



SABER, arte y técnica

Minerva. Saber, arte y técnica

AÑO 10 • VOL. 1 • JUNIO 2026

<https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s25456245/a39orkfiu>

ISSN en línea 2545-6245

ISSN impreso 2591-3840

IUPFA

Coeficiente de adherencia neumático-calzada en ómnibus urbanos: estimación de velocidad a partir de huellas de frenado en calzada seca y limpia

DANIEL OSVALDO FERNÁNDEZ*

Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA), Argentina
dofernandez@gmail.com

FERNANDO JESÚS GABRIEL SALVARREY**

Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA), Argentina
salvarreyf@gmail.com

JUAN CARLOS COSTOYA***

Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA), Argentina
yukacostoya@gmail.com

ADRIÁN ARGENTIERI****

Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA), Argentina
adrianargentieri@gmail.com

SEBASTIÁN MONTAÑO*****

Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA), Argentina
sebastianmontano.lapv@gmail.com

JONATAN PASUCHIO*****

Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA), Argentina
academia.nz.segvial@gmail.com

RECIBIDO: 10 DE MARZO DE 2026

ACEPTADO: 12 DE MAYO DE 2026

Resumen

El cálculo de la velocidad de circulación es una de las bases para analizar un accidente de tránsito. Esta velocidad es un elemento de juicio para determinar el grado de responsabilidad de los conductores. Cuando se cuenta, como dato, con la longitud de las marcas producidas por los neumáticos que rozan el camino

al desplazarse frenando, la velocidad se calcula teóricamente estimando el valor del coeficiente de rozamiento, generalmente tabulado para neumáticos de automóviles. El objetivo del presente trabajo es determinar el valor del coeficiente de adherencia a adoptar para el cálculo de velocidad, en base a huellas de frenado sobre asfalto y/o pavimento seco y limpio, correspondiente a Ómnibus Urbanos circulando a baja velocidad y sin pasajeros. Determinamos utilizar las variables que habitualmente se verifican en el levantamiento de los indicios y con las que cuenta el perito para realizar sus cálculos y en ese caso el ensayo limita su validez a las condiciones específicas de los Ómnibus Urbanos utilizados, circulando a baja velocidad y sin pasajeros. Realizamos pruebas de frenado desde tres velocidades diferentes, generando y midiendo las huellas de frenado. Esta longitud se utilizó para realizar los cálculos y llegamos a un valor promedio del coeficiente de adherencia de $\mu = 0,60$, para el cálculo de velocidad en base a huellas de neumáticos de Ómnibus Urbanos, circulando a baja velocidad y sin pasajeros, que frenan con bloqueo de ruedas sobre calzada horizontal seca y limpia.

Palabras clave: adherencia; frenado de pánico; coeficiente de fricción; huella de frenado; velocidad

Tire-Pavement Friction Coefficient for Urban Buses: Speed Estimation from Braking Skid Marks on Dry, Clean Pavement

Abstract

The calculation of vehicle speed is one of the fundamental bases for analyzing a traffic accident. This speed is a key element in determining the degree of responsibility of the drivers involved. When the length of the skid marks left by tires sliding on the road surface during braking is available as data, speed is theoretically calculated by estimating the friction coefficient, which is generally tabulated for passenger car tires. The objective of this study is to determine the friction coefficient to be adopted for speed calculation based on skid marks on dry, clean asphalt and/or pavement, for urban buses traveling at low speed and without passengers. We used the variables typically available to the expert during scene documentation, and in this case the test limits its validity to the specific conditions of the urban buses used, circulating at low speed and without passengers. Braking tests were conducted at three different speeds, generating and measuring the resulting skid marks. These lengths were used to perform the calculations, yielding an average friction coefficient of $\mu = 0.60$ for speed calculation based on skid marks of urban buses braking with locked wheels on a dry, clean, horizontal roadway.

Keywords: adherence; panic braking; friction coefficient; skid mark; speed

Introducción

Investigar cómo y por qué ocurrió un accidente de tránsito tiene, entre sus ventajas, colaborar con las autoridades judiciales para que puedan impartir justicia a las partes involucradas. Para determinar el grado de responsabilidad de los conductores, un elemento de juicio fundamental es el cálculo de la velocidad de circulación de los móviles intervinientes en el suceso. A tal efecto, se analizan las características de las huellas de neumáticos presentes en el lugar del siniestro, empleando fórmulas físico-matemáticas para calcular las velocidades de circulación en base a la longitud de las marcas producidas por los neumáticos que rozan contra el camino cuando el vehículo se desplaza frenando.

El coeficiente de adherencia o fricción interviene en el cálculo de la velocidad. En la reconstrucción de accidentes de tránsito se adopta el valor de dicho coeficiente, de tablas que ofrecen valores promedios en función del tipo y estado de la calzada donde se desliza el neumático. Esta investigación buscó determinar el valor del coeficiente de adherencia a adoptar para el cálculo de velocidad, en base a huellas de frenado sobre pavimento seco y limpio, correspondiente a ómnibus urbanos.

Determinar el valor representativo del coeficiente de fricción o adherencia entre neumáticos y camino, para ómnibus urbanos, permitirá mejorar los procedimientos de cálculo de velocidad realizados por la Sección Unidad Accidentológica Federal de PFA y de otras fuerzas de seguridad que intervengan en temas relacionados con la investigación de siniestros viales. También los peritos actuantes en el fuero civil o penal podrán aportar cálculos de velocidad más certeros, que redundarían en una mejor administración de justicia en materia de siniestros viales.

El objetivo general de esta investigación es determinar el valor del coeficiente de adherencia a adoptar para el cálculo de velocidad, en base a huellas de frenado sobre asfalto y/o pavimento seco y limpio, correspondiente a ómnibus urbanos. Cabe señalar que los resultados obtenidos corresponden a condiciones específicas: ómnibus urbanos circulando a baja velocidad y sin pasajeros, sobre calzada horizontal seca y limpia.

Consideraciones teóricas

La Accidentología Vial es un campo multidisciplinario de investigación dedicado a la reconstrucción científica de hechos de tránsito. Son muchos y variados los datos que pueden llegar a relevarse en la escena para la interpretación de los

Este trabajo está dedicado a la memoria del Ing. Juan Carlos Godoy, colega, amigo y director de la Licenciatura en Accidentología y Prevención Vial, cuya participación fue fundamental desde la conformación del equipo hasta el desarrollo de cada etapa de la investigación. Su rigor profesional, generosidad y compromiso con la formación de quienes lo rodearon perduran en este trabajo y en quienes tuvimos el privilegio de trabajar junto a él.

hechos. El cálculo de la velocidad de circulación de los móviles involucrados es una de las tareas de investigación que se llevan a cabo al reconstruir un accidente de tránsito. Esta velocidad es un elemento de juicio fundamental para determinar el grado de responsabilidad de los conductores.

Como explican Aparicio Izquierdo *et al.* (2001), en muchas ocasiones,

cuando se produce una frenada severa o en condiciones de muy baja adherencia entre neumático y suelo, el esfuerzo de frenado aplicado a una o varias ruedas puede superar al máximo esfuerzo adherente y, en consecuencia, producirse el bloqueo de las mismas. (p. 319)

Cuando un vehículo frena con sus ruedas bloqueadas, se desliza sobre la calzada hasta llegar al estado de reposo. El presente trabajo aborda el cálculo del coeficiente de rozamiento, en base a la longitud de las marcas producidas por los neumáticos que rozan contra el pavimento durante el frenado con bloqueo de neumáticos. Conociendo la velocidad de un vehículo al momento de iniciar la frenada con bloqueo de ruedas, es posible calcular el coeficiente de fricción o adherencia.

A tal efecto, se midieron las longitudes de las huellas de neumáticos generadas a través de ensayos. Luego se emplearon las fórmulas para calcular la velocidad de circulación de un vehículo a través de la distancia de la huella marcada sobre el pavimento por el bloqueo de ruedas, así se determinaron los valores del coeficiente de adherencia correspondiente.

Para calcular la velocidad se aplican leyes, teoremas y principios de la física en base a datos e indicios disponibles, empleando el procedimiento adecuado a cada caso en particular. Como ejemplo citamos el Principio General de Conservación de la Energía:

En un proceso dado, las energías cinética, potencial e interna de un sistema pueden cambiar; pero la suma de todos los cambios siempre es cero. Una disminución en una forma de energía se compensa con un aumento en las otras. (Serway y Jewett, 2008, p. 231)

Significa que la Variación de Energía Cinética de un vehículo en movimiento al accionar los frenos se transforma en Trabajo:

$$\Delta E_{\text{sistema}} = \Sigma W$$

Dónde: ΔE sistema es la variación de la energía total del sistema, incluidos todos los métodos de almacenamiento de energía (cinética, potencial e interna) y ΣW es la suma de todos los trabajos realizados.

El Principio de Conservación de la Cantidad de Movimiento Lineal determina que

si la suma vectorial de las fuerzas externas sobre un sistema es cero, el momento lineal total del sistema es constante. Esta es la forma más sencilla del principio de conservación del momento lineal, el cual es una consecuencia directa de la tercera ley de Newton. La utilidad de este principio radica en que no depende de la naturaleza detallada de las fuerzas internas que actúan entre miembros del sistema, así que podemos aplicarlo incluso si (como suele suceder) sabemos muy poco acerca de las fuerzas internas. (Sears y Zemansky, 2009, p. 254)

Factores que influyen en la adherencia entre neumático y calzada

Antes de accionar los frenos, no existe un movimiento relativo o resbalamiento entre la rueda y el camino. Cuando un vehículo frena sin bloqueo de los neumáticos, estos mantienen rodadura pura, sin deslizamiento respecto de la superficie en contacto. La superficie de apoyo no tiene movimiento relativo con respecto a esta, entonces el rozamiento es de tipo estático (Berardo, 2003).

Al aplicar los frenos el camino genera una fuerza que retarda la velocidad angular de la rueda. Mientras la rueda comienza a perder velocidad, dicha fuerza deforma al compuesto de caucho y lo presiona tangencialmente contra las asperezas del camino. En este punto, la velocidad relativa o resbalamiento del neumático respecto del camino aumenta en comparación con la velocidad del vehículo previa al accionamiento de los frenos. Si continúa aumentando la fuerza de frenado, la rueda pierde completamente su agarre en el camino, se bloquea y comienza el deslizamiento. En estas circunstancias, la rueda alcanza el 100 % de resbalamiento y se desliza con fricción dinámica.

En maniobras de frenado de pánico rápidamente se bloquean las ruedas y casi todo el frenado se desarrolla con 100 % de deslizamiento. Irureta (2011, p.107) explica que

lo usual es que quién perciba un peligro inminente “clave” sus frenos, en lo que se llama “frenado de pánico o Stop panic”, provocando así dos efectos perjudiciales: por un lado, reduce la eficiencia de su frenado y, por otro, disminuyen las fuerzas de guía laterales (que actúan sobre los neumáticos, resistiendo al desvío en marcha recta, y permitiendo el accionar de la dirección cuando se quiere girar), por lo que merma también la eficiencia de la dirección, llegando virtualmente a anular los efectos que produce el giro del volante, e invalidando la ejecución de una maniobra de esquivar.

También advierte que durante este fenómeno físico se manifiesta el rozamiento o fricción por deslizamiento o fricción dinámica, que presentaría las siguientes características:

- Si la superficie donde se desarrolla el deslizamiento es horizontal, la fuerza requerida para que se deslice un cuerpo resulta proporcional a su peso.

- La fuerza de fricción es independiente de la magnitud del área de las superficies en contacto y en general la fricción dinámica es más baja que la estática. Esto se puede observar cuando empujamos un automóvil, por ejemplo: la fuerza que se debe hacer para que el rodado comience a moverse (fricción estática) va a ser mucho mayor a la que se debe ejercer cuando este ya comenzó levemente a rodar (fricción dinámica).

Existen diversos factores que influyen en la adherencia entre la rueda y el camino, como la temperatura, la presión superficial, la superficie de contacto, la resistencia a la rodadura y el coeficiente de fricción o adherencia. La temperatura de los neumáticos juega un papel importante en el desempeño del coeficiente de fricción, dado que el compuesto de caucho reacciona acentuadamente a diferentes temperaturas.

Estos serían algunos de los factores más relevantes que modifican el frenado de los vehículos. Es conveniente aclarar que son múltiples los factores que influyen en el resultado, pero que, para nuestro interés, solo se tomarán aquellos con los que cuenta el perito a la hora de realizar el relevamiento de la situación.

Respecto del coeficiente de adherencia o fricción, tema de nuestra investigación, debe tenerse en cuenta que siempre se habla de la existencia de un coeficiente de rozamiento o fricción, aunque los neumáticos no lleguen a bloquearse durante la frenada.

Huellas y Fórmulas

En el caso de este trabajo en particular, resultan de interés las denominadas huellas de frenado, representadas esquemáticamente en la Figura N° 1, que se caracterizan por ser huellas oscuras, que presentan estrías longitudinales en la misma dirección de avance de la huella (estas estrías se deben a las ranuras del dibujo del neumático). Irureta describe que “su ancho coincide con el ancho del contacto del neumático con el piso. Comienzan con una marcación suave y van oscureciéndose a medida que aumenta la temperatura del caucho por efecto de la fricción contra el piso” (2011, pp. 73-74). Esta fricción, según Wilson y Buffa, “se refiere a la omnipresente resistencia al movimiento que se da cuando dos materiales o medios están en contacto. Esta resistencia existe con todos los tipos de medios, sólidos, líquidos y gaseosos, y se caracteriza como fuerza de fricción (F)” (2007, p. 124).

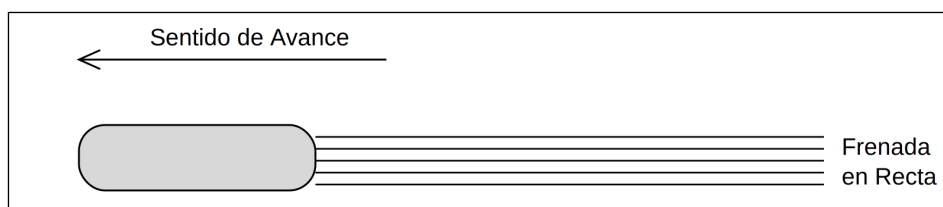


Figura N° 1. Esquema Huellas de Frenado. Fuente: *Creando conciencia* (<https://creandoconciencia.org.ar/enciclopedia/accidentologia/modelos-fisicos-matematicos/CALCULO-DE-VELOCIDAD-CON-HUELLA-DE-DERRAPE.pdf>)

Aplicando la denominada ecuación fundamental de la física a un vehículo que circula inicialmente a una velocidad v_0 (velocidad inicial) y se detiene tras dejar una distancia d (en metros) de huellas de frenada sobre una vía horizontal, es posible obtener una ecuación que permite calcular la velocidad de un vehículo a partir de dichas huellas.

Si tenemos en cuenta el Teorema del Trabajo Energía y consideramos que el coeficiente de fricción o adherencia surge de la relación entre la fuerza de fricción (F) y la fuerza normal (N), siendo esta última la reacción normal del peso del vehículo, cuya magnitud, de acuerdo a la Segunda Ley de Newton, es el producto de la masa (m) por la aceleración de la gravedad (g), obtenemos la siguiente expresión:

$$\Delta E_c = \text{Variación de energía cinética del rodado.}$$

T_f = trabajo de frenado realizado por la fuerza de frenado ($F = \mu N$) a lo largo de la distancia de frenado evidenciada por el largo "L" de las huellas de frenado.

La fuerza de frenado F se opone al avance del rodado, o sea $\theta = 180^\circ$, y $\cos \theta = -1$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_f^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 = -\mu \cdot N \cdot L = -\mu \cdot m \cdot g \cdot L$$

$$E_f - E_0 = -F_f \cdot L$$

donde:

$v_f = 0$ es la velocidad del vehículo al final de la huella de frenado.

v_0 = es la velocidad del vehículo al inicio de la huella de frenada.

m = masa del vehículo.

N = reacción normal en las ruedas del vehículo.

μ = coeficiente de fricción o adherencia.

g = aceleración gravitacional.

Operando se obtiene: $v_0^2 = 2 \cdot g \cdot \mu \cdot L$

$$v_0^2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \mu \cdot L}$$

La longitud de la huella es una medida importante para valorar la velocidad. A mayor longitud más rápido se desplaza el vehículo y dependerá del tipo de contacto que exista entre la calzada y el neumático, para poder evaluar cuál era el orden de velocidad en que se desplazaba. Habitualmente, si se logra reconocer toda la

longitud de la huella de frenado es posible aproximarse al valor real de circulación instantes antes de demarcar la huella con una aproximación de un 90 por ciento.

Metodología y diseño de la investigación

Nuestra investigación reproduce una situación real que se presenta a los investigadores de siniestros viales al tener que calcular velocidades de circulación de los vehículos, teniendo como dato la longitud de las marcas producidas por los neumáticos que rozan contra el camino cuando el vehículo que se desplaza frenando es un ómnibus urbano (huellas de frenado).

Midiendo la longitud de las huellas de frenado marcadas en el pavimento por el vehículo al frenar, y utilizando las fórmulas físico-matemáticas, se calcula la velocidad inicial del vehículo al comienzo de la frenada.

En el ensayo, se eligió piso seco y limpio por ser el más simple y común de las situaciones, la velocidad inicial, que se controló a través del velocímetro del tablero del vehículo y fue corregida mediante una segunda medición, simultánea, utilizando una Pistola Radar marca Bushnell (error de medición ± 2 km/h) y la medición de la distancia de huellas de frenado, con odómetro mecánico marca Trupe (rango de medición de 0 a 1000 m). Las otras variables que se relevan en el campo real son el estado de los neumáticos, se utilizaron neumáticos en buen estado de conservación y la temperatura de los mismos, que se aseguró fuera temperatura ambiente al tomar vehículos que se encontraban estacionados sin haber prestado servicio desde el día anterior a la realización del ensayo.

Con la validez de la ecuación fundamental, el valor del coeficiente de fricción se puede obtener reemplazando los valores de longitud de huella de frenado que se miden durante la investigación:

$$L = \frac{-v_0^2}{2g\mu}$$

Procedimiento de ensayos

Para el desarrollo de los ensayos, se utilizaron unidades de transporte urbano, en buenas condiciones y un espacio donde realizar las frenadas de manera segura.

La empresa DOTA SA de Transporte Automotor posee una pista de manejo ubicada en Camino de la Ribera Sur N° 80, Villa Fiorito, provincia de Buenos Aires, donde realiza una primera etapa del entrenamiento de los conductores ingresantes.

Se estableció un canal de colaboración institucional con las autoridades de la empresa DOTA SA, quienes facilitaron el acceso a la infraestructura y los recursos

operativos necesarios para la ejecución de la fase experimental. Tomamos contacto con la directora de Recursos Humanos, Lic. Gabriela Rodríguez, y el Responsable de Seguridad Vial de la empresa, Lic. Gustavo Vargas, quienes se comprometieron con el proyecto expresando el compromiso y la permanente preocupación por realizar acciones que tiendan a fortalecer la seguridad vial, que el Directorio de la empresa y su Gerente General, Daniel Rodríguez, llevan adelante cotidianamente. Las gestiones nos brindaron la posibilidad de utilizar la pista de entrenamiento para realizar los ensayos.

El jefe de personal y servicio Daniel Arlia, el jefe de mantenimiento Pablo Crudo y el instructor general Jeremías Larrea acondicionaron y pusieron a disposición el playón donde se encuentra la pista de manejo. Esta es una extensión de unos 1000 m de longitud y se encuentra emplazada con una calzada de pavimento de hormigón del tipo H21 alisado a fratacho, que se encontraba seca, limpia y en buen estado de conservación (Figura N° 2).

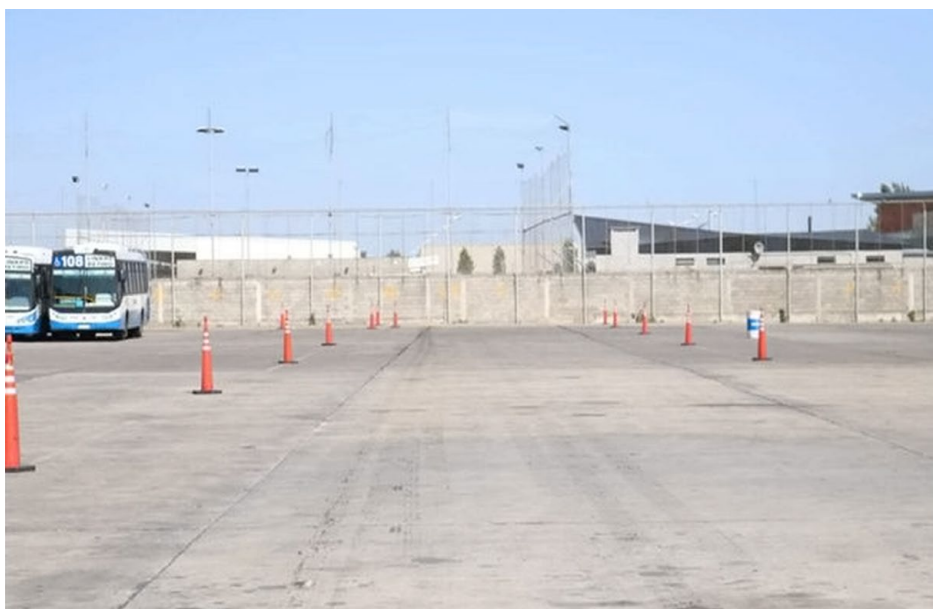


Figura N° 2. Pista de manejo de la empresa DOTA S.A.

La empresa DOTA también puso a disposición del ensayo la unidad 1: ómnibus articulado AGRALE MT 27.0 LE equipado con motor CUMMINS 6 cilindros EURO V., y la unidad 2: ómnibus AGRALE MT 17.0 LE equipado con motor MWM 6 cilindros (Figuras N° 3, 4 y 5).

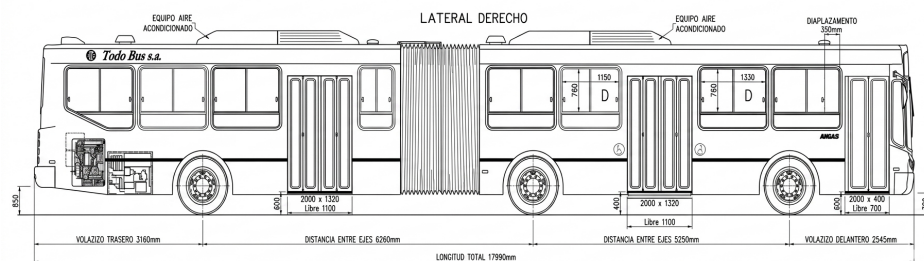


Figura N° 3. Ómnibus AGRALE MT 27.0 LE. Fuente: Empresa DOTA S.A.

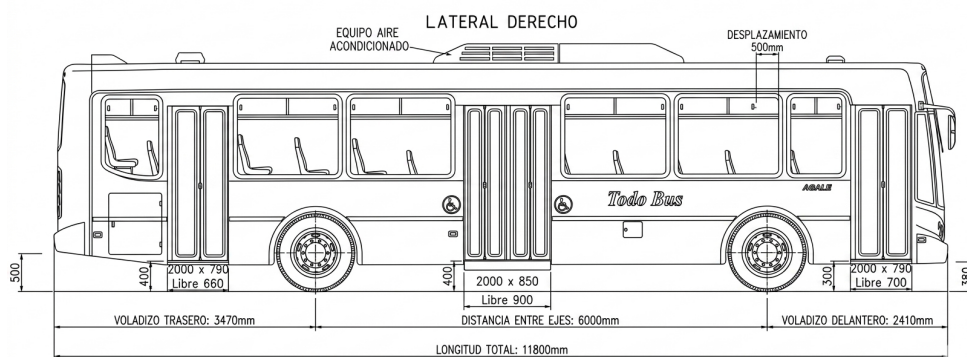


Figura N° 4. Ómnibus AGRALE MT 17.0 LE. Fuente: Empresa DOTA S.A.



Figura N° 5. Ómnibus AGRALE MT 27.0 LE y MT 17.0 LE.

Antes de realizar los ensayos se constató, en el taller de la empresa, que ambos móviles presentaban sus neumáticos con buen estado de sus bandas de rodamiento y adecuada presión de inflado (Figura N° 6).



Figura N° 6. Neumático ómnibus AGRALE MT 17.0 LE.
Fuente: Empresa DOTA S.A.

Se procedió a desconectar el retardador y el ABS, de manera que no tuvieran influencia en el frenado. Además, la presión de sus respectivos sistemas neumáticos de frenos era normal (7 bar) (Figura N° 7).



Figura N° 7. Tableros de los vehículos indicando el manómetro de presión de aire de freno

Los vehículos fueron conducidos por el responsable de seguridad vial de la empresa, Lic. Gustavo Vargas, quien siguió los procedimientos previstos. Posteriormente, se ubicaron los dos móviles en un sector del playón, colocando en la posición de inicio de ambas unidades un cono en el frente, de manera de marcar el sector de comienzo del ensayo.

Ensayo unidad 1

Una vez ubicada la unidad se procedió a hacer una prueba de distancia necesaria para lograr la velocidad de ensayo (40km/h), lugar que fue marcado como zona de posible inicio de la prueba de frenado. En esta otra posición se colocó otro cono solamente a modo de referencia.

El proceso de ensayo consiste en acelerar la unidad, desde la posición de reposo o velocidad cero, hasta el momento que el conductor alcanza la velocidad de 40 km/h (velocidad de ensayo). Esta velocidad tiene una doble corroboración: primero, el conductor con la colaboración de un acompañante que ayudaba a verificar cuando se alcanza la velocidad buscada en el tablero. Y, segundo, es verificada por el operador del radar, quien realiza la medición desde fuera de la unidad y tomando como referencia la luz de freno de la unidad.

El valor correcto de la velocidad al inicio de cada frenado se midió en km/h con Pistola Radar marca Bushnell (error de medición ± 2 km/h), utilizándose el correspondiente factor de conversión para expresar los registros de velocidad en metros/segundos (m/s) (Figura N° 8).



Figura N° 8. Pistola Radar marca Bushnell.

Desde la velocidad de ensayo el conductor aplica los frenos a fondo lo más rápido posible, simulando un frenado de pánico o *Stop panic*, con el objetivo de lograr el bloqueo de las ruedas para que el vehículo frene deslizándose sobre la calzada hasta llegar al estado de reposo y producir las marcas de las huellas de neumáticos.

Posteriormente, una vez finalizada la frenada y con la unidad detenida en posición final, se marca el fin de la huella de frenado de la rueda delantera con tiza y se coloca un tercer cono sobre la rueda delantera del rodado. A partir de ese momento otro operador realiza la toma de la longitud de la huella de frenado. Esta medición se realiza con odómetro siguiendo la huella demarcada en el hormigón (Figuras N° 9 y 10).



Figura N° 9. Medición Tramos de frenada.

La decisión de no realizar más ensayos y solo la cantidad de cinco frenadas con cada unidad a las diferentes velocidades, se tomó primero en función de poder disponer de una serie de valores que nos permitieran realizar un cálculo estadístico de promedio y debido a la dificultad de que la huella de frenado quede nítidamente visible en el camino, poder descartar alguno que no se ajustara a lo requerido. Un segundo motivo, pero muy relevante es el económico, ya que los neumáticos pertenecían a la empresa y en este tipo de frenado, sufren desgastes importantes que pueden limitar el uso posterior.

Las huellas de neumáticos fueron medidas con odómetro mecánico marca Trupe, rango de medición de 0 a 1000 m (Figura N° 10). Posteriormente, se procedió a realizar los cálculos del coeficiente, en base a las mediciones de las huellas de frenado.



Figura N° 10. Odómetro mecánico marca Trupe.

Resultado de las pruebas de frenado realizadas con el móvil 1

Se realizaron cinco pruebas de frenado violento con el ómnibus 1 (móvil 1), desde una velocidad de 40 km/h (11,11 metros/segundo), obteniéndose los siguientes valores de longitudes de huellas de frenado.

X_1	= 10,12 m
X_2	= 11,33 m
X_3	= 10,25 m
X_4	= 9,90 m
X_5	= 10,40 m

Valor promedio de las mediciones X

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{5}$$

$$\bar{X} = 10,40 \text{ m}$$

Desviación de cada medición E_i

$E_i =$	$X - X_i$
$E_1 =$	0,28 m
$E_2 =$	-0,93 m
$E_3 =$	0,15 m
$E_4 =$	0,50 m
$E_5 =$	0 m

Sumatoria de las Desviaciones cuadráticas:

$$i=5$$

$$\sum_{i=1}^i E^2 = 1,216 \text{ m}^2$$

Varianza de las Desviaciones cuadráticas:

$$\Omega = \frac{\sum E_i^2}{5} = 0,243 \text{ m}^2$$

Error Estándar

$$\sigma = \sqrt{\Omega} = 0,493 \text{ m}$$

Valor verdadero de la medición:

$$D = \bar{X} \pm \sigma$$

$$D = (10,4 \pm 0,49) \text{ m}$$

$$D_1 = 10,89 \text{ m}$$

$$D_2 = 9,91 \text{ m}$$

Cálculo del Coeficiente de Adherencia o Fricción para $V = 11,11 \text{ m/s}$:

$$\mu_1 = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D_1} = 0,58$$

$$\mu_2 = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D_2} = 0,63$$

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

$$\mu = 0,60$$

Resultado de las pruebas de frenado realizadas con el móvil 2

De igual modo se procedió con el siguiente rodado, solo que en esta oportunidad se realizó el ensayo inicialmente a una velocidad de 30 km/h, tomando otras cinco lecturas. Durante el primer ensayo de frenado se constató una considerable diferencia entre la velocidad indicada por el velocímetro del móvil y la controlada mediante pistola radárica. En consecuencia, se descartó la medición X_1 por considerarse que no era representativa del fenómeno físico en estudio (atribuible a una posible falla del aparato o del operador).

Valores de longitudes de huellas de frenado:

X_1	= 8,0 m (valor descartado)
X_2	= 6,5 m
X_3	= 6,0 m
X_4	= 6,2 m
X_5	= 5,5 m

Valor promedio de las mediciones \bar{X} :

$$\bar{X} = \sum \frac{X_i}{4}$$

$$\bar{X} = 6,05 \text{ m}$$

Desviación de cada medición E :

$E_i =$	$X - X_i$
$E_1 =$	-----
$E_2 =$	-0,45 m
$E_3 =$	0,05 m
$E_4 =$	0,15 m
$E_5 =$	0,55 m

Sumatoria de las Desviaciones cuadráticas:

$$\sum_{i=2}^{i=5} E_i^2 = 0,53 \text{ m}^2$$

Varianza de las Desviaciones cuadráticas:

$$\Omega = \frac{\sum E_i^2}{4} = 0,132 \text{ m}^2$$

Error Estándar de medición:

$$\sigma = \sqrt{\Omega} = 0,364 \text{ m}$$

Valor verdadero de la medición

$$D = \bar{X} \pm \sigma$$

$$D = 6,05 \text{ m} \pm 0,364 \text{ m}$$

$$D_1 = 6,41 \text{ m}$$

$$D_2 = 5,69 \text{ m}$$

Cálculo del Coeficiente de Adherencia o Fricción para $V = 30 \text{ Km/h} = 8,33 \text{ m/s}$:

$$\mu_1 = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D_1} = 0,55$$

$$\mu_2 = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D_2} = 0,62$$

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

$$\mu = 0,60$$

Posteriormente se repitió la prueba con la misma unidad, pero con una velocidad de 50 km/h (13,89 metros/segundo), realizando otras cinco pruebas de frenado violento, obteniéndose las siguientes longitudes de huellas de frenado:

X_1	= 16,37 m
X_2	= 14,17 m
X_3	= 15,90 m
X_4	= 16,20 m
X_5	= 17,10 m

Valor promedio de las mediciones X :

$$\bar{X} = \sum \frac{X_i}{5}$$

$$X = 15,95 \text{ m}$$

Desviación de cada medición E :

$E_i =$	$X - X_i$
$E_1 =$	-0,42 m
$E_2 =$	1,78 m
$E_3 =$	0,05 m
$E_4 =$	-0,25 m
$E_5 =$	-1,15 m

Sumatoria de las Desviaciones cuadráticas:

$$\sum_{i=2}^{i=5} E_i^2 = 4,732 \text{ m}^2$$

Varianza de las Desviaciones cuadráticas:

$$\Omega = \frac{\sum E_i^2}{4} = 0,946 \text{ m}^2$$

Error Estándar de medición:

$$\sigma = \sqrt{\Omega} = 0,973 \text{ m}$$

Valor verdadero de la medición:

$$D = X \pm \sigma$$

$$D = (15,95 \pm 0,973) \text{ m}$$

$$D_1 = 16,92 \text{ m}$$

$$D_2 = 14,98 \text{ m}$$

Cálculo del Coeficiente de Adherencia o Fricción para $V = 13,89 \text{ m/s}$:

$$\mu_1 = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D_1} = 0,58$$

$$\mu_2 = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D_2} = 0,66$$

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

$$\mu = 0,60$$

Conclusiones

Realizamos esta investigación buscando determinar el valor representativo del coeficiente de adherencia para neumáticos de ómnibus urbanos que frenan con bloqueo de ruedas, sin pasajeros (vehículo vacío), sobre pavimento horizontal, seco y limpio.

Se ejecutaron 15 pruebas de frenado violento utilizando dos tipos diferentes de ómnibus urbanos, aportados por la empresa DOTA. Fueron realizadas a distintas velocidades (30 km/h, 40 km/h y 50 km/h), sobre calzada horizontal de pavimento de hormigón del tipo H21 alisado a fratacho de unos 1000 m de longitud que se encontraba seca, limpia y en buen estado de conservación. Las velocidades al

inicio de cada frenado se midieron en km/h con Pistola Radar marca Bushnell utilizándose el correspondiente factor de conversión para expresar los registros de velocidad en metros/segundo. Posteriormente, se identificaron y midieron las huellas de cada una de las frenadas, utilizando cinta métrica y odómetro, para registrar el valor de lo medido.

Con los valores de longitud de las huellas de los neumáticos, obtenidas durante el ensayo, calculamos mediante las fórmulas físico-matemáticas el coeficiente de rozamiento (μ) correspondiente.

Como resultado de la investigación, encontramos que, para el cálculo de velocidad en base a huellas de neumáticos de ómnibus urbanos que frenan con bloqueo de ruedas sobre calzada de pavimento de hormigón, horizontal seca y limpia, el coeficiente promedio de adherencia o fricción da un valor $\mu = 0,60$. Este valor es válido para el rango de velocidades ensayado (30–50 km/h); a velocidades superiores, el coeficiente tiende a disminuir (Campón Domínguez *et al.*, 2020).

Estos resultados obtenidos de la investigación permitirán mejorar los procedimientos de cálculo de velocidad realizados por la Sección Unidad Accidentológica Federal de PFA y de otras fuerzas de seguridad que intervengan en temas relacionados con la investigación de siniestros viales, como Gendarmería Nacional, División Ingeniería Vial de Policía de la Ciudad de Buenos Aires, policías provinciales, etc. Asimismo, como aporte de conocimiento obtenido, será incorporado al contenido de formación de los actuales cursantes y egresados de la Licenciatura en Accidentología y Prevención Vial dictada en el Instituto Universitario de PFA.

Bibliografía

Aparicio Izquierdo, F.; Vera Álvarez, C. y Díaz López, V. (2001). *Teoría de los vehículos automóviles*. Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

Berardo, M. G. (2003). *Accidentes de tránsito*. Ediciones Mediterránea.

Borrell Vives, J.; Algaba García, P. y Martínez Raposo Piedrafita, J. (2000). *Investigación de accidentes de tráfico*. Academia de Tráfico de la Guardia Civil Española; Ediciones Gráficas LORMO.

Campón Domínguez, J. A.; San Román García, J. L.; Rodríguez Luque, P. A.; Díaz López, V.; Cocaña Rosco, J. F.; García-Pozuelo Ramos, D. y Fuentes Ortega, P. (2020). *La reconstrucción de siniestros viales*. ISBN 978-84-12-15755-0.

Fricke, L. (2002). *Traffic accident reconstruction: Vol. 2. The traffic accident investigation manual* (1.ª ed.). Northwestern University Traffic Institute.

Irureta, V. A. (2011). *Accidentología vial y pericia*. Ediciones La Rocca.

Sears, F. W., y Zemansky, M. W. (2009). *Física universitaria* (Vol. 1, 12.ª ed.). Pearson Educación.

Serway, R. A. y Jewett, J. W. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (Vol. 1, 7.ª ed.). Cengage Learning.

Wilson, J. D. y Buffa, A. (2007). *Física* (6.ª ed.). Pearson Educación.

Cita sugerida: Fernández, D.O.; Salvarrey, F.J.G.; Costoya, J.C.; Argentieri, A.; Montaña, S. y Pasuchio, J. (2026). Coeficiente de adherencia neumático-calzada en ómnibus urbanos: estimación de velocidad a partir de huellas de frenado en calzada seca y limpia. *Minerva. Saber, arte y técnica*, 10(1). Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA), pp. 20-39.

***FERNÁNDEZ, DANIEL OSVALDO**

Esp. en Docencia Universitaria, Ing. Mecánico, Profesor y director de Carreras Área Seguridad Vial del Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA).

****SALVARREY, FERNANDO JESÚS GABRIEL**

Licenciado en Accidentología y Prevención Vial por el Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA). Perito oficial de la Sección Unidad Accidentológica Federal.

*****COSTOYA, JUAN CARLOS**

Arquitecto. Profesor en Disciplinas Industriales en la Universidad Tecnológica Nacional (UTN).

******ARGENTIERI, ADRIÁN**

Esp. en Docencia Universitaria. Lic. en Accidentología y Prevención Vial por el Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA).

*******MONTAÑO, SEBASTIÁN**

Lic. en Accidentología y Prevención Vial por el Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA).

*******PASUCHIO, JONATAN**

Lic. en Accidentología y Prevención Vial por el Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA).