencia número 1 del experimento 8.

Por otra parte, la figura 8 corresponde a la gráfica de la misma prueba (número 1 del experimento 8) obtenida a partir de las mediciones registradas por la aplicación Sensor Kinetic Pro del *smartphone*.

En la figura 8, se observa la zona de estabilización entre los valores de aceleración inicial de $8,0546 \text{ m/s}^2$ y de aceleración final de $8,5928 \text{ m/s}^2$ con respecto al tiempo, por cada $0,03$ segundos. La media de aceleración para la zona de estabilización fue calculada en $9,2686 \text{ m/s}^2$. La gráfica obtenida a partir del *smartphone* es diferente a la gráfica obtenida con el acelerómetro Vericom VC4000PC, debido a la diferencia entre la cantidad de información registrada entre los dispositivos: mientras que el *smartphone* registra 33 datos por segundo, el dispositivo Vericom VC4000PC registra 100 datos por segundo.

Con la media de la aceleración de $9,2686 \text{ m/s}^2$ y aplicando la ecuación (1), se puede estimar el coeficiente de fricción en $0,95$.

Recomendaciones generales

Los coeficientes de fricción que hoy en día se utilizan para vehículos livianos se pueden seguir aplicando en la reconstrucción de accidentes de tránsito, especialmente cuando el investigador no cuenta con los medios para

realizar las respectivas pruebas de frenado en el lugar de los hechos. No obstante, se debe tener en cuenta que los datos que se presentan en la figura 9 para vehículos livianos corresponden a velocidades menores y mayores a 50 km/h y para vehículos y superficies de la época en que se realizaron los estudios (Fricke, 1990). Asimismo, los datos de la tabla 3, elaborada por Bedsworth (2013), son aplicables a los diferentes tipos de vehículos allí descritos, con un promedio general del coeficiente de fricción de entre $0,5$ y $0,6$ para vehículos de gran masa sobre superficie plana y asfalto seco.

Al utilizar los coeficientes de fricción de las tablas ya mencionadas, el investigador debe tener en cuenta que la velocidad estimada de vehículos livianos siempre será una velocidad al inicio de la marca de desaceleración por debajo del valor real, debido a que los cálculos realizados en la estimación del coeficiente de fricción involucran tanto el coeficiente de fricción de la zona de incremento como el coeficiente de fricción de la zona de estabilización.

Con respecto a la tabla de coeficientes de fricción para vehículos de mayor masa, como camiones y buses, entre otros (tabla 3), se deben continuar realizando investigaciones con el procedimiento anteriormente descrito, para

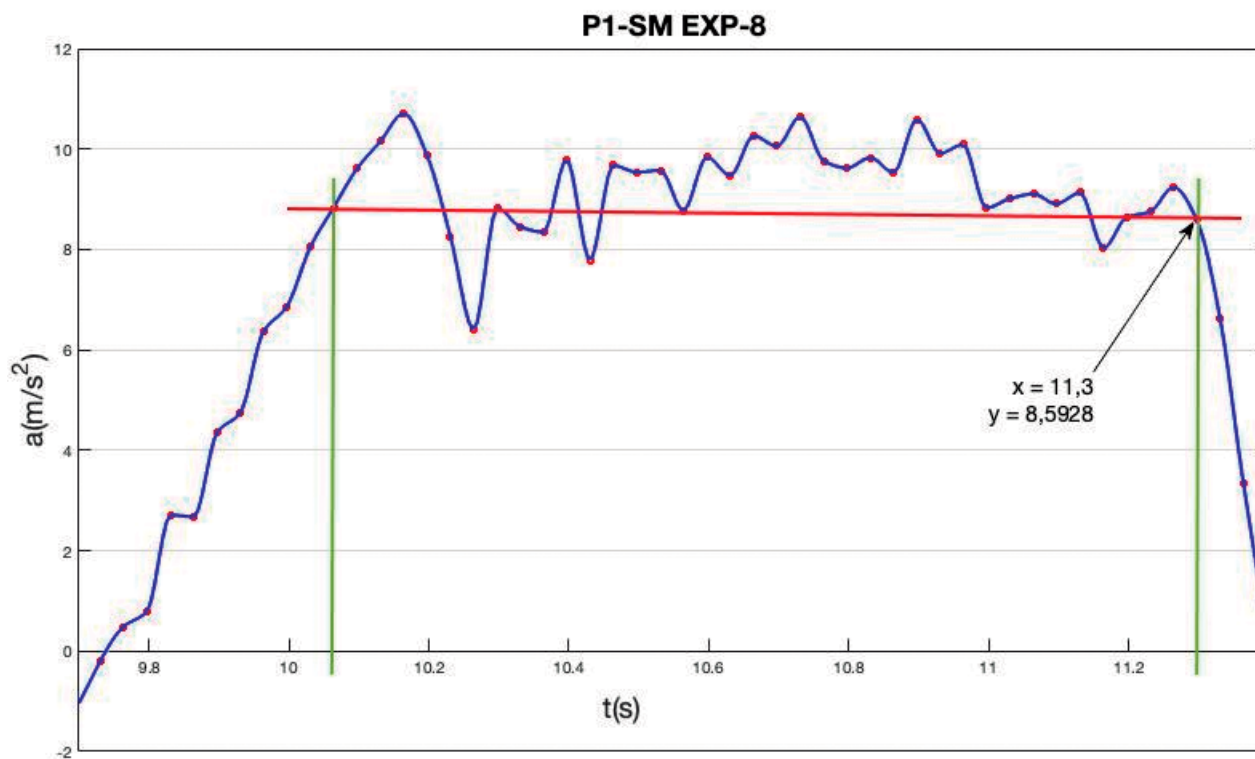


Figura 8. Imagen de los resultados de la prueba número 1 del experimento 8 (*smartphone*, aplicación Sensor Kinetic Pro).

Mostrar registros Buscar:

Características de la superficie	Tipo	Seca a menos de 50 km/hr		Seca a Más de 50 km/hr		Húmedad a Menos de 50 km/hr		Húmedad a Más de 50 km/hr	
		Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta
CONCRETO	Nuevo – liso	0.80	1.20	0.70	1.00	0.50	0.80	0.40	0.75
CONCRETO	Usado	0.60	0.80	0.60	0.75	0.45	0.70	0.45	0.65
CONCRETO	Pulimentado por el tránsito	0.55	0.75	0.50	0.65	0.45	0.65	0.45	0.60
ASFALTO o ALQUITRÁN	Nuevo – liso	0.80	1.20	0.65	1.00	0.50	0.80	0.45	0.75
ASFALTO o ALQUITRÁN	Usado	0.60	0.80	0.55	0.70	0.45	0.70	0.40	0.65
ASFALTO o ALQUITRÁN	Pulimentado por el tránsito	0.55	0.75	0.45	0.65	0.45	0.65	0.40	0.60
ASFALTO o ALQUITRÁN	Con exceso de alquitrán	0.50	0.60	0.50	0.60	0.30	0.60	0.25	0.55
ADOQUÍN	Nuevo – liso	0.75	0.95	0.60	0.85	0.50	0.75	0.45	0.70
ADOQUÍN	Pulimentado por el tránsito	0.60	0.80	0.55	0.75	0.40	0.70	0.40	0.60
PIEDRA COMPACTA	Nuevo – liso	0.75	1.00	0.70	0.90	0.65	0.90	0.60	0.85

Mostrando registros del 1 al 10 de un total de 19 registros Anterior 2 Siguiente

Fuente: "Friction Application in Accident Reconstruction", Charles Warnes, Gregory Smith, Michael B. James and Geoff J. Germane.- SAE 830612

Figura 9. Coeficientes de fricción RACTT v4.0 (original de Warner ,1983).

Fuente: elaboración propia usando el software de reconstrucción analítica de colisiones de tránsito terrestre.

brindar así información sobre su precisión para calcular la velocidad al inicio de la huella y del proceso de frenado.

Tabla 3. Coeficientes de fricción para vehículos de gran masa

Tipo de vehículo	Número de pruebas	Media (f)
Tractor W/Van Type Trailer	63	0,60
School Bus	11	0,60
Straight Box / Service Trucks	13	0,66
Concrete Mixing Trucks	4	0,45
Drump Trucks	16	0,59
Fire Trucks	11	0,60
Metro Buses	5	0,62
Bobtailes	45	0,59
Articulated Flatbeds	19	0,58
Articulated Tankers	16	0,63
Double Trailers	8	0,67
Trailer Applications Only	3	0,20
Total	214	

Fuente: Bedsworth (2013).

Para obtener los valores más cercanos a la velocidad al inicio de la huella de frenado, se debe considerar que el coeficiente de fricción es una variable que puede verse afectada por diferentes factores tanto ambientales y de calzada como propios del vehículo, en especial, los neumáticos, que deben cumplir con las especificaciones del fabricante (ISO 21994, 2007). Por eso, una de las recomendaciones para el investigador o perito en accidentes de tránsito es que pueda hacer las pruebas de frenado en el lugar y durante el mismo día en que ocurrió el accidente de tránsito, haciendo uso del vehículo involucrado en los hechos, de ser posible, o de un vehículo con características similares (Daily, 2016). Los resultados de estas pruebas son así transmitidos a la policía judicial, que procesa el lugar de los hechos y puede registrarlos en sus informes.

Al hacer las pruebas, siendo el dispositivo de medición más práctico el *smartphone*, el investigador debe inmediatamente grabar la información en su computador y analizar la información capturada. Para eso, debe estimar el promedio de la desaceleración a partir de los datos que

se registran en la zona de estabilización o meseta de la gráfica, tal como se ilustra en la figura 8. De esta manera, luego debe estimar el coeficiente de fricción de la superficie de la vía en donde ocurrieron los hechos, usando la ecuación (1).

Una vez que se estima el coeficiente de fricción del promedio de la desaceleración en la zona de estabilización, al calcular la velocidad del vehículo se está hallando la velocidad al inicio del bloqueo total de llantas del automotor o el inicio del proceso efectivo del sistema de frenos ABS. Sin embargo, para obtener la velocidad al inicio de la maniobra de frenado durante el tiempo de reacción mecánico o proceso de desaceleración, en el momento en que el conductor levanta el pie del acelerador y aplica seguidamente con fuerza el pedal del freno, es necesario sumar un promedio del 30 % de la longitud de la huella o zona de frenado. En la figura 10, se ilustra la velocidad estimada usando el coeficiente de fricción de la zona de estabilización y la longitud, primero, solo de la huella de frenado y, luego, la longitud de la misma huella más el 30 % de su longitud. Los cálculos y el análisis estadístico de la investigación fueron desarrollados por Remolina (2019).

En esta figura, se puede observar que la velocidad, al inicio de la huella de frenado, es de 40 km/h, utilizando el

coeficiente de fricción de la zona de estabilización. Si se utilizara un coeficiente de fricción promedio de 0,70 (tomado de las tablas ya mencionadas), la velocidad sería menor que el valor descrito. Sin embargo, al sumar el 30 % de la longitud de la huella de frenado, se obtiene un valor de la velocidad de alrededor de 46 km/h, que fue la velocidad registrada, al inicio del proceso de la maniobra de frenado, por el acelerómetro Vericom VC4000PC.

Conclusiones

El coeficiente de fricción es una variable que es afectada tanto por factores ambientales y de la superficie de la vía por la cual se desliza el neumático del vehículo como por factores tales como el tipo de neumático que utilice el automotor. Por esa razón, es necesario que el investigador pueda realizar pruebas de frenado en el mismo lugar y día de los hechos, haciendo uso del vehículo o vehículos implicados en el evento, siempre y cuando esto sea posible. De lo contrario, se pueden realizar pruebas de frenado usando un vehículo de características similares (Daily, 2016). Esta es una opción que se le facilita a la policía judicial, que procesa el lugar de los hechos, y que no lleva demasiado tiempo, teniendo en cuenta que la vía se encuentra cerrada durante las respectivas diligencias.

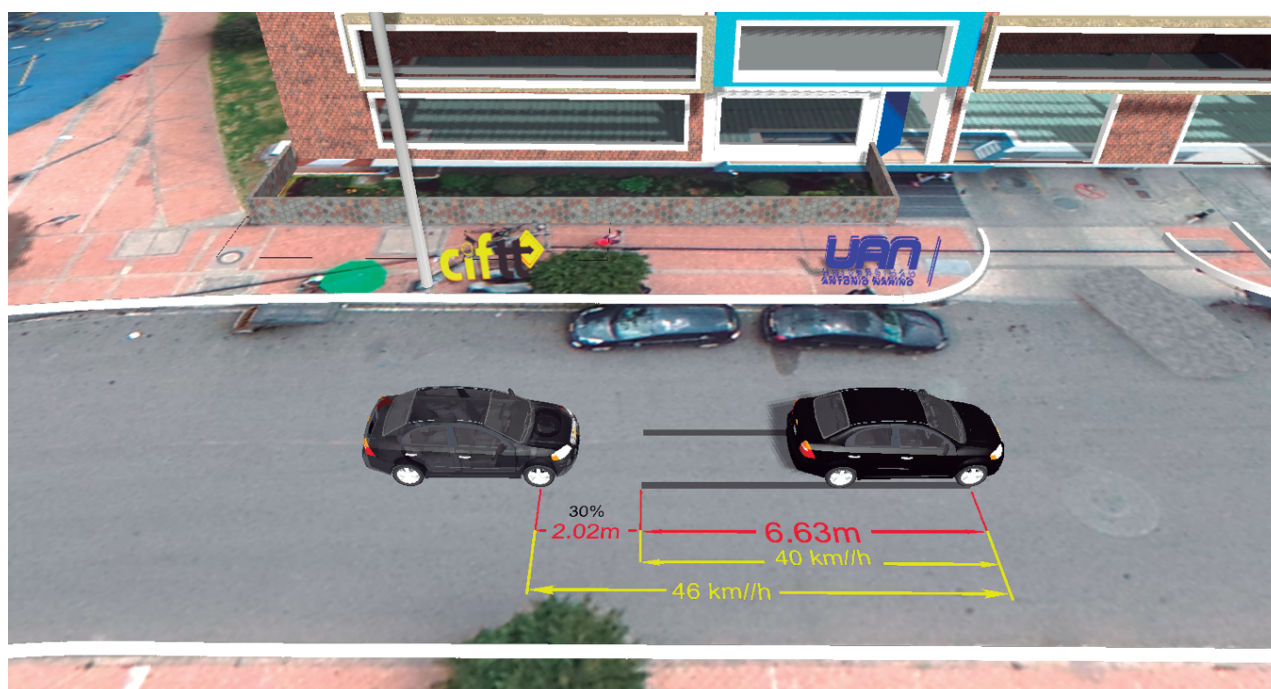


Figura 10. Velocidad calculada a partir de la huella de frenado, por un lado, y de la suma del 30 % de su longitud, por otro (prueba 1, experimento 8).

El coeficiente de fricción es un valor adimensional que varía con la velocidad. A mayor velocidad, menor será el coeficiente de fricción. Aplicando el procedimiento descrito en este artículo, para obtener el coeficiente de fricción mediante los métodos propuestos, el investigador debe hacer uso del valor de la desaceleración promedio obtenida de la zona de estabilización, valor que le permitirá obtener la velocidad más cercana al inicio de la marcación de la huella de frenado o bloqueo de llantas del vehículo.

A fin de obtener el valor de la velocidad al inicio del proceso o maniobra de frenado, en el momento en que el conductor del vehículo ha tomado la decisión de aplicar los frenos ante una situación de peligro, es necesario que el investigador sume un promedio del 30 % de la longitud de la huella de frenado al total de la huella, como ya se ha señalado.

Para estimar el coeficiente de la fricción neumático-vía que resulta de la maniobra de frenado de emergencia de un vehículo, tanto por seguridad como por confiabilidad en la obtención y análisis de la información, el investigador debe aplicar los procedimientos mínimos descritos en este artículo. Al hacer las pruebas respectivas, puede usar métodos como el acelerómetro de precisión Vericom o aplicaciones para *smartphone*, entre las cuales las más utilizadas son Sensor Kinetics y Physics Toolbox Sensor, teniendo en cuenta la precisión de los datos que se obtienen con cada método. Al respecto, se usaron un iPhone 7 y un iPhone X (Baena, 2019; Remolina, 2019).

Referencias

Baena, A. R. (2019). *Comparative analysis of methods to estimate the tire/road friction coefficient applied to traffic accident reconstruction*. arXiv.

Bedsworth, K. B. (2013). *Commercial vehicle skid distance testing and analysis*. SAE International.

Daily, J. S. (2016). *Fundamentals of traffic crash reconstruction* (vol. 2). Institute of Police Technology and Management.

Enciso, G. A. (2017). *Measurement of the deceleration factor in vehicle brake with smartphone*. arXiv.

Fernández, A. M. (2012). *Python 3 al descubierto*. Madrid: RC Libros.

Fricke, L. B. (1990). *Traffic accident investigation manual*. Illinois: Northwestern University Traffic Institute.

IEEE (2017). *IEEE Taxonomy, version 1.0*. Estados Unidos: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ISO 21994 (2007). *Passengers cars: stopping distance at straight-line braking with ABS-Open-loop test method*. SAE International.

Mechanical Forensics Engineering Services (2007). *Review of recent skid-testing results*. Recuperado de <http://mfes.com/friction.html>.

Raymond, M. B. (1998). *Comparison of tire friction test methodologies used in accident reconstruction*. Technical Paper.

Reed, W. S. (1989). *Vehicular deceleration and its relationship to friction*. SAE Technical Paper Series.

Remolina, E. (2019, mayo 25). *Análisis comparativo de métodos para la estimación del coeficiente de fricción neumático-vía aplicado en la reconstrucción de accidentes de tránsito* (tesis de maestría). Universidad Antonio Nariño.

Rivers, R. W. (2010). *Technical traffic crash investigators' handbook*. Illinois: Charles C Thomas Publisher.

SAE International (2010). *Measurement of vehicle-roadway frictional drag*. SAE International.

Vericom Computers (2013). *Vericom VC4000PC and brake meter owners manual*. Vericom Computers.

Warner, C. Y. (1983). *Friction applications in accident reconstruction*. SAE International.