

Investigación sobre las fases de una frenada de emergencia



Después de producirse un accidente de tráfico puede recopilarse una enorme cantidad de datos directos: deformaciones de vehículos, arañazos y huellas sobre la calzada, manchas de aceite,... e indirectos: circunstancias de la vía, condiciones de visibilidad,... que permitan al Ingeniero Reconstructor de Accidentes llevar a cabo un estudio detallado de las circunstancias del accidente con objeto de conseguir, en última instancia, explicar cuál ha sido la evolución más probable del mismo. Por desgracia, todos estos datos no siempre son suficientes para despejar el elevado número de incógnitas que aparecen en los cálculos del reconstructor.

Una de las incógnitas de mayor importancia es la velocidad inicial de circulación de los vehículos implicados, y la vía tradicional del estudio de esta variable ha sido la longitud de las huellas de frenado presentes sobre la calzada.

La Ciencia Física es la herramienta que permite describir la realidad que nos rodea, y a lo largo de la historia de la reconstrucción de accidentes ha ido proporcionando diversas técnicas, continuamente mejoradas, con objeto de llegar a conocer precisamente la velocidad inicial de un vehículo a partir de sus huellas de frenado.

En el presente artículo se van a describir las ecuaciones básicas, utilizadas tradicionalmente, en cálculos de velocidades a partir de huellas de frenado, y las subsiguientes mejoras que se han ido planteando con el objeto de precisar en lo posible el cálculo de la incógnita buscada.

Modelo de una fase

La primera aproximación al cálculo de la velocidad de un vehículo a partir de sus huellas de frenado es el conocido como modelo de una fase. Está fundamentado en el Principio Universal de Conservación de la Energía, según el cual la energía total de un sistema cerrado permanece constante o varía en la misma proporción que realiza un trabajo.

Durante el proceso de frenado de emergencia de un vehículo, cuando avanza con sus ruedas bloqueadas, la energía cinética inicial que posee, debida a su movimiento, se transformará en trabajo de rozamiento entre los neumáticos y la calzada, y en trabajo de deformación en el caso de que el vehículo no se detenga a consecuencia del frenado sino por colisión contra un obstáculo.

Si la intensidad de frenado es tal que se alcanza el bloqueo de ruedas, por lo general, aparecerán sobre la calzada las típicas huellas de frenado. Midiendo su longitud tendremos una distancia aproximada durante la cual el



la distancia durante la cual se realiza trabajo de rozamiento, indicada por la longitud de huellas, será inferior a la distancia total durante la que se frenó y por tanto la velocidad calculada mediante el Principio de Conservación de la Energía también será inferior a la real. El método de una fase, la del marcado de huellas, proporcionará, por tanto, valores conservadores de la velocidad inicial de circulación del vehículo, puesto que el valor que se obtiene es el de la velocidad del vehículo en el instante en que comienza a marcar huellas.

Modelo de las tres fases

El modelo de tres fases es el que actualmente se utiliza con mayor profusión en las reconstrucciones de accidentes. Pretende mejorar el modelo anterior, abarcando el proceso completo de la frenada, y no utilizando solamente como parámetro de cálculo la longitud de huella de frenado, sino que además incluye la distancia desde que se acciona el freno por primera vez hasta que aparece la huella.

El método se fundamenta en un modelo matemático de la aceleración del vehículo durante la frenada como función del tiempo, lo más parecido posible a la curva real.

vehículo a transformado energía cinética en trabajo de rozamiento. Pero debido a que el bloqueo de ruedas y la aparición de huellas sobre el asfalto no son fenómenos simultáneos a la acción del pie sobre el pedal del freno,





Sobre la gráfica real de la aceleración frente al tiempo, mostrada en el gráfico 1, se identifican los conceptos de rozamiento estático y dinámico. En el momento en que se acciona el pedal de freno con intensidad la aceleración del vehículo (o deceleración al ser negativa) comienza a aumentar de forma casi lineal hasta alcanzar un valor máximo. En el umbral de este pico de deceleración se sobrepasa el coeficiente de rozamiento estático, o máxima capacidad de deceleración disponible, y el rozamiento disminuye hasta alcanzar un valor prácticamente uniforme durante el resto del movimiento de detención, coeficiente de rozamiento dinámico.

El método completo de las tres fases propone utilizar como función aceleración, $a(t)$, la función representada en el gráfico 2, que se aproxima con menos error al movimiento real del vehículo que el método de una fase.

1ª Fase

El modelo propone que durante la primera fase de la frenada la aceleración sigue una variación lineal con el tiempo hasta alcanzar su valor máximo, a partir del cual se hace constante. Este instante t_s es el llamado tiempo de respuesta del sistema de frenos y representa el retardo del sistema desde que se

acciona el freno por primera vez, hasta que la presión en el circuito de freno es la necesaria para conseguir el bloqueo de las ruedas. En la primera fase la aceleración de frenada crece linealmente con respecto al tiempo y la energía cinética del vehículo se reduce en función del trabajo de rozamiento realizado por los frenos del vehículo.

El tiempo de respuesta del sistema de frenos se ha considerado variable entre 0,2 y 0,6 segundos, siendo 0,25 segundos el valor más extensamente utilizado en la actualidad en los cálculos de reconstrucción de accidentes para un sistema de frenos en buen estado.

2ª Fase

En la segunda fase las ruedas están bloqueadas y no giran, pero aún no se producen las huellas de frenada. Esta fase es aceptada y considerada actualmente en los cálculos por la mayoría de los reconstructores de accidentes. El propio manual de Investigación de Accidentes de la Guardia Civil cita textualmente: "Al aplicar los frenos, tras el tiempo de respuesta, quedan bloqueadas las ruedas y se produce el deslizamiento de las mismas. Hay un intervalo, de no producción de marcas en la calzada, debido al tiempo que necesita el neumático para recalentarse lo suficiente



por el rozamiento para que se inicie el desprendimiento del material de la banda de rodadura y señale la huella. Este intervalo se estima de uno a tres metros, y en ocasiones se aprecia una ligera sombra, observando con el ángulo visual adecuado."

Por lo tanto, a efectos de cálculo, a la distancia medida de huellas de frenado habrá que añadir una distancia variable de entre 1 a 3 metros, como recomienda la Academia de Tráfico de la Guardia Civil, para utilizar la distancia real durante la cual el vehículo transforma energía cinética en trabajo de rozamiento con ruedas bloqueadas.

3ª Fase

Las ruedas permanecen bloqueadas y no giran, por lo que aparecen las huellas de frenada en una distancia d , una vez que los neumáticos se calientan y alcanzan la temperatura de pérdida de material por fricción.



El equipo de Centro Zaragoza procede a medir, tras la realización de la prueba, tanto la distancia de huellas dejadas sobre el asfalto, como la distancia desde la mancha de tiza a la posición final de la pistola.

Ensayos realizados en Centro Zaragoza

Con objeto de analizar el proceso real de frenado de un vehículo y caracterizar experimentalmente los parámetros antes comentados, que deben adoptarse para los cálculos de velocidades, se han llevado a cabo diferentes ensayos de frenado, controlando los parámetros fundamentales que intervienen, sirviendo también para validar experimentalmente los modelos de frenada desarrollados analíticamente en el apartado anterior.

Los dos equipos de medida empleados durante las pruebas han sido el equipo acelerómetro y un mecanismo de pistola de tiza o "chalk-gun".

El acelerómetro empleado durante los ensayos es el modelo VC-2000, de la firma Vericom. Se trata de un equipo electrónico que proporciona, una vez instalado convenientemente en el interior del vehículo, la medición



Posición del acelerómetro sobre el parabrisas del vehículo.

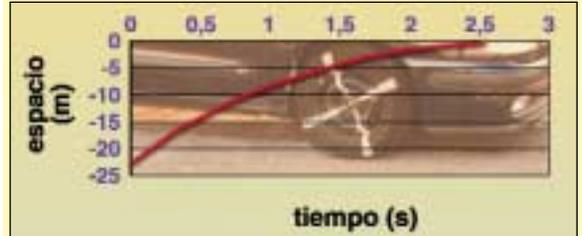
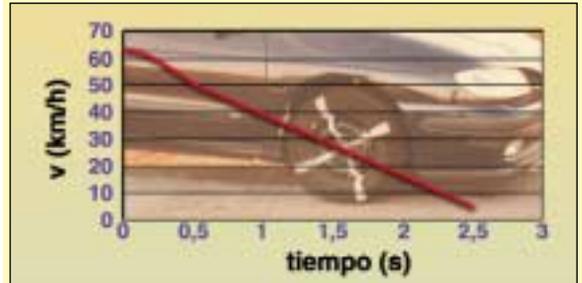
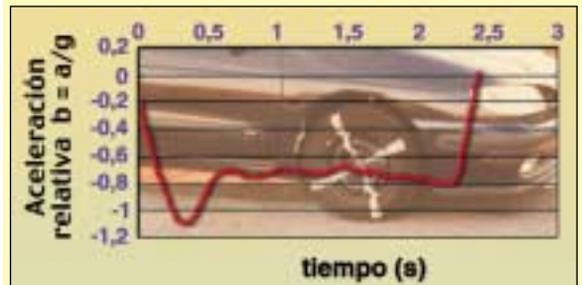
de la aceleración o deceleración instantánea del mismo durante su movimiento con velocidad variable (aceleración o frenado).

Las variables directas e indirectas que nos proporciona el equipo tras la realización de las pruebas son: velocidad real al inicio de la frenada, distancia total de detención, tiempo total de duración de la frenada, valor medio de la deceleración y valor máximo de la deceleración alcanzado durante la frenada.

Tras la realización de la medición de la frenada el VC-2000 permite el volcado de los datos en un PC mediante el interfase adecuado y su posterior análisis con una hoja de cálculo.



Chalk gun instalado sobre el lateral del vehículo utilizado en los ensayos. Una señal eléctrica hace detonar el sistema en el instante en que se acciona el freno del vehículo.

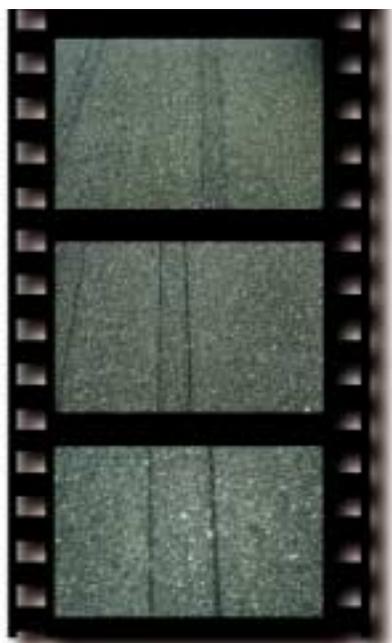


Representación gráfica de la aceleración, velocidad y espacio recorrido por un vehículo, durante la frenada de emergencia, frente al tiempo, a partir de los datos proporcionados por el acelerómetro VC-2000.

El dispositivo de Chalk Gun es un mecanismo detonador, que previamente colocado en el lateral del vehículo, dispara una bala de tiza sobre la

calzada en el preciso momento en que se acciona el pedal de freno. De esta forma, tras la realización de una prueba de frenada, se mide la distancia que separa la mancha de tiza sobre la superficie hasta la bocacha de la pistola donde haya quedado detenido finalmente el vehículo, obteniéndose así la distancia total de detención empleada por el vehículo. La distancia medida incluirá tres espacios:

- 1ª fase: espacio S_1 recorrido por el vehículo durante el tiempo de respuesta del equipo de frenos.
- 2ª fase: espacio x recorrido con las ruedas bloqueadas, pero sin dejar huellas de frenada.
- 3ª fase: espacio d recorrido con las ruedas bloqueadas y dejando huellas de frenada.



Conclusiones del estudio

Del análisis realizado se desprende que no se observa gran dependencia del valor del coeficiente de rozamiento con relación a la velocidad inicial del vehículo. Únicamente se ha puesto de manifiesto una ligera disminución del coeficiente conforme aumenta la velocidad. Tampoco se aprecia en los resultados de los ensayos realizados con diferentes vehículos sobre una misma superficie, una dependencia clara del coeficiente de rozamiento medio respecto al vehículo o a los neumáticos que portaba.

No obstante, cuando el perito reconstructor estime que la velocidad del vehículo durante el accidente fue sensiblemente superior a la registrada por el acelerómetro durante la prueba de frenado, sería aconsejable disminuir en 0,1 el valor del coeficiente de rozamiento medio indicado por el acelerómetro con objeto de tener la certeza de no sobrestimar el cálculo de la velocidad por este motivo.

- La aplicación del método de una fase al cálculo de la velocidad inicial de un vehículo, al comienzo de una maniobra de frenado de emergencia, y utilizando el coeficiente de rozamiento proporcionado por un acelerómetro, o el estimado a partir de las Tablas de la Guardia Civil de Tráfico, proporciona siempre un valor de la velocidad inferior a la velocidad real que podía llevar el vehículo, por lo que resulta mucho más preciso utilizar el método de las tres fases, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$V_i = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \mu \cdot t_1 + \sqrt{V_f^2 + 2 \cdot g \cdot \mu \cdot (x+d)}$$

V_i = velocidad inicial (expresada en m/s) en el instante anterior al comienzo de la frenada.

g = aceleración del campo gravitatorio = 9,81 m/s²

μ = coeficiente de rozamiento entre el suelo y los neumáticos.

t_1 = tiempo de respuesta del sistema de frenos.

V_f = velocidad del vehículo en el instante de la colisión.

x = distancia en metros recorrida por el vehículo que frena sin dejar huellas, pero con sus ruedas bloqueadas.

d = longitud en metros de la huella de frenada más larga.

- Asumiendo un tiempo estandar de respuesta del sistema de frenos de 0,25 segundos, para todos los vehículos turismo con sistemas de freno en buen estado, y considerando una influencia mínima del comportamiento de las distintas composiciones del caucho de los neumáticos comerciales durante el proceso, la aplicación del método de las tres fases con objeto de obtener un intervalo posible de velocidades, debe realizarse en función de la distancia previa de aparición de huellas. Esta distancia a su vez depende directamente del estado y características del asfalto sobre el que se ha producido la frenada.

Para asfaltos nuevos, en excelente estado de conservación o de apariencia rugosa, la aparición de huellas es prácticamente simultánea al bloqueo de ruedas por lo que puede prescindirse de la distancia previa.

Para asfaltos pulimentados por el tráfico o en regular estado de conservación es apropiado el empleo de una distancia previa de entre 2 y 4 metros. ■