

En este escenario, claramente el embistente físico es el rodado mayor; su movimiento coincide en dirección y sentido con la fuerza activa del primer contacto, porta la fuerza activa; sin embargo el camión es netamente pasivo en la producción del hecho.

Resulta claro en el ejemplo que si no hubiese existido un *hueco* o zona vacía en la estructura del *todo* que forman el equipo tractor-acoplado, es decir si hubiese habido continuidad en esa estructura, la moto hubiese sido embistente del lateral de ese *todo*.

De hecho este análisis permite calificar a la moto como embistente virtual del equipo tractor-remolque.

Si definimos como *envolvente* al cuerpo imaginario formado por las superficies frontal y trasera de la estructura, así como de su techo y por la prolongación de los planos laterales —geoméricamente existen mejores y más precisas definiciones de *envolvente*, pero son demasiado complejas para el alcance de este escrito—, podemos expresar el siguiente concepto:

Embistente virtual es el cuerpo que se introduce en la envolvente de otro.

Es obvio que si la envolvente fuese material, en el ejemplo estaríamos ante un caso que claramente cumpliría los requisitos de embistente físico, pues la dirección de su movimiento coincidiría en dirección y sentido con una de las fuerzas de acción y reacción que generaría su contacto con el *materializado* costado virtual.

CAPÍTULO III

ROZAMIENTO Y FRENADO

Siempre que dos cuerpos están en contacto, y con movimiento relativo entre sus respectivas superficies, existe rozamiento.

El fenómeno de rozamiento es muy complejo, y se debe a la interacción entre las irregularidades macro y microscópicas de las superficies en contacto, así como a la acción de las fuerzas de cohesión de las moléculas en las superficies de contacto entre sí.

Si bien existe rozamiento en todos los estados de la materia, nos referiremos sólo al rozamiento entre sólidos.

1. ADHERENCIA Y DESLIZAMIENTO

Cotidianamente comprobamos que para hacer deslizar un cuerpo de peso "P", inicialmente en reposo, sobre una superficie horizontal, debemos ejercer una fuerza " F_e ", paralela a dicha superficie.

A la relación entre la menor fuerza necesaria para iniciar el movimiento y el peso del cuerpo se la denomina coeficiente de rozamiento estático " μ_e ":

$$\mu_e = F_e / P$$

y representa la fracción de peso (o fuerza normal a la superficie de contacto) que hay que aplicar al cuerpo para que éste inicie su desplazamiento.

Esta fuerza, paralela a la superficie y al movimiento, se denomina resistencia por *rozamiento estático, o adherencia*, y es debida a que, estando en reposo el cuerpo, las irregularidades de su superficie se encastran con las irregularidades de la superficie sobre la que apoya.

Empíricamente también se comprueba que, luego de iniciado el movimiento, la fuerza necesaria para mantenerlo, con velocidad uniforme "F", es menor que F_e .

Esta fuerza "F", llamada *resistencia por rozamiento dinámico o fricción*, es también paralela y opuesta al movimiento.

Es menor que F_e por cuanto, una vez iniciado el movimiento relativo, las irregularidades de ambas superficies tienen peor encastre.

A la relación entre la fuerza de rozamiento dinámico, y el peso (o la fuerza normal a la superficie de contacto) se la denomina coeficiente de rozamiento dinámico o de fricción " μ ":

$$\mu = F / P$$

2. RODADURA

En alguna bibliografía se adjunta a las anteriores resistencias al movimiento, la correspondiente a la rodadura, aunque este fenómeno es esencialmente distinto, ya que depende de la deformación de los cuerpos que ruedan.

La deformación de la superficie, debida al peso "P" del cuerpo, implica la aparición en ella de una suerte de escalón, que tiende a impedir el movimiento relativo, y por cuyo centro pasa la reacción al peso, con lo que ésta deja de pasar por el centro de gravedad del cuerpo, (lo hace a una distancia de "CG", que llamamos "f"), es decir que aparece un *momento*:

$$M = P \cdot f$$

el cual puede igualarse al que provoca la fuerza de resistencia por rozamiento estático " F_e ", que dista "R" del centro de gravedad "CG":

$$F_e \cdot R = P \cdot f$$

para que exista rodadura, deberá ser:

$$F_e < P \cdot \mu_e$$

como

$$F_e = P \cdot f / R$$

entonces

$$f / R < \mu_e$$

Los valores del brazo de palanca "f" se hallan tabulados para distintos materiales.

Un caso notorio y útil para facilitar la comprensión de este tipo de resistencia al movimiento ocurre cuando se circula con un automóvil sobre un terreno blando (médano, por ejemplo), en cuyo caso se nota que el movimiento es mucho más penoso que sobre una superficie dura, pudiendo resultar imposible si la profundidad de la huella es similar al radio de la rueda.

El hecho de que el coeficiente de rozamiento estático sea mayor que el friccional explica en parte por qué la eficiencia del frenado disminuye cuando se bloquean los neumáticos durante el mismo.

Es así que, mientras un automóvil frena su desplazamiento sin llegar a bloquear sus neumáticos (se denomina bloqueo de neumáticos cuando se impide el giro de los mismos), éstos ruedan sin resbalar, es decir que en cada instante, la zona que está en contacto con el piso carece de movimiento relativo con respecto a éste, por lo que su rozamiento es de tipo estático.

Cuando se bloquean los neumáticos, aparece movimiento relativo entre el piso y la zona de aquellos que está en contacto con él, por lo que el rozamiento entre estas dos superficies es de tipo dinámico.

A esto hay que agregar que mientras los neumáticos están rodando, también actúa la resistencia a la rodadura, la que desaparece en cuanto comienza el bloqueo, con el consecuente deslizamiento.

Experimentalmente se ha demostrado que la máxima eficiencia de frenado de un rodado ocurre cuando los frenos reducen la velocidad angular sólo en un 15% de la que tendría en ese instante sin frenar.

3. LEYES DE FRICCIÓN

Cuando un sólido resbala sobre otro, la fuerza de fricción es: 1º) proporcional a la fuerza normal; 2º) independiente del área de la superficie de contacto; 3º) independiente de la velocidad de resbalamiento.

Las dos primeras leyes, enunciadas por Leonardo, se consideran en la actualidad suficientemente correctas. La tercera, enunciada por Coulomb, se sabe que no lo es, ya que el coeficiente friccional disminuye con el aumento de la velo-

cidad, pero como tal disminución es pequeña, dentro de los entornos de velocidad habituales tiene suficiente exactitud (para acero sobre acero, cuando la velocidad aumenta un millón de veces, "μ" disminuye a un tercio).

En función de ello, para el rango de velocidades con que nos encontramos en accidentología, es suficientemente exacto tomar los coeficientes de fricción como independientes de la velocidad, considerando valores medios.

Un ejemplo de esta variación lo da Soldi Sotelo:

Para carretera de concreto seca, con neumáticos estándar:

VELOCIDAD (Km/h)	COEFICIENTE FRICCIONAL
64	0,8
96	0,7

Como se ve, la variación es mucho más acentuada para neumáticos sobre concreto que para acero sobre acero.

Esto se debe a que, con el incremento de la velocidad, al frenar, aumenta la temperatura de los neumáticos, por lo que disminuye su resistencia mecánica, desprendiéndose mucho más fácilmente partículas de caucho de la superficie de los neumáticos. De todos modos se ve que la variación es suficientemente pequeña como para que sea válido utilizar un coeficiente medio.

Cuando es necesaria extrema precisión puede utilizarse la expresión de Limpert:

$$\mu = \mu_0 - v.V$$

en la que "μ₀" es el coeficiente de fricción a bajas velocidades, "V" es la velocidad de deslizamiento, y "v" un coeficiente de decrecimiento, que tiene las unidades de la velocidad a la inversa, de modo de dejar el miembro adimensional: μ₀=0,85 y

$v=0,0040$, para deslizamiento en pavimento seco; $\mu_0=0,70$ y $v=0,0080$, para deslizamiento en pavimento húmedo; en las que "V" debe tomarse en Km/h y "v" en $(\text{Km/h})^{-1}$.

Debe aclararse que, si bien el coeficiente de frenado varía con la velocidad, sólo lo hace con la inicial, ya que para cualquier otra, una vez bloqueadas las ruedas, el mismo permanece sensiblemente constante, siempre que no se modifique la superficie o la interfase.

4. OTROS FACTORES QUE INCIDEN SOBRE EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

— Se ha comprobado que el coeficiente de deslizamiento virtualmente no está influido por el desgaste de los neumáticos, ya que su diferencia en este caso, a la misma velocidad, es del orden del 5% a favor de los neumáticos nuevos.

— Los coeficientes de fricción dependen de muchos factores, tales como naturaleza de los materiales, temperatura, estado, grado de limpieza y tipo de suciedad de las superficies, etcétera.

— Mientras el coeficiente medio para una carretera seca está entre 0,6 y 0,8, cae a 0,5 con la misma carretera mojada. Si sobre la superficie hay arena seca, " μ " varía entre 0,4 y 0,5.

— La misma carretera, con nieve, puede tener un coeficiente del orden de 0,3. Si presenta hielo, estará en 0,1

— Un incremento de la temperatura ambiente de 27° disminuye el coeficiente en 0,1, para carretera limpia y seca.

— Los valores más bajos del coeficiente de fricción se encuentran para nieve compacta o hielo a temperatura del en-

torno de cero grado centígrados, pues en esas condiciones, punto de congelamiento o fusión, coexisten dos estados del agua, líquida y sólida, y ante la presión ejercida por los neumáticos, se licua una capa superficial que lubrica el movimiento, al igual que con los patines para hielo.

VALORES DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN MEDIO (NEUMÁTICOS - PISO)		
<i>piso</i>	<i>seco</i>	<i>húmedo</i>
Asfalto nuevo	0,85	0,60
Asfalto viejo	0,70	0,55
Asfalto resbaladizo	0,5	0,35
Concreto nuevo	0,85	0,55
Concreto viejo	0,70	0,55
Empedrado limpio	0,60	0,40
Ripio	0,6	0,65
Tierra dura	0,65	0,70
Tierra suelta	0,50	0,55
Arena s/ pavimento	0,45	0,30
Barro s/ pavimento	0,45	0,30
Barro s/ empedrado	0,40	0,25
Nieve s/pavimento	0,30	0,20
Hielo cristal	0,15	0,07

Los valores de la tabla anterior son útiles para el frenado de automotores.

Los ensayos de Reed y Keskin han demostrado que para camiones o vehículos pesados, los valores medidos son del orden del 70% de los que surgen de la tabla anterior, para la misma superficie (excepto para nieve o hielo, en los que se mantiene).

Ello es debido a que en estos vehículos, usualmente se usan neumáticos que no contribuyen totalmente al frenado, por características de diseño (ejes libres, etc.), y como el peso se distribuye en el total de los neumáticos en los que el ve-

hículo se apoya, la fuerza de resistencia al movimiento (rozamiento) que cada rueda, que sí frena, puede ejercer, es menor a la que ejercerían si sólo ellas soportasen el total del peso.

A los efectos de clarificar la explicación aceptemos que el peso "P" se distribuye uniformemente en todas las ruedas.

Si el vehículo tiene seis ruedas, la parte del peso que cada una soporta será:

$$p = P/6$$

entonces la fuerza de rozamiento que cada una podrá ejercer será:

$$r = \mu \cdot p = \mu \cdot P/6$$

Si las seis ruedas son capaces de frenar, la fuerza de rozamiento total será:

$$R = 6 \cdot r = 6 \cdot \mu \cdot P/6$$

es decir:

$$R = \mu \cdot P$$

Si sólo cuatro de las seis ruedas tienen capacidad de frenar, la fuerza de rozamiento total será:

$$R' = 4 \cdot r = 4 \cdot \mu \cdot P/6$$

Es decir que en este caso

$$R' = 0,67 \cdot \mu \cdot P$$

Como podemos apreciar, cuando dos de las seis ruedas no frenan, la fuerza de frenado es el 67% de la que se obtendría si todas las ruedas frenasen.

5. FACTOR DE DESACELERACIÓN O FRENADO ("DRAG FACTOR")

En realidad los experimentos de frenado miden globalmente el *factor de desaceleración* "a/g" mediante acelerómetros.

Veamos:

Durante un frenado puro, desde una velocidad "V", la energía cinética

$$E_c = 0,5 \cdot M \cdot V^2$$

se transforma en trabajo de frenado:

$$ET = F \cdot D$$

donde "F" es la fuerza que se opone al movimiento y "D" la distancia en la que actúa.

Ya hemos visto que cuando las ruedas están bloqueadas

$$F = \mu \cdot P$$

donde "P" es el peso y "μ" el coeficiente friccional, entonces:

$$ET = \mu \cdot P \cdot D$$

Además, se puede escribir que

$$F = M \cdot a$$

por la segunda ley de Newton; entonces:

$$ET = M \cdot a \cdot D$$

donde "M" es la masa del cuerpo, y "a" la aceleración negativa o desaceleración.

Como

$$M=P/g$$

donde "g" es la aceleración de la gravedad, tenemos:

$$P.a.D/g=\mu.P.D$$

en consecuencia:

$$a/g=\mu$$

En función de lo expuesto, si se considera la desaceleración habida como fracción de la aceleración de la gravedad, ella puede reemplazar al coeficiente de fricción medio. Esto es lo que utiliza habitualmente la bibliografía, llamándolo *drag factor*, o coeficiente de frenado, o bien factor de desaceleración.

Como vemos, si bien conceptualmente son distintos, cuando las ruedas se bloquean, los valores del coeficiente de fricción y del de frenado coinciden.

6. OTROS COEFICIENTES DE FRICCIÓN USUALES

a) *Motos*.— El valor del coeficiente de frenado, para ser utilizado en cálculos de detención de motocicletas, es variable con el tamaño de la moto, así como si se frena sólo con la rueda trasera, o con ambas ruedas.

Según Fries, Smith y Conrath, los valores son los que indica el siguiente cuadro:

PESO Kg	COEFICIENTE	
	<i>rueda trasera</i>	<i>ambas ruedas</i>
100	0,31 a 0,40	0,53 a 0,67
150	0,36 a 0,43	0,62 a 0,76
200	0,31 a 0,42	0,72 a 0,87
350	0,36 a 0,51	0,63 a 0,88

Valores para asfalto seco (1) y húmedo (2)

moto deslizándose, caída de costado (1): $0,35 < \mu < 0,50$

moto deslizándose, caída de costado (2): $0,30 < \mu < 0,40$

b) *Automóviles*.— Respecto de ellos, en los casos de vuelco o choque, tenemos:

AUTOMÓVILES DESLIZÁNDOSE SOBRE SU TECHO O COSTADO

Sobre concreto: $\mu=0,30$

Sobre asfalto: $\mu=0,40$

Sobre grava o ripio: $0,5 < \mu < 0,7$

Sobre césped: $\mu=0,5$

Sobre polvo: $\mu=0,2$

Pick-up deslizándose de costado sobre concreto: $0,3 < \mu < 0,4$

Rozamiento de carrocería con carrocería: $\mu=0,60$

Derrape: Decimos que un automóvil *derrapa*, cuando, estando sobre sus ruedas, se desplaza con un movimiento tal que tiene una componente horizontal transversal al eje longitudinal del rodado.

Los estudios de Reveley, Brown y Guenther encontraron que el coeficiente de fricción es en este caso mayor que el correspondiente a los mismos neumáticos en la misma superficie en movimiento longitudinal; así mientras determinaron un coeficiente

$$\mu=0,7$$

para asfalto seco, en frenada recta, hallaron que para un derrape en la misma superficie el coeficiente correspondiente era de

$$\mu=0,80$$

superior en un 15% al que se mide en frenada recta.

CUERPO HUMANO

Cuerpo humano deslizándose: $\mu= 1,10$

Cuerpo humano deslizándose y rebotando:

Sobre asfalto seco o húmedo: $\mu= 0,66$

Sobre pasto seco o húmedo: $\mu= 0.80$

Cuerpo humano contra carrocería: $\mu=0,25$

7. ENSAYOS DE FRENADO

Se recomienda, de ser posible, en cada caso hacer ensayos de frenado, en el mismo sitio del accidente, bajo condiciones atmosféricas análogas, y con el mismo rodado, circulando a velocidades predeterminadas, para luego de medir la distancia de parada, calcular el " μ " del caso.

Deben realizarse varios ensayos y adoptarse el " μ " medio.

Conviene utilizar dispositivos que disparen pintura hacia abajo en el momento de tocarse el pedal de freno, de forma de marcar exactamente el inicio de la frenada, y tener calibrado el velocímetro del rodado, constatado a esa velocidad en distintas pasadas, cronometradas ante distancias conocidas.

En ningún caso medir sólo las huellas de frenado, ya que las mismas aparecen visibles muy poco antes del bloqueo, el

que, en automóviles, acaece alrededor de 0,5 segundos luego del comienzo de aplicación de los frenos, lo que representa una disipación de energía de entre el 15 y el 30% de la inicial.

De todos modos, realizando los cálculos adecuados se puede verificar que al cometer un error en la adopción del coeficiente de rozamiento, se provoca un error en la determinación de la velocidad, cuyo valor es la mitad del error porcentual inicial. Es decir que si tomamos el " μ " con un error del 10% respecto del real, la velocidad que obtendremos será diferente de la real en sólo un 5%.

8. HIDROPLANEO

Este fenómeno se presenta cuando existen unos pocos milímetros de agua sobre la superficie del camino, y se transita a alta velocidad; ello es debido a que se pierde totalmente el contacto entre el caucho de los neumáticos y la superficie del camino, ya que debido a la velocidad, el agua no llega a ser desalojada de la interfase, y se mantiene a alta presión específica, por lo que los neumáticos literalmente se apoyan sobre ella.

Mientras que a 60 km/h " μ " es del orden de 0,50, a 100 km/h cae a 0,08, cuando se presenta hidropilano.

En condiciones normales de circulación sobre piso mojado el neumático desaloja el líquido de la interfase líquida (usualmente agua) por la presión que ejerce sobre la misma, ayudado para esto por los surcos y estrías habidos en su superficie (*dibujo*), diseñados a tal fin.

De este modo, permanentemente hay zonas del neumático que están en contacto directo con el piso, permitiendo la interacción de objetos sólidos.

Cuando, por razones complejas, entre las que la velocidad no es la menos importante, el líquido no es desalojado en toda el área de contacto del neumático o *pisada*, se produce el hidropilano.

Al presentarse este fenómeno, ningún punto del neumático se encuentra tocando el piso, toda el área de pisada está en contacto únicamente con el líquido.

Conocida la escasísima resistencia a las cargas de corte —tensiones tangenciales— de los fluidos, se entiende que la capa acuosa no pueda resistir las cargas tangenciales que transmite el neumático hacia el piso (tracción-frenado-guía).

Operativamente esto hace que desaparezca la capacidad de ejercer reacción a las cargas tangenciales, y recordemos que son estas reacciones las que generan efectos en el movimiento del rodado.

El hidroplaneo (*acquaplaning* o *hydroplaning*) se presenta bruscamente, provocando la súbita pérdida de adherencia de los neumáticos o de alguno de ellos, lo que puede dar lugar a la pérdida de control por parte del conductor del rodado.

Cuando decimos *pérdida de adherencia* nos referimos tanto a la reducción del coeficiente de fricción durante una frenada, como a la capacidad de tracción de las ruedas motrices y a la funcionalidad de las ruedas directrices como sistema de guía.

Cuando se presenta hidroplaneo, los neumáticos pierden contacto con el piso por la formación —en la parte frontal de su zona de contacto con el mismo, en la interfase fluida— de lo que se denomina cuña hidrodinámica, que es capaz de sustentar la carga radial del neumático.

De este modo, las ruedas quedan en contacto únicamente con el líquido.

Para algunos el neumático *flota* en la interfase, lo cual no es cierto, pues para que algo flote debe existir sustentación estática, es decir cumplir el principio de Arquímedes según el cual el peso es igual al empuje hidrostático. (El peso del objeto flotante debe ser igual al peso del volumen de líquido desalojado.) Obviamente no es el caso.

La sustentación hidrodinámica es lo que permite alcanzar altas velocidades a algunos tipos de embarcaciones, como

los alíscafos (que presentan apéndices de sustentación con perfil alar) y algunas lanchas veloces (su casco plano les permite *planear* en el agua).

Físicamente, el hidroplaneo es una adecuada lubricación. En efecto, por ejemplo, cuando para reducir el desgaste de piezas que están en contacto con movimiento relativo —v.gr., un eje y su bancada— se diseña el mecanismo de tal modo que se produzca la cuña hidrodinámica en un fluido colocado a tal fin.

El fluido lubricante, al formarse la cuña separa las piezas del mecanismo lo suficiente como para evitar la fricción entre sólidos.

El hablar de *sustentación hidrodinámica* ya nos orienta en el sentido de que la clave del fenómeno, tanto de la lubricación como del hidroplaneo, es la velocidad relativa.

Sin embargo, el fenómeno es muy complejo y depende de muchas variables; además de la velocidad, intervienen el peso, tipo y características de las superficies (rugosidad o grado de pulido), su forma y dimensiones, área de contacto, espesor de la interfase, características del fluido como densidad, untuosidad, viscosidad, etcétera.

Velocidad mínima de hidroplaneo.— En el exagerado esquema adjunto, se pueden apreciar los parámetros geométricos del hidroplaneo.

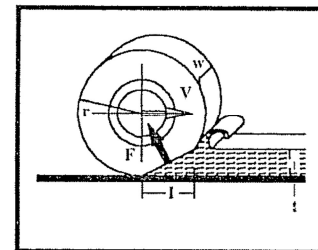


Gráfico 9-H

En este lugar debemos mencionar que al ser deformables, todos los neumáticos presentan un aplastamiento en la zona de contacto con el piso. Tal cosa es el plano inclinado dibujado en la parte inferior de la rueda.

A partir de las ecuaciones que determinan la fuerza de sustentación "F" en función de la velocidad de avance "V", la densidad del fluido "r", el espesor de la capa fluida "t", y el ángulo de inclinación "a", Horne desarrolló en 1968, utilizando el coeficiente de arrastre hidrodinámico y considerando que $p = F/(w.l)$ la siguiente fórmula para la velocidad mínima a la cual se puede producir hidroplaneo (corregida desde la teoría por resultados empíricos):

$$V_h = 6,35 p^{0,5}; \text{ para automóviles}$$

Más adelante (1984) propuso:

$$V_h = 5,55 [p/(w/l)]^{0,5}; \text{ para automóviles}$$

$$V_h = 29,4 p^{0,21} [1/(w/l)]^{0,5}; \text{ para camiones (perfeccionada por Ivey)}$$

Donde "Vh" surge en km/h, y "p" presión del neumático, está en kPa (kilopascal- 1 kPa = 1 N/m² = 0,145 lb/sq in), mientras que "w", ancho de la pisada y "l", longitud de la misma, están expresadas en milímetros.

Atención: *estas fórmulas son aptas para superficies anegadas con t > 20 mm.*

La relación w/l varía entre 0,75 y 1, siendo un valor medio 0,85.

El TTI (Texas Transportation Institute) desarrolló fórmulas en las que la velocidad mínima para que se produzca hidroplaneo es función del resbalamiento rotacional del neumático "S", presión de los neumáticos "p", profundidad de los surcos de los neumáticos "TD", espesor de la capa de agua por encima de las rugosidades del piso "WD", y la textura del piso "TXD".

Tomando valores medios (TD = 5,56 mm, TXD = 0,96 mm, S = 10% y WD = 6,1 mm), la ecuación del TTI se puede escribir:

$$V_h = 20,6 P^{0,3}, \text{ para automóviles.}$$

También se han desarrollado fórmulas para determinar

la velocidad mínima de hidroplaneo con espesores de anegación inferiores a los 20 mm, que consideran las mismas variables que la fórmula anterior, y cuyos resultados se grafican a continuación para dos valores de profundidad de dibujo de neumático 5,6 mm (medio) y 1,6 mm (mínimo).

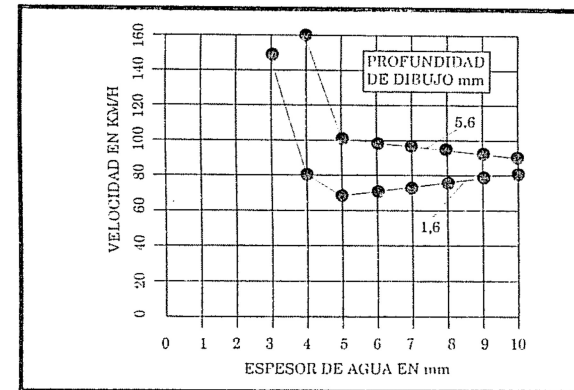


Gráfico 9-I

Estos estudios han permitido establecer algunas conclusiones:

Espesores de la capa líquida menores a 3 mm parecen no permitir hidroplaneo a velocidades razonables en autopistas y presión normal de neumáticos (para t = 3 mm Vh es 150 km/h con neumáticos casi lisos).

Por encima de 20 mm para la capa de agua, la profundidad del dibujo de los neumáticos carece de incidencia.

A mayor presión de inflado de los neumáticos, mayor será la velocidad requerida para que se pueda producir hidroplaneo.

Neumáticos con insuficiente presión (70 kPa -10 libras) entran fácilmente en hidroplaneo hasta con espesores de agua de 0,3 mm (aumenta mucho la superficie de pisada).

Cuanto mayor es el espesor de la capa de agua, menor es la velocidad que se requiere para hidroplaneo.

Alto

Para que se produzca hidroplaneo en todas las ruedas, la zona anegada debe tener una longitud 3 o 4 m superior a la longitud entre ejes.

La aparición del fenómeno es realmente súbita, pues ocurre en menos de medio segundo.

Se debe alertar acerca de que los resultados de las fórmulas presentadas son sólo indicativos, como se puede verificar mediante la dispersión que los mismos muestran para una misma configuración.

Como ya se dijo, son muchos los factores que intervienen en la cuestión, cada uno de ellos con capacidad para modificar los resultados, por lo que, fórmulas basadas sólo en alguno de ellos, necesariamente habrán de brindar resultados con cierta validez para el entorno en el cual se consideran constantes el resto de las variables.

No se agota el tema con las fórmulas ni conceptos acá presentados, sólo es una aproximación al tema, ya que ni siquiera está agotada la investigación al respecto.

9. HUELLAS DE FRENADO

Se producen cuando debido al bloqueo de las ruedas, los neumáticos presentan a la fricción con el piso permanentemente, la misma zona de contacto.

Ello hace que, virtualmente, toda la energía cinética que durante el frenado se transforma en trabajo, se convierta en calor en las zonas de contacto neumático-piso.

Este calor localizado provoca un incremento sensible de la temperatura en la zona, llegándose a ablandar el compuesto de caucho del neumático, y ante la abrasión a que está sometido se desprenden partículas del mismo, depositándose sobre el pavimento.

Tal depósito continúa mientras la energía transferida

sea suficiente para producir el fenómeno descrito, marcándose así las llamadas huellas de frenado.

En realidad el fenómeno se inicia antes de bloquearse las ruedas, cuando el retardo en la velocidad angular de las mismas provoca un *resbalamiento* "S" suficiente:

$$S = (\omega_r - \omega) / \omega_r$$

donde " ω_r " es la velocidad angular de la rueda correspondiente a la velocidad de avance del rodado, rodando sin resbalar, y " ω " es la velocidad angular instantánea de la rueda.

Es decir que el resbalamiento indica cuánto más lentamente gira la rueda de lo que lo haría a esa velocidad del automóvil si no estuviese frenada.

En la práctica, la huella de frenado se inicia muy poco antes del bloqueo total de las ruedas (menos de una décima de segundo), por lo que no se comete un error trascendente al considerar que ocurren simultáneamente.

Lo expuesto encuentra justificativo en que las huellas de frenado comienzan gradualmente, siendo su inicio real de muy difícil —si no imposible— determinación, de modo que antes de comenzar la huella nítida, siempre existe una huella difusa (*shadow marks*) cuyo principio es incierto, que se va acentuando en nitidez hasta convertirse sin solución de continuidad en la huella claramente visible.

La longitud de esta huella difusa depende de la potencia con que se hayan aplicado los frenos, y puede ser de longitud significativa.

Los estudios de Reed y Keskin han determinado que desde que se empieza a accionar el freno hasta que los neumáticos dejan huellas de frenado claramente visibles, se disipa entre el 15 y el 30% de la energía cinética inicial, teniendo en cuenta lo cual la indeterminación sobre el inicio real de la frenada queda salvada.

También se ha determinado que desde que el conductor empieza a apretar el freno, hasta que ello comienza a producir efecto incipiente en la velocidad del rodado, transcurren

unas dos décimas de segundo, y hasta el bloqueo de las ruedas unas cinco décimas de segundo.

Ya veremos cómo esto es útil para determinar el comienzo de la maniobra evasiva y, en consecuencia, el punto de percepción efectiva, a partir de las huellas de frenado.

Otra cuestión que suele provocar indeterminación es la longitud real de la huella de frenado visible, ya que suele ser muy difícil discriminar cuál es la huella que corresponde sólo a neumáticos delanteros y cuál a la superposición de delanteros y traseros. Esto ha sido salvado por los estudios de Brown y Guenther, que determinaron que no se incurre en error significativo si se considera la longitud total de la huella de frenado nítidamente visible, es decir, sin discriminar entre huellas simples o superpuestas, despreciándose las huellas difusas.

Alguna antigua bibliografía sugería como norma tomar la cuarta parte de la sumatoria de las longitudes de las huellas de deslizamiento encontradas, teniendo en cuenta la superposición de las mismas, considerando que así se tomaba una longitud media (para vehículos de cuatro ruedas).

Parece correcto, aunque ello continuaba sugiriendo aplicar el mismo procedimiento aun cuando se encontrasen menos de cuatro huellas de frenado, aduciendo que las ruedas que no dejan marca no contribuyen al frenado.

Como consecuencia de esto, la velocidad obtenida cuando sólo se encuentra una huella de frenado, es la mitad de la que se obtendría si la longitud de tal huella se considerase íntegra. ¿Es esto correcto? ¡No!

Como veremos, salvo que se verifique defecto en el sistema de frenos, lo razonable es tomar la longitud máxima de las huellas.

Lo anterior obedece a que, como vimos, el hecho de que una rueda no deje huellas, no quiere decir que no contribuya al frenado, sólo significa que no se bloqueó, y como en una frenada de máxima eficiencia no se dejan huellas (las huellas obedecen al bloqueo de los neumáticos, lo que ocurre con un resbalamiento del 100%, mientras que la máxima eficiencia

del frenado ocurre con resbalamientos del orden del 15%), la rueda que no las dejó pudo estar frenando con eficiencia máxima o, al menos, superior a la que sí las dejó.

Por lo dicho, con un sistema de frenos operativo, las ruedas que no dejaron marcas, o las dejaron más cortas, muy probablemente hayan contribuido al frenado más que las que se bloquearon y dejaron marcas; por lo menos es razonable suponer que lo hicieron en la misma medida.

Reed y Keskin han demostrado que en el momento de máxima eficiencia de frenado se produce una desaceleración que es 20 a 30% mayor que la que acaece a partir del bloqueo.

Por lo dicho (repetimos, salvo que se detecten serias deficiencias en el sistema de frenos), considerar la longitud de la huella más larga como distancia de frenado, tiende a proporcionar valores de velocidad inicial que, aunque menores a los reales, proporciona resultados más cercanos a éstos que los obtenidos según recomendaba la antigua bibliografía mencionada, que da resultados aun menores.

10. HUELLAS DE FRENADO Y DE DERRAPE

Si bien son movimientos esencialmente distintos, en ambos casos la fricción puede provocar el depósito de partículas de caucho sobre el pavimento, las que suelen ser confundidas.

Se pueden distinguir con facilidad ambos tipos de huella mediante la observación directa, y, a veces, mediante fotografías, ya que mientras la huella de frenado muestra estrías longitudinales, en las de derrape estas estrías son transversales a la huella.

En los casos de derrape durante un frenado las estrías son oblicuas, y cuando un frenado se transforma en derrape, o viceversa, se puede determinar la zona de ocurrencia por la modificación de las estrías de un tipo a otro.

RODADURA



Gráfico 10-A

DESLIZAMIENTO

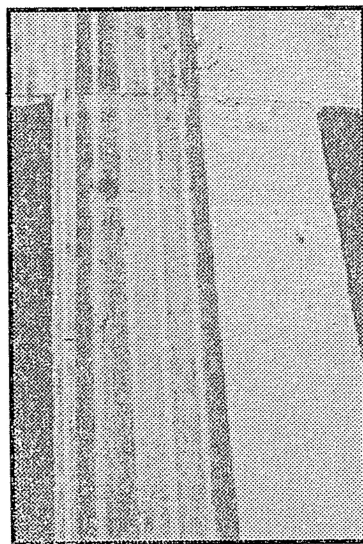


Gráfico 10-B

También indica la existencia de derrape el hecho de que las huellas de las ruedas traseras se separen de las huellas de las delanteras.

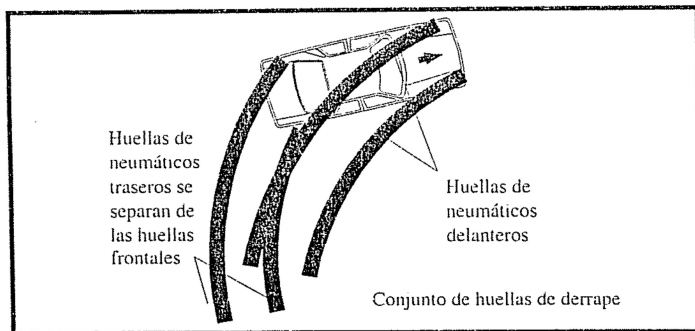


Gráfico 11

Gráfico 11: huellas de neumáticos

Longitud efectiva de las huellas de derrape.— Ya hemos descrito las características de las huellas de frenado y de las de derrape; inclusive, se ha mencionado la oblicuidad de las estrías de la huella que ocurre cuando simultáneamente ocurren bloqueo de neumáticos y derrape.

Hay otro caso en que se presenta oblicuidad de las estrías, esto es cuando ocurre el derrape estando las ruedas no bloqueadas, es decir rodando.

A veces es muy difícil diferenciar cuál de los fenómenos origina este tipo de huellas.

Si se tiene la oportunidad de analizar detenidamente las huellas se puede observar que para un dibujo de neumático dado, con huella plena, las estrías del derrape con rodadura son más cortas que las estrías de huellas de derrape con bloqueo.

Además, en el primer caso cada estría empieza y termina difusamente, mientras que en derrape con bloqueo, sobre todo el extremo externo de cada estría presenta una finalización nítida.

Usualmente esta discriminación se realiza mediante la relación entre la oblicuidad y la curvatura de las huellas y/o por el contexto general de la ubicación del accidente.

De este modo, para una determinada curvatura de huella, las estrías del derrape en rodadura tienden a estar más alineadas con la huella, es decir son menos oblicuas que en derrape con bloqueo.

Asimismo, encontrar huellas de neumáticos, con estrías oblicuas, en medio o a la salida de una curva cerrada del camino, implica derrape con rodadura, a menos que por otros indicios se pueda confirmar la existencia de frenado.

A los efectos cuantitativos es muy importante la diferencia entre los dos fenómenos, ya que en el caso de frenado con derrape, durante toda la longitud de la huella se disipa energía por fricción, pero, cuando el derrape ocurre con los neu-

máticos girando, sólo se disipa energía por fricción en la dirección de las estrías (*ver gráfico*).

El gráfico es muy esquemático y en él se reemplaza sin demasiado error la longitud del arco de la huella, por una recta entre su inicio y fin.

Si la huella fuese muy larga o su curvatura muy pronunciada, es conveniente dividirla en tramos asimilables a rectas y proyectar cada uno en la dirección de las estrías. (Idealmente habría que encontrar el polinomio que representa la curva de la huella y luego proyectarlo.)

Podemos ver en el gráfico que la longitud efectiva a efectos de los cálculos energéticos puede ser muy inferior a la longitud de la huella.

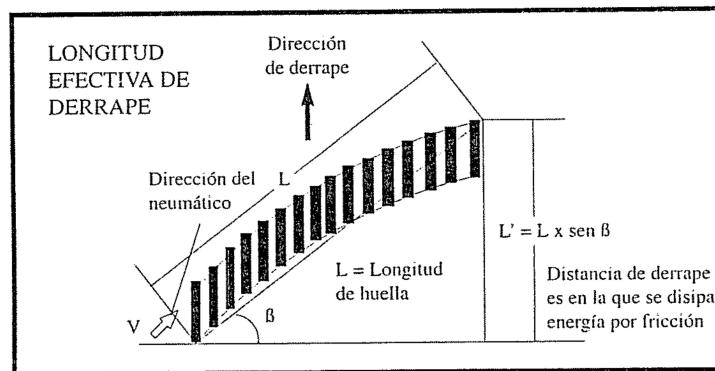


Gráfico 11-B

11. VELOCIDAD CRÍTICA

Las huellas de derrape se producen cuando se supera, en un giro la llamada *velocidad crítica* "Vc", tal que:

$$V_c = (\mu_t \cdot R \cdot g)^{0,5}$$

donde " μ_t " es el coeficiente de rozamiento transversal, "R" es el radio de la curva descrita, y "g" la aceleración de la gravedad.

12. FRENADO DE PÁNICO O "STOP PANIC"

No todas las frenadas dejan huellas de tal hecho; es más, cotidianamente comprobamos que la inmensa mayoría de las veces en que un rodado frena, lo hace reduciendo su velocidad, sin deslizarse y sin dejar las huellas de frenado consiguientes.

Ya hemos mencionado que la máxima eficiencia del frenado, esto es, la más corta distancia de detención, se logra cuando el resbalamiento "S" es del orden del 15%, y que el bloqueo de las ruedas (S=100%) reduce tal eficiencia.

Es por eso que, ante una frenada comprometida, sea aconsejable evitar el bloqueo mencionado mediante la modulación de la presión que se ejerce sobre el pedal de freno. En situaciones de riesgo inminente es muy difícil que el conductor tenga la sangre lo suficientemente fría como para soltar y apretar el freno en forma reiterada, aun cuando quiera hacerlo —como veremos más adelante, en el capítulo de tiempo de percepción y reacción—, puede serle físicamente imposible.

Lo usual es que quien perciba un riesgo inminente *clave* sus frenos, en lo que se llama frenada 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.

Es útil destacar que, en estas condiciones, desde que se inicia el frenado hasta el bloqueo de los neumáticos, transcurren aproximadamente 0,50 segundos.

Actualmente existe un sistema llamado "ABS" (*anti-blocking system*), que automáticamente evita el nefasto bloqueo de las ruedas, aunque el conductor no cese de apretar el pedal del freno.

Infelizmente, muy pocos modelos están provistos de este ingenio, que mejora sensiblemente las chances de evitar los accidentes o disminuir sus consecuencias.

El ABS procura y logra preservar en gran medida durante toda la duración de la frenada, su máxima eficiencia, es decir, mantener a la rueda con un resbalamiento en el entorno del 15%.

Ya hemos visto que, experimentalmente, se ha comprobado que la máxima desaceleración de una frenada en camino seco es entre un 20 y un 30% superior a la que se produce una vez bloqueados los neumáticos (en superficies mojadas dicho incremento llega al 50%).

Esto nos lleva a poder calcular la velocidad cuando, existiendo constancias de importante frenado, no se dejaron huellas, ya sea porque el rodado estaba provisto del ABS, o porque el conductor *moduló* su pedal, para lo cual basta incrementar el coeficiente de frenado usual de esa superficie en un 10% para camino seco, o en un 25% en superficies mojadas.

El 20% y el 30% son respectivamente los valores mínimos de los rangos de incremento, pero deben tomarse los valores indicados (10 y 25%) debido a que si bien se intenta mantener en todo momento la eficiencia máxima del frenado, es imposible lograrlo permanentemente.

Estos valores coinciden con los mínimos hallados en los *tests* del sistema ABS.

13. EFICIENCIA DEL FRENADO (DISCUSIÓN)

En alguna bibliografía, particularmente en la europea, y en algunos trabajos de reconstrucción de accidentes, hemos

encontrado las fórmulas de cálculo de velocidad en función de las huellas de frenado, afectadas por un coeficiente que sus autores denominan *eficiencia del frenado*.

Conceptualmente tal entidad nos resulta sumamente discutible, según veremos a continuación.

En principio, la denominación *eficiencia* resulta inapropiada, ya que la eficiencia de cualquier sistema se define por la relación entre lo que entra al mismo (*input*) y lo que sale como resultado (*output*), o entre insumos y productos.

En el caso de frenado no se nos ocurre qué elementos colocar en el cociente; tal vez se podría utilizar como divisor una desaceleración óptima o máxima obtenible en las condiciones dadas, y en el dividendo la desaceleración real de frenado.

Esto podría tener sentido en el caso de frenado sin bloqueo, ya que se trataría de la eficacia de la acción de frenado y del sistema de frenos frente a la mejor acción posible en esas condiciones.

Como la desaceleración real es función del resbalamiento (*ver huellas de frenado en el cap. III*) toma distintos valores entre cero y la desaceleración máxima, hasta que los neumáticos se bloquean.

Hay sistemas mecánicos de medición que permiten determinar la eficacia del sistema de frenos; lógicamente, tal medición se encuentra limitada por el bloqueo. Inclusive, un dinamómetro dispuesto en el pedal de freno, permite evaluar la acción del conductor.

Podemos utilizar valores de eficacia medidos de esta manera (en caso de poseerlos) para detenciones en las que no existan huellas de neumáticos, sabiendo que el cálculo sólo sirve para acotar por máximo la velocidad inicial.

Si no disponemos de las mediciones recientes para el rodado en cuestión, estimar cualquier *factor de eficacia* —término más feliz que *eficiencia*— resulta una arbitrariedad, ya que lo que científicamente corresponde, es hacer dos cálculos: uno con eficacia cero (rodadura, sin actuación de frenos) y

otro con eficacia absoluta (valor uno, máxima desaceleración posible en esas condiciones) para obtener los valores de las velocidades mínimas y máximas posibles.

Una vez bloqueadas las ruedas la posibilidad de variación ya no existe; el sistema de frenos desaparece como factor y la acción del conductor está en un estadio determinado, por lo que hablar de *eficiencia* carece de sentido físico, siempre es uno, pues la desaceleración (*drag-factor*) depende sólo del coeficiente de fricción, que es único en bloqueo, para cada conjunto de condiciones.

Un análisis de estos hechos efectuado desde el absurdo resulta de suma utilidad.

¿Cuál es la eficiencia que hemos de considerar cuando tenemos que determinar la velocidad inicial de un objeto que carece de frenos, como en los problemas de física I de la facultad, donde un bloque de madera, deslizándose sobre un piso pulido, con un *mu* determinado, se detenía en "D" metros o, si un rodado volcado se desliza sobre su lateral una distancia de "L" metros?

A los efectos del fenómeno físico, un móvil que se desplaza con sus neumáticos bloqueados es igual a uno que tuviese tacos de goma en vez de ruedas como apoyo sobre el piso.

Resulta clarísimo entonces que, en los cálculos de velocidad que se basan en huellas de frenado con bloqueo, utilizar la *eficiencia de frenado* resulta ser un absurdo.

SEGUNDA PARTE

ANÁLISIS DE ACCIDENTES

CAPÍTULO PRIMERO

ANÁLISIS

Una vez reconstruido el accidente, es decir, sabiendo cómo ocurrió, se puede realizar el análisis del mismo para determinar por qué ocurrió.

Los *porqué* pueden encadenarse hasta el infinito, pero a efectos de la accidentología aplicada al campo jurídico, se limitan al entorno témporo-espacial del accidente.

Para evitar caer en subjetividades, y/o incursionar en el área de los jueces, en cuanto atribución de responsabilidades, hemos desarrollado un método de análisis basado en la *evitabilidad física del accidente*, por parte de los protagonistas.

El método consiste en el estudio de las interrelaciones existentes entre los distintos *puntos accidentológicos*, el significado físico de estas interrelaciones, y sus posibles vinculaciones con las variables involucradas en la producción del accidente.

Si bien los llamados puntos accidentológicos existen desde hace tiempo en la bibliografía internacional, así como el concepto de accidente evitable, creemos que es original el método sistemático de interrelación e interpretación aquí presentado.