

Determinación del Coeficiente de Resistencia del Camino mediante un Método de Remolque

Determination of the way Resistance Coefficient using a Trailer's method.

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.04>

Artículo de investigación científica. Fecha de recepción: 23 de mayo de 2017. Fecha de aceptación: 27 de junio de 2017.

Ramón Pérez Gálvez 

Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos (Cuba).
rgalvez@ucf.edu.cu

José Ramón Fuentes Vega 

Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos (Cuba).
jfuentes@ucf.edu.cu

Juan Bautista Cogollos Martínez 

Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos (Cuba).
rector@ucf.edu.cu

Víctor Millo Carmenate 

Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos (Cuba).
vmillo@ucf.edu.cu

Leandro Oscar Botana Beltrán 

Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos (Cuba).
obotana@ucf.edu.cu

Para citar este artículo:

R. Pérez Gálvez, J.R. Fuentes Vega, J.B. Cogollos Martínez, V. Millo Carmenate y L. O. Botana Beltrán, "Determinación del Coeficiente de Resistencia del Camino mediante un Método de Remolque" *INGE CUC*, vol. 13, no. 2, pp. 35-41, 2017. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.04>

Resumen

Introducción– El transporte automotor terrestre es un importante contribuyente del consumo de combustible a nivel mundial. Existen muchos factores relacionados con este consumo y también varias maneras de estudiarlo. Los ciclos de viaje basados en la modelación matemática son herramientas probadas para comprender, estimar y pronosticar el consumo de combustible.

Objetivo– Los modelos matemáticos que se solucionan con los perfiles reales de coeficiente de resistencia al camino por las vías por las cuales circulan los vehículos brindan los resultados más exactos. Es por eso que la determinación experimental del coeficiente de resistencia del camino es el objetivo de la investigación.

Metodología– Se diseña y construye un remolque, asimismo, se conducen experimentos de calibración estática y dinámica para conocer las cualidades de los sistemas que intervienen en la medición. Posteriormente, se realizan ensayos en un sector de vía para la verificación y, a continuación, se efectúan experimentos en carreteras de recubrimientos y pendientes variables.

Resultados– Se establece el uso del instrumento para mediciones del coeficiente de resistencia al rodamiento en condiciones viales con valores del coeficiente de resistencia a la rodadura de 0,008-0,02 (recubrimientos viales con base de cemento o asfalto) y pendientes de 0-12o.

Conclusiones– Los resultados demuestran que bajo este método se puede medir de manera precisa y exacta el coeficiente de resistencia del camino.

Palabras clave– Camino, carretera, coeficiente, determinación, pendiente, resistencia, rodadura, remolque

Abstract

Introduction– The fuel consumption of the ground vehicle transportations constitutes an important part in the total fuel consumption of the world. There are many factors related to this fuel consumption and several ways to study it. The drive cycles based on the mathematical modeling are tools to understand, to estimate and to predict the vehicle fuel consumption.

Objective– Usually the simulating is most exact when the mathematical models are solved with the real profiles of way resistance coefficient. For that reason, the experimental determination of the coefficient of resistance of the road is the objective of this research.

Methodology– A trailer was designed and built and statically and, in order to know the features of the systems that are involved in the coefficient measuring process, a group of experiments of static and dynamic was conducted. Later, a road sector for validation was calibrated and then others road with variation in slope and road surface was studied.

Results– This method is able to measure the way resistance coefficient that corresponding with road conditions of values of rolling resistance of 0,008 - 0,02 (made of asphalt or cement) and slopes of 0-12o.

Conclusions– The results demonstrate that this method is accurate and precise for the determination of the way resistance coefficient

Keywords– Coefficient, determination, resistance, road, rolling, slope, trailer, way.

I. Introducción

El transporte es un alto consumidor de derivados del petróleo, muy por encima incluso del sector industrial en muchos países, y, dentro del sector del transporte, el automotor terrestre representa el principal consumidor de energía. Dada la correspondencia entre consumo de combustible y contaminación ambiental, con la elevada utilización de los derivados del petróleo en sus fuentes energéticas, el transporte constituye uno de los principales contribuyentes a la contaminación ambiental.

Los ciclos de viaje son herramientas que se utilizan para solucionar problemas de ingeniería de las transportaciones, para explicar la influencia de determinados factores en los procesos reales, entre ellos: el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes. Muchos ciclos de viaje utilizados internacionalmente son modelados matemáticamente. En ellos se simulan los regímenes de operación del vehículo y necesitan la caracterización de la vía para introducirla en los modelos. Desde el punto de vista de la resistencia vial, una vía queda caracterizada cuando se han establecido por estimación o por determinación experimental los valores del coeficiente de resistencia del camino o sus componentes a lo largo de ella, siendo éste el método de determinación experimental que brinda resultados más precisos en la simulación [9].

La fuerza de resistencia del camino no es más que la suma de la resistencia al rodamiento, vinculada a las pérdidas que se producen fundamentalmente por la deformación del neumático y de la superficie de apoyo durante el movimiento del vehículo y la fuerza debida a la pendiente, que no es más que la componente del peso paralela a la superficie de apoyo en vías con pendiente. Esta última, en sentido ascendente tiene un efecto resistivo, y durante el descenso, un efecto motriz.

La resistencia al rodamiento (P_r) se determina como el producto de la resultante de las fuerzas verticales actuantes sobre el vehículo o remolque por el coeficiente de resistencia al rodamiento (f). Generalmente, la resultante de las fuerzas verticales sobre el vehículo no es más que la componente normal del peso, de aquí que en el vehículo:

$$P_r = G \cdot f \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

Donde:

G = peso del vehículo, N

α = ángulo de inclinación de la vía en grados

Para la determinación del coeficiente de resistencia al rodamiento, según la clasificación de [1], existen cuatro métodos básicos para su determinación: (i) método de neumático vs rodillos; (ii) método del remolque; (iii) método de "punto muerto"; y (iv) método de consumo de combustible.

Entre las investigaciones vinculadas, explícita e implícitamente, la determinación del coeficiente de resistencia a la rodadura se pueden citar, entre otras, a [1], [4]-[5]; las normas y procedimientos para la determinación de sus coeficientes están en [12]-[13]; y las patentes que describen los métodos o sistemas para su determinación en [4] y [11].

La resistencia a la pendiente (P_α) queda definida por:

$$P_\alpha = G \cdot \text{sen}\alpha \quad (2)$$

En la determinación del valor de la pendiente del camino para obtener el valor de P_α , se pueden emplear diferentes alternativas, destacándose el uso de sistemas de posicionamiento global [2], [6]-[7], sistemas de navegación inercial [14], medidores de altitud y de torque, y, por último, los inventarios de vías, apoyados o no por los sistemas de información geográfica.

De lo revisado, se pone en evidencia que muchos investigadores realizan la determinación de ambas fuerzas: resistencia al rodamiento y fuerza debida a la pendiente de forma independiente.

La resistencia al camino viene expresada por:

$$\begin{aligned} P_c &= P_r + P_\alpha \\ &= G \cdot f \cdot \cos\alpha + G \cdot \text{sen}\alpha \\ &= G \cdot (f \cdot \cos\alpha + \text{sen}\alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

Siendo: P_c la fuerza de resistencia al camino, N

Como es conocido, el coeficiente adimensional f depende de la velocidad de movimiento. Esta dependencia se expresa de diferentes formas por diferentes investigadores. En este trabajo se empleará el criterio de [9], quien expresa que diversos autores establecen la siguiente dependencia:

$$f = f_o + k_f \cdot V^2 \quad (4)$$

Donde: f_o es el valor del coeficiente de resistencia al rodamiento para bajas velocidades de movimiento; k_f es un coeficiente adimensional, cuyo valor oscila de un autor a otro. En sus trabajos [3] y [9] utilizan el siguiente: $k_f = 7 \cdot 10^{-6}$

También puede expresarse la resistencia al camino como:

$$P_c = G \cdot \psi \quad (5)$$

Donde: ψ es el coeficiente adimensional de resistencia al camino.

De tal forma, puede decirse que:

$$\psi = \psi_o + k_\psi \cdot V^2 \quad (6)$$

Siendo ψ_o el valor de resistencia al camino para bajas velocidades de movimiento.

A los fines de la modelación matemática de los ciclos de viaje, [9] utiliza la expresión (5), de tal modo, se evalúa simultáneamente la resistencia al rodamiento y la fuerza debida a la pendiente, no existiendo necesidad de desglosar la resistencia al camino en sus dos componentes.

Esta consideración posibilita el diseño de un remolque para experimentos vehiculares de carretera de rueda única (5ta rueda), de modo que el vehículo tractor mida la fuerza de resistencia que genera el mismo en su movimiento a través de la barra de acoplamiento de ambos. Conociendo el peso del remolque, el cual determina la deformación del neumático y la superficie de apoyo, puede obtenerse el coeficiente de resistencia del camino en función de la carga vertical aplicada a la rueda, tal y como se muestra en la expresión (7), donde P es la fuerza que actúa en el acoplamiento entre remolque y vehículo, proporcional al esfuerzo resistivo $G \cdot \psi$.

$$\psi = P / G \quad (7)$$

II. Metodología

A. Remolque para determinar el coeficiente de resistencia del camino

En la fig. 1 se muestra el esquema propuesto del remolque para determinar el coeficiente de resistencia al camino y las fuerzas actuantes sobre el mismo:

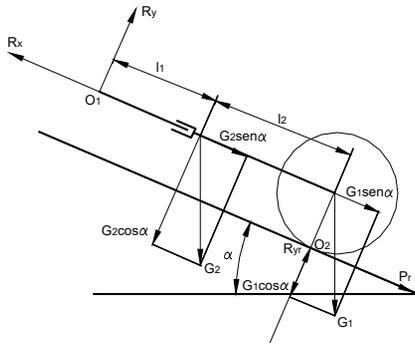


Fig. 1. Diagrama del cuerpo libre del remolque moviéndose en una vía con inclinación α .
Fuente: [3] [9]

Donde: $G1$ = peso de los contrapesos que actúan directamente sobre el eje la rueda, N; $G2$ = peso del remolque totalmente equipado sin los contrapesos, N; $l1$ = distancia desde el acoplamiento del remolque al centro de gravedad, cm; $l2$ = distancia desde el eje de la rueda del remolque al centro de gravedad, cm; Rx , Ry = componentes longitudinal y perpendicular de la fuerza en el acoplamiento del remolque, respectivamente, N; Ryr = reacción normal del suelo sobre la rueda, N; y λ = coeficiente de proporcionalidad entre las coordenadas del centro de gravedad.

Realizando sumatoria de momentos con respecto a $O1$:

$$\begin{aligned} \sum M_{O1} &= 0 \\ R_{yr} \cdot (l_1 + l_2) + P_r \cdot r_d - G_2 \cdot \cos\alpha \cdot l_1 \dots \\ \dots - G_1 \cdot \cos\alpha \cdot (l_1 + l_2) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Sustituyendo: $R_{yr} = P_r/f$ en (8) y despejando la resistencia a la rodadura, se obtiene:

$$P_r = \left(\frac{G_2 \cdot l_1 + G_1 \cdot (l_1 + l_2)}{l_1 + l_2 + f \cdot r_d} \right) \cdot f \cdot \cos\alpha \quad (9)$$

Como el producto $f \cdot r_d < 0$, se desprecia. De tal modo, la expresión anterior queda como:

$$P_r = \left(\frac{G_2 \cdot l_1 + G_1 \cdot (l_1 + l_2)}{l_1 + l_2} \right) \cdot f \cdot \cos\alpha \quad (10)$$

Si se define $\lambda = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$ se puede simplificar la expresión (10), la cual quedaría como:

$$P_r = (G_2 \cdot \lambda + G_1) \cdot f \cdot \cos\alpha \quad (11)$$

La resistencia al camino, queda entonces en función de:

$$R_x = (G_2 \cdot \lambda + G_1) \cdot f \cdot \cos\alpha + (G_1 + G_2) \cdot \sin\alpha \quad (12)$$

B. Sistema para determinar el coeficiente de resistencia del camino

En la fig. 2 se muestra el remolque para experimentos vehiculares. Está compuesto de una rueda (1), cuya velocidad angular se mide a través del detector de vueltas (2), y la resistencia al camino, a través del transductor *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) (3). Ambos sensores van soportados en la estructura, al igual que los mecanismos, en concreto: el que permite el desplazamiento de la camisa (4), que contiene un resorte interior y está acoplado al vástago (7). En el diámetro exterior de la camisa (4) se atornilla la brida (5), que contiene los rodamientos (6), cuya pista exterior se desplaza sobre parte de la estructura. Su diseño garantiza la menor holgura en la dirección transversal al desplazamiento principal y la menor resistencia al desplazamiento. El cuerpo del transductor LVDT (3), se fija a la parte móvil de la estructura y el vástago del transductor (9), al vástago del sistema de resorte (7), así se permite el desplazamiento paralelo del vástago del sensor respecto al desplazamiento principal del aparato. En la unión (8) se fija el vástago del sistema de resorte (7) con la parte fija de la estructura. Asimismo, la estructura se conecta a la base (11) mediante el sistema de pivote (10), que garantiza el giro del sistema en la dirección transversal al desplazamiento principal del aparato para evitar daños durante la interacción con el camino. La base (11) está conectada de forma rígida con el chasis del vehículo tractor (12).

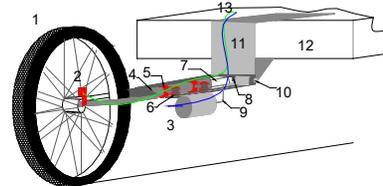


Fig. 2. Remolque para experimentos vehiculares de carretera ("5ta rueda").
Fuente: [3] [9]

El funcionamiento se describe a continuación: al interactuar la rueda (1) con el camino, se produce una fuerza proporcional a esta interacción que acciona sobre el resorte en el interior de la camisa (4). Esta fuerza se refleja en forma de señal eléctrica por el transductor LVDT (3) y es enviada al Sistema de Adquisición de Datos (SAD) por los conductores (13). Para registrar el valor de esta fuerza, se necesitan los mecanismos (4), (5), (6), (7), (8), (9) y (10), relacionados anteriormente. La medición de la velocidad angular de la rueda se produce en el SAD con los impulsos provenientes del detector (2), que incluye un *relay reed* conectado en la estructura y puntos magnéticos en los radios de la rueda (1). La señal es enviada al SAD por los conductores (13).

El diseño electrónico consta de los subsistemas de alimentación, control y adquisición de datos, que posee una tarjeta de adquisición de datos, una tarjeta de expansión y el ordenador personal. Para el trabajo con los datos se confecciona un instrumento virtual para la adquisición y procesamiento de datos en LABVIEW, que contiene un contador de tiempo y calcula el coeficiente de resistencia al camino a partir de la fuerza de resistencia correspondiente.

Se concibieron los siguientes ensayos para determinar el coeficiente de resistencia del camino.

C. Determinación de las características estáticas del sistema de medición del coeficiente de resistencia del camino

1) Objetivos de la prueba:

(i) Obtener la dependencia voltaje vs fuerza del sistema total; (ii) obtener la dependencia desplazamiento vs fuerza del sistema masa-resorte.

2) Instrumentos necesarios:

Remolque sin la rueda, computadora y sistema de adquisición de datos, inversor de tensión, baterías de acumuladores, calibres de pesaje, medidor láser de desplazamiento y multímetro.

3) Procedimiento:

(i) Comprobar calibres de pesaje en balanza digital; (ii) comprobar frecuencia y tensión del sistema de alimentación (inversor de tensión); (iii) colocar los calibres de pesaje para traccionar el “pistón” de la 5ta rueda; (iv) registrar lecturas: voltaje, peso del calibre y desplazamiento; (v) ensayar con 10 calibres en sentido ascendente y descendente; (vi) adquirir los datos.

4) Otras operaciones:

Calcular errores: (i) calcular desviación estándar del voltaje; (ii) calcular desviación estándar del desplazamiento; (iii) calcular error aleatorio o imprecisión; (iv) calcular inexactitud total.

D. Determinación de las características dinámicas del sistema de medición del coeficiente de resistencia del camino

1) Objetivos de la prueba:

(i) Obtener la respuesta al paso voltaje vs. fuerza del sistema completo; (ii) obtener la ecuación de transferencia del sistema completo.

2) Instrumentos necesarios:

Los mismos del experimento anterior.

3) Procedimiento:

(i) Comprobar calibres de pesaje en balanza digital; (ii) comprobar frecuencia y tensión del sistema de alimentación (inversor de tensión); (iii) en la misma instalación experimental se coloca un calibre de pesaje al “pistón” de la 5ta rueda y se deja que establezca su posición, entonces se interrumpe súbitamente la acción de esta fuerza sobre el sistema y se toma la lectura en el instrumento virtual para la adquisición y procesamiento de datos: voltaje vs peso del calibre; (iv) se obtiene el gráfico respuesta del impulso; (v) para que la muestra sea significativa (95% de confianza, error 5%), se realizan ocho corridas con el mismo calibre. Se realizan otras corridas para 3 calibres de otros pesos; (vi) se determinan en la opción *Identifier* de MATLAB las constantes del sistema de segundo orden para el grado de amortiguamiento correspondiente.

4) Otras operaciones:

Obtener: (i) respuesta de frecuencia; (ii) respuesta impulsiva; (iii) error dinámico.

E. Pesaje de los componentes del remolque para experimentos de carretera

1) Objetivos de la prueba:

(i) Obtener el peso de cada uno de los componentes del remolque, así como de la 5ta rueda completa; (ii) reacción de la rueda en el terreno vs. desplazamiento de los mecanismos del remolque.

2) Instrumentos necesarios:

Quinta rueda totalmente equipada, balanza digital, equipamiento de sostén.

3) *Procedimiento:*

(i) Determinar el peso de cada elemento (10 corridas, nivel de confianza de 95% y error 5%); (ii) determinar el peso de la 5ta rueda completa; (iii) determinar la carga vertical de la rueda sobre el plano en la posición inicial; (iv) determinar la carga vertical de la rueda sobre el plano, a 9 intervalos del rango de desplazamiento durante el trabajo de los mecanismos, en sentido ascendente y descendente.

F. *Corridas en tramo de verificación*

Una vez conocidas las características estáticas y dinámicas del sistema y verificado el pesaje, se evalúa el sistema de medición del coeficiente de resistencia al camino del remolque de 5ta rueda en un tramo de verificación.

Se elige un tramo de una vía con una longitud mayor que 540 m, con recubrimiento de asfalto, diferentes grados de deterioro y pendientes variables en su longitud. La prueba se realiza sin cambios de marcha (con dos corridas una de ida y otra de regreso) a velocidad constante: $\frac{d^2x}{dt^2} \rightarrow 0$ y menor que 10 m/s, de modo que: $\psi = \psi_0$.

G. *Experimentos de caracterización vial*

1) *Objetivos de la prueba:*

(i) Obtener el valor del coeficiente de resistencia del camino (ψ_0) en el tramo de verificación.

2) *Instrumentos necesarios:*

Remolque 5ta rueda totalmente equipada, computadora y sistema de adquisición de datos, inversor de tensión, herramientas, multímetro, cinta aislante, material gastable (estopas, grasa, lubricantes, cuerda).

3) *Procedimiento:*

(i) Seleccionar minuciosamente el escenario donde se efectuará la prueba; (ii) caracterizar visualmente el tramo; (iii) comenzar la medición a velocidades lo más bajas y estables posibles, es decir, sin cambios de marcha a velocidad constante: $\frac{d^2x}{dt^2} \rightarrow 0$ y menor que 10 m/s, de modo que: $\psi = \psi_0$.

La medición se inicia después de que el vehículo ha alcanzado una velocidad estable; (iv) realizar corridas de ida y vuelta; (v) registrar los datos en el instrumento virtual para la adquisición y procesamiento de datos: V (m/s), S (m) y ψ_0 ; y (vi) elaborar el perfil del coeficiente de resistencia del camino (ψ_0) del tramo estudiado en el procesador gráfico.

III. *Discusión de los Resultados*

A. *Características estáticas del sistema de medición: errores.*

La ecuación de ajuste o característica estática obtenida para el sistema completo fue:

$$P = \frac{24,4339 - 3,5677 \cdot E}{1 + 0,0285 \cdot E - 0,0247 \cdot E^2} \pm 1,06 \text{ (N)} \quad (13)$$

Siendo E la tensión eléctrica proveniente del LVDT que registra el sistema de medición.

B. *Características dinámicas del sistema de medición: errores.*

Dentro del estudio de las propiedades dinámicas, la ecuación característica del sistema completo en el dominio de Laplace $G(s)$ fue:

$$G(s) = \frac{1,43}{1 + 0,1090s + (0,0775s)^2} \exp(-0,0075s) \quad (14)$$

El error dinámico, en un instrumento de segundo orden durante la respuesta a un paso, se define como la amplitud de la oscilación que produce dicho instrumento alrededor de la lectura del valor real. Para el sistema de medición completo, el mayor error dinámico que se podría cometer es del 9%.

Las características dinámicas también se pueden expresar de modo general para el instrumento de segundo orden (14), como:

$$P = m_{ms} \frac{d^2x}{dt^2} + cv \frac{dx}{dt} + krx \quad (15)$$

Donde: m_{ms} es la masa del sistema masa-resorte; c_v es el coeficiente de amortiguamiento viscoso; k_r es la constante elástica del resorte; x es la deformación del resorte y t es el tiempo.

Puesto que la velocidad con que se deforma el resorte con respecto al tiempo es pequeña, lo cual se garantizó evitando los cambios bruscos en la velocidad de movimiento durante la caracterización vial y dado que también el sistema tiene un bajo coeficiente c_v , se pueden despreciar las fuerzas de inercia y de amortiguamiento en la expresión. Entonces, la fuerza elástica domina el sistema y en éste se puede asumir la medición como en condiciones estáticas, despreciando los errores dinámicos.

C. *El perfil de resistencia al camino y la base de datos correspondiente en las vías estudiadas.*

La dispersión de los valores de fuerza, obtenida en uno de los experimentos de caracterización vial a través del sistema de medición de ψ_0 , se muestra en la fig. 3.

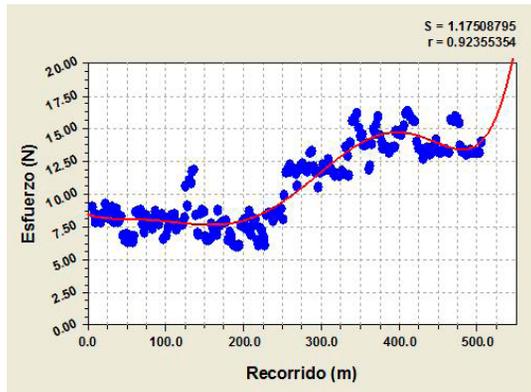


Fig. 3. Valores de la fuerza que actúa sobre el sistema de medición detectados en el camino. Fuente: [3] [9]

Los experimentos fueron realizados en pavimento asfáltico, seco y condiciones ambientales de temperatura $(32,3 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$ y humedad relativa $(63,1 \pm 3\%)$. Es coherente que los valores de la fuerza que se miden se distribuyan alrededor de la línea de tendencia, con una conducta similar a las variaciones de la pendiente en la vía estudiada. Los valores de fuerza registrados en el experimento no están afectados por el efecto de la aceleración del vehículo durante el movimiento.

Se descartó el grupo de las mediciones correspondientes al inicio y conclusión del movimiento, con la finalidad de evitar la contaminación de las mediciones por la aceleración, sobre todo en el inicio, que está influenciado además por la constante de tiempo calculada a partir de las cualidades dinámicas del sistema.

La inexactitud expresada como la mayor desviación horizontal entre los puntos y la línea ajustada fue 1,06 N, y coincidió con la precisión establecida para un intervalo de confianza de 95%. En este caso, la inexactitud se estableció como un 5,6 % de toda la escala del sistema completo y fue el mayor error que se puede cometer durante la medición en condiciones estáticas.

Partiendo de (3), la inexactitud total durante la medición de ψ_0 ($d\psi_0$) es:

$$d\psi_0 \left| \frac{\partial \psi_0}{\partial f_0} \cdot df_0 \right| + \left| \frac{\partial \psi_0}{\partial \text{sen}\alpha} \cdot d\text{sen}\alpha \right| \quad (16)$$

Para el coeficiente de resistencia a la rodadura (12), si $R_x = P$; y $G_1 = G_2$:

$$f_0 = f \cdot \text{cos}\alpha = \frac{P - (2 \cdot G_1 \cdot \text{sen}\alpha)}{(1,3888) \cdot G_1} \quad (17)$$

$$df_0 = \left| \frac{\partial f_0}{\partial G_1} \cdot dG_1 \right| + \left| \frac{\partial f_0}{\partial P} \cdot dP \right| + \left| \frac{\partial f_0}{\partial \alpha} \cdot d\alpha \right| \quad (18)$$

Y para la inclinación de la vía:

$$\text{sen}\alpha = \frac{P - ((G_1 \cdot 1,3888) \cdot f \cdot \text{cos}\alpha)}{(2 \cdot G_1)} \quad (19)$$

$$d\text{sen}\alpha = \left| \frac{\partial \text{sen}\alpha}{\partial G_1} \cdot dG_1 \right| + \left| \frac{\partial \text{sen}\alpha}{\partial P} \cdot dP \right| + \left| \frac{\partial \text{sen}\alpha}{\partial \alpha} \cdot d\alpha \right| + \dots + \left| \frac{\partial \text{sen}\alpha}{\partial f} \cdot df \right| \quad (20)$$

Resolviendo las ecuaciones, y si: $0 < \alpha < 12^\circ$; $0,008 < f_0 < 0,02$; y $G_1 = 176,22 \text{ N}$, se obtiene el rango de inexactitud total, que es: $0,00052 < d\psi_0 < 0,000575$.

En los experimentos, en un tramo de vía de pendiente y estado variable, las variaciones del valor del coeficiente de resistencia al camino (CRC) con respecto al recorrido se muestran en la fig. 4.

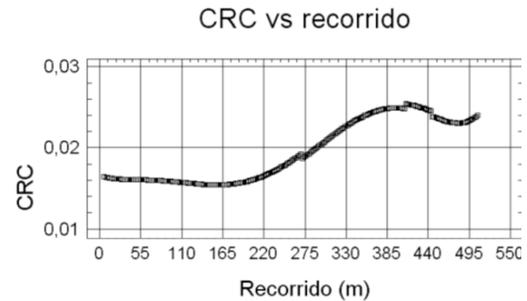


Fig. 4. Variación de ψ_0 en un tramo de vía de condiciones variables. Fuente: [10]

El perfil de ψ_0 obtenido versus el desplazamiento es adecuado si se tiene en cuenta que efectivamente existen tres pendientes (desde el inicio hasta los 200 m, desde los 200 m hasta los 400 m y desde los 400 m hasta el final) en el tramo de vía elegido y dos capas de recubrimiento asfáltico de distinta edad (desde los 200 a los 400 m y otra más nueva para el resto del recorrido).

Se realizó otra caracterización vial experimental en una vía principal; la vía prácticamente no tiene variaciones en la pendiente, posee pavimento asfáltico y la medición se realiza en condiciones ambientales de temperatura $(31,4 \pm 1,1 \text{ }^\circ\text{C})$ y humedad relativa $(69,5 \pm 1\%)$. Este sector de vía principal forma parte de una autopista de la ciudad, por lo que no presenta cambios significativos en el coeficiente de resistencia al camino (fig.5), como en el escenario discutido en el tramo de vía anterior. Dado que las mediciones se efectuaron en el carril de baja velocidad de la autopista, se destaca el ligero decrecimiento del valor del coeficiente ψ_0 en un sector (860 a 1000 m, aproximadamente) donde los vehículos disminuyen velocidad para incorporarse a una vía secundaria.

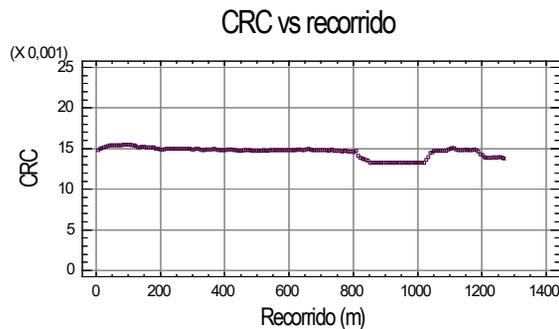


Fig. 5. Variación de ψ_0 en una vía principal.
Fuente: [10]

Concluyendo, se ofrece el valor medio de las vías caracterizadas:

Escenario 1, tramo de vía con condiciones variables:

$$\psi_0 = 0,0195 \pm 0,00035 [0,0192; 0,0199]$$

Escenario 2, vía principal:

$$\psi_0 = 0,0146 \pm 0,00007 [0,0145; 0,0147]$$

IV. Conclusiones

La calibración de la 5ta rueda demuestra que es capaz de medir de forma precisa y exacta las variaciones que se producen en el estado y pendiente de la vía.

Los experimentos de carretera validan el uso del instrumento para mediciones del coeficiente de resistencia al rodamiento en condiciones viales para valores del coeficiente de resistencia a la rodadura de 0,008-0,02 (recubrimientos viales de cemento o asfalto), pendientes de 0-12° y velocidades estables menores de 10m/s.

Referencias

- [1] Andersen, L. G., Larsen, J. K., Fraser, E. S., Schmidt, B. y Dyre, J. C., "Rolling resistance measurement and model development," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 141, no. 2, 2014.
- [2] Boroujeni, B. Y., Frey, H. C. y Sandhu, G. S., "Road grade measurement using in-vehicle, stand-alone GPS with barometric altimeter," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 139, no. 6, pp. 605-611, 2013.
- [3] Fuentes Vega, J. R., Cogollos Martínez, J. B., Millo Carmenate, V. y Pérez Gálvez, R., "Modelación matemática de ciclos de viaje e indicadores dinámicos y de consumo para vehículos pesados." [Ponencia]. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad México, 2015.
- [4] Hammarström, U., Eriksson, J., Karlsson, R. y Yahya, M. R., "Rolling resistance model, fuel consumption model and the traffic energy saving potential from changed road surface conditions," *Statens väg-och transportforskningsinstitut*, pp. 100, 2012.
- [5] Haider, M., Conter, M. y Glaeser, K.-P. Discussion paper what are rolling resistance and other influencing parameters on energy consumption in road transport, Models for Rolling Resistance in Road Infrastructure Asset Management Systems (MIRIAM), AIT, Austria. 26. 2012.
- [6] Hunt, B. y McQuade, C. M., *U.S. Patent No. 9,280,435*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2016.
- [7] Jeong, D. y Byeongwook, J. E. O. N., *U.S. Patent Application No. 14/542,199*, 2014.
- [8] Mekid, S., Gilavdary, I. y Riznookaya, N., *U.S. Patent No. 8,442,777*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2013.
- [9] Pérez Gálvez, R. "Modelación de ciclos de viaje e indicadores dinámicos y de consumo para vehículos pesados". [Tesis de doctorado en Ciencias Técnicas]. Depart. de Ing. Mecán., Fac. de Ing. Mecán., Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba, 2007.
- [10] Pérez Gálvez, R. y otros, "Determinación experimental del coeficiente de resistencia del camino." [Conclusión de investigación]. Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba, p. 20, 2016.
- [11] Potts, G. R., *U.S. Patent No. 7,591,167*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2009.
- [12] Society of Automotive Engineers (SAE) J1269, «Rolling Resistance Measurement Procedure for Passenger Car, Light Truck, and Highway Truck and Bus Tires.» SAE J1269, Warrendale, PA, 2006.
- [13] Society of Automotive Engineers (SAE) J2452, «Stepwise Coastdown Methodology for Measuring Tire Rolling Resistance.» SAE J2452, Warrendale, PA. 1999.
- [14] Zhi, X., Hoshizaki, T., Loomis, P. V. W. y Stockwell, W. K., *U.S. Patent Application No. 14/676,595*, 2015.