

FORMULACIÓN MATEMÁTICA DE ALGUNOS MODELOS FÍSICOS UTILIZADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN DE UN EVENTO DE TRÁNSITO Y LAS CONSIDERACIONES PARA SU IMPLEMENTACIÓN.

RESUMEN

Los procedimientos analíticos empleados para inferir magnitudes físicas en los eventos de tránsito (modelos físicos), son siempre construcciones teóricas que permiten abordar el problema. Estos modelos pueden ser mejorados al considerar variables que antes fueron descartadas, teniendo especial cuidado en los límites de aplicabilidad para poder interpretar correctamente los resultados obtenidos.

PALABRAS CLAVES: Modelos físicos, evento de tránsito, cinemática, coeficiente de fricción, atropello, huella.

ABSTRACT

The analytic procedure used to infer physical quantities in traffic events (physical models), are theoretical basis that allows solving the problem. This models can be improved using previous discarded variables, taking special care of applicability bounds in order to achieve best result interpretation.

KEYWORDS: *Physical models, traffic event, cinematics, friction coefficient, pedestrian accident, trace.*

LADY JHOANNA GARCIA G.

Ingeniera Física.

Reconstrutora de accidentes de tránsito

UCRET

lajogaga@gmail.com

JORGE HERNANDO RIVERA

Ingeniero Electrónico, M. Sc.

Profesor Asociado

Universidad Tecnológica de Pereira.

j.rivera@utp.edu.co

Grupo de Investigación en Ingeniería Física

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia son muy frecuentes los eventos de tránsito, los cuales provocan altas pérdidas materiales y fundamentalmente vidas humanas, ya sea por la topografía de las vías, por fallas mecánicas o por los errores humanos, por ello es de vital importancia la reconstrucción analítica de cada evento, la cual es la herramienta que se constituye en la prueba necesaria para que los jueces determinen las responsabilidades respectivas.

La reconstrucción de un evento de tránsito parte del análisis de los elementos físicos recolectados del evento de tránsito (E/T) tales como:

- Posición final de vehículos.
- Posición final de víctimas.
- Huellas de neumático.
- Charcos de gasolina y agua.
- Daños causados por objeto metálico sobre la calzada.
- Manchas de grasa o sangre.
- Daños a objetos fijos de la vía.

Con la finalidad de proveer la explicación más probable sobre cómo pudo haber ocurrido dicho E/T o ciertas partes del mismo. Esto se realiza en la mayoría de los casos con fines jurídicos en donde los resultados del análisis juegan un papel importante en la interpretación legal de los roles que desempeñaron los involucrados en el E/T.

El proceso reconstructivo se apoya firmemente en la mecánica de Newton para así poder plantear el “modelo físico del accidente” con el que se intenta describir analíticamente como ocurrió el hecho realizando una serie de supuestos dentro del margen lógico. Este modelo físico estará más cercano a la realidad, de manera proporcional a la cantidad de evidencia fehaciente de que se disponga.

2. CONTENIDO

2.1 Principios Físicos Utilizados

Se emplean las leyes de la cinemática que estudia el movimiento de los cuerpos sin tener en cuenta las causas

que los producen, leyes de la dinámica que describe la evolución en el tiempo de un sistema físico en relación a las causas que provocan los cambios de estado y leyes de conservación que estudia las propiedades de los cuerpos en instantes previos y posteriores a un evento.

Como complemento a los métodos físicos se emplea una tabla de coeficientes de fricción [1].

Descripción de la superficie del piso	Llanta de automóvil	Llanta de Camión
Concreto seco	,85	,65
Asfalto seco	,80	,60
Concreto húmedo	,70-,80	,50
Asfalto húmedo	,45-,80	,30
Nieve afirmada	,15	,15
Hielo	,05	,11 (seco) ,07 (húmedo)
Tierra seca	,65	---
Lodo	,40-,50	---
Gravilla o arena	,55	---
Concreto liso húmedo, aceitoso	---	,25
Nieve fuertemente afirmada y con cadenas	---	,60
Hielo seco y con cadenas	---	,25

2.2 Formulación matemática:

Se dedujeron tres modelos matemáticos para determinar velocidades y analizar casos de vehículos que se ven involucrados en un evento de tránsito en vías planas partiendo de la ecuación fundamental de velocidad al inicio de la huella de frenado.

2.2.1 VELOCIDAD DE UN VEHÍCULO AL INICIO DE LA HUELLA DE FRENADO

Existen dos tipos de fuerzas de fricción: la estática y la dinámica. La fuerza de rozamiento estática existe cuando no hay movimiento relativo entre los dos cuerpos que están en contacto y la dinámica cuando la fuerza que se proporciona es mayor que la fuerza de rozamiento estática.

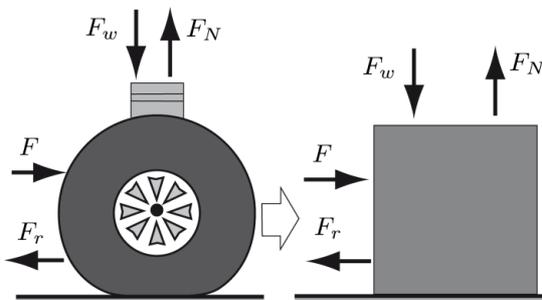


Figura 1. Fuerzas que actúan sobre la llanta.

En la figura 1 se muestran las fuerzas que actúan sobre la llanta después de iniciar su movimiento. Si suponemos que la fuerza de fricción F_r , permanece constante, entonces esta fuerza produce una aceleración negativa uniforme en la llanta. Con la segunda ley de Newton en forma de componentes a la llanta produce.

$$\sum F_x = -F_r = ma \tag{1}$$

$$\sum F_y = N - F_w = 0 \tag{2}$$

Pero $F_r = \mu N$ y $F_w = mg$, de la ecuación (2) vemos que $N = mg$, por lo tanto (1) se convierte en:

$$-\mu N = -\mu mg = ma$$

$$a = -\mu g \tag{3}$$

La aceleración es independiente de la masa.

Puesto que la aceleración media se considera constante, en un sistema ideal, es posible utilizar la ecuación:

$$v^2 = v_0^2 + 2ad_f \tag{4}$$

Donde d_f es la distancia de frenado, v_0 es la velocidad inicial y con velocidad final 0, que es cuando se detiene el vehículo completamente. Entonces reemplazando la ecuación (3) en (4) tenemos:

$$v_0^2 + 2ad_f = v_0^2 - 2\mu g d_f = 0$$

$$\mu = \frac{v_0^2}{2gd_f} \tag{5}$$

De la ecuación (5) podemos deducir la velocidad del vehículo un instante antes de comenzar a marcar la huella de frenada la cual está dada por:

$$v_0 = 3,6\sqrt{2\mu g d_f} \tag{6}$$

Para aplicar la ecuación (6) y calcular la velocidad del vehículo al inicio de la huella de frenada, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El vehículo se detiene al final de la huella de frenado.
- Es de notar que las huellas de frenado aparecen un poco antes de que se bloqueen las llantas y no como se suele pensar que aparecen justo en el momento en que se bloquean las llantas. Para automóviles del 15% al 30% de la energía cinética inicial es disipada antes de que aparezcan claramente las huellas de frenado [2].

- Si quedan varias huellas de frenada, se debe utilizar la longitud de la huella más larga que es la que implica el gasto de energía mayor.
- El valor 3,6 es un factor de conversión de m/s a km/h.

2.2.2 VELOCIDAD DE UN VEHÍCULO DE ACUERDO A LA DISTANCIA RECORRIDA DESDE EL LUGAR DONDE PERCIBE EL RIESGO HASTA SU DETENCIÓN.



Figura 2. Esquema de la distancia de detención de un vehículo.

El proceso que se observa en la figura 2 involucra dos distancias recorridas por el vehículo, primero la distancia que recorre el vehículo durante el tiempo de reacción del conductor, es decir desde el momento en el que percibe un riesgo y transcurre un lapso de tiempo que le insume a un conductor en responder ante la situación de peligro (d_r) y segundo la distancia que recorre el vehículo durante la frenada (d_f), la distancia total de parada (d_T) es la suma de las dos, es decir:

$$d_T = d_r + d_f \tag{7}$$

De (7) tenemos que

$$d_r = d_T - d_f \tag{8}$$

Asumiendo que la velocidad permanece constante en el trayecto recorrido denominado distancia de reacción (d_r), entonces por la cinemática convencional se sabe que:

$d_r = v_0 t_r$, es decir

$$v_0 = \frac{d_r}{t_r} \tag{9}$$

Reemplazando la ecuación (8) en (9) tenemos:

$$v_0 = \frac{d_T - d_f}{t_r} \tag{10}$$

De acuerdo a la deducción realizada en el numeral 2.2.1 tenemos:

$$d_f = \frac{v_0^2}{2\mu g} \tag{11}$$

Reemplazando la ecuación (11) en (10)

$$v_0 = \frac{d_T - \frac{v_0^2}{2\mu g}}{t_r} \tag{12}$$

Despejando obtenemos una ecuación de segundo orden $v_0^2 + 2\mu g t_r v_0 - 2\mu g d_T$, Si solucionamos para v_0 obtenemos la velocidad del vehículo al momento de percibir el riesgo.

$$v_0 = -\mu g t_r + \sqrt{(\mu g t_r)^2 - 2\mu g d_T} \tag{13}$$

Para aplicar la ecuación (13), se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El coeficiente de rozamiento μ entre las llantas del vehículo y el piso, depende del estado y clase de la vía en la cual se dejó la huella.
- El conductor observa el peligro, a partir de este instante transcurren aproximadamente entre cero coma ocho (0,8s) y uno coma cinco (1,5s) segundos, tiempo de reacción normal para un conductor atento, en aplicar los frenos.

2.2.3 ATROPELLO DE UN BUS TIPO CAJA CUANDO EL PEATÓN QUEDA DETRÁS DEL BUS

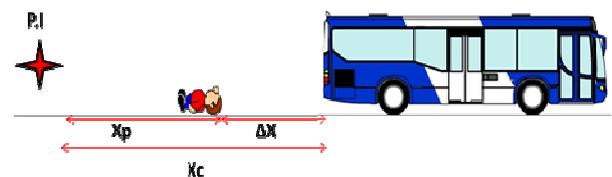


Figura 3. Atropello víctima atrás.

El modelo que se emplea para estudiar el atropello de un vehículo con frente plano (bus-buseta-camión) a un peatón se puede observar en la Figura 3, donde se tiene un bus en posición final, y un peatón que se encuentra en posición final detrás del bus. Puede asociarse el bus con un objeto tipo caja de similares dimensiones y a la persona con una vara rígida de altura similar; debido al impacto, la persona recorre una distancia (X_p), compuesta por una distancia de caída (X_c), y una distancia de arrastre (X_A) hasta su posición final.

$$X_p = X_{cont} + X_v + X_A \quad (14)$$

La distancia de contacto (X_{cont}) corresponde a la distancia que recorre la persona durante el contacto con el vehículo y depende de la velocidad al momento del impacto del bus (v_{imp}), y del tiempo del contacto (t_{cont}).

$$X_{cont} = K v_{imp} t_{cont} \quad (15)$$

El peatón recibe el impacto por encima del centro de masa en el caso de un vehículo con frente plano, la velocidad a la cual el peatón inicia su caída al piso llamada velocidad de vuelo (v_v) es menor a la velocidad de impacto en la proporción: $v_v = K v_{imp}$

En [3] se muestra que para un automóvil pequeño $v_v = 0,6 v_{imp}$, para un automóvil grande $v_v = 0,75 v_{imp}$, para un campero o camioneta $v_v = 0,8 v_{imp}$, para un tipo caja $v_v = v_{imp}$.

El tiempo de vuelo corresponde al tiempo que transcurre durante la caída del peatón este tiempo depende de la altura del centro de masa (h_{cm}) en el caso de un vehículo tipo caja se usa la altura correspondiente a la del centro de masa del peatón de pie, aproximadamente 0,561 de su altura total (h), es decir $h_{cm} = 0,561 h$

$$X_v = v_v t_v = v_v \sqrt{\frac{2h_{cm}}{g}} \quad (16)$$

La distancia que recorre el peatón desde el momento que cae al piso hasta su detención total (X_A) depende del coeficiente entre la persona y el suelo (μ_p) y de la velocidad a la cual es lanzado el peatón debido al impacto (v_v).

$$X_A = \frac{v_v^2}{2\mu_p g} \quad (17)$$

El vehículo se desplaza al momento del atropello a una velocidad (v_{imp}), luego del atropello este reacciona (X_r) y realiza un proceso de frenado (X_f) recorriendo una distancia (X_c) hasta su detención total.

$$X_c = X_r + X_f = v_{imp} t_r + \frac{v_{imp}^2}{2\mu_c g} \quad (18)$$

La separación entre el vehículo y la víctima (ΔX) se puede calcular como:

$$\Delta X = X_c - X_p \quad (19)$$

Reemplazando la distancia total recorrida por el peatón y la distancia total recorrida por el vehículo en la ecuación (19) obtenemos lo siguiente:

$$\Delta X = v_{imp} t_r + \frac{v_{imp}^2}{2\mu_c g} - K v_{imp} t_{cont} - K v_{imp} \sqrt{\frac{2h_{cm}}{g} - \frac{K^2 v_{imp}^2}{2\mu_p g}} \quad (20)$$

$$v_{imp} = 3.6 \left(\frac{\left(\left(k t_c + k \sqrt{\frac{2h}{g}} - t_r \right) + \sqrt{\left(k t_c + k \sqrt{\frac{2h}{g}} - t_r \right)^2 + 2d \left(\frac{\mu_p - \mu_c k^2}{\mu_c \mu_p g} \right)} \right)}{\left(\frac{\mu_p - \mu_c k^2}{\mu_c \mu_p g} \right)} \right) \quad (21)$$

Para aplicar la ecuación (21) y calcular la velocidad del vehículo, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Muy probablemente el conductor inicia el proceso de reacción al momento del contacto, es decir que el frenado de emergencia ocurre posterior al atropello.
- Durante el recorrido post impacto el vehículo no vuelve a tener contacto con el peatón.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con estos modelos básicos se pretende ilustrar la importancia de entender el modelo físico planteado, que significan las variables, el rango de valor de los parámetros utilizados y cuáles son los límites de aplicación de las ecuaciones.
- El hecho de conocer las ecuaciones no nos conducen a la solución, las ecuaciones no trabajan por si solas, aun dentro de un software es necesario conocer las consideraciones de implementación de estas para poder interpretar correctamente los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Baker, J.S. Traffic Accident Investigation Manual. Northwestern University, Evanston I.U. 1975.
- [2] Reed W., Keskin A. "Vehicular Deceleration and Its Relationship to Friction". (Society of Automotive Engineers document number: SAE 890736).
- [3] Limpert R. Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, Fifth Edition, 1999, Lexis Publishing.
- [4] Warner et al. "Friction Applications in Accident

Reconstruction". (Society of Automotive Engineers document number: SAE 830612).

[5] Irureta V. Accidentología vial y pericia. Ed. La Roca. 2003.

[6] Infante E. "Estudio de la dinámica de vehículos para la determinación de parámetros a emplear en la reconstrucción de accidentes de tránsito". Revista del INML y CF. Volumen 18. No. 3. 2005.

[7] López D. Técnica de "distancia de lanzamiento" empleada en la reconstrucción de colisiones vehículo - peatón.

[8] A. Bolívar., S. Bolívar., "Modelos físicos aplicados al análisis de accidentes de tránsito". Revista Colombiana de física. Volumen 38. No. 4. 2006.

[9] Rico A. "La aplicabilidad de las ecuaciones dentro del Proceso de reconstrucción de accidentes".

[10] Serway, Raymond A. Física para ciencias e ingeniería. Tomo 1 Mcgraw-Hill.

[11] Zemansky, Freedman Y. Física universitaria. Volumen 1 Pearson.

[12] Enciso G. Reseñas de la investigación de siniestros viales.