

CÁLCULO DE VELOCIDAD EN BASE A HUELLAS DE DERRAPE

Luis Marcelo Ance

Ingeniero Mecánico

lance@movi.com.ar

1. INTRODUCCIÓN:

Es habitual que, a falta de un procedimiento específico para determinar velocidad cuando las huellas del vehículo son de derrape, se tome para su cálculo el mismo criterio y coeficiente que si se tratara de un frenado. Ello introduce importantes errores, por cuanto la energía disipada habitualmente es considerablemente menor a la correspondiente al frenado con bloqueo sobre igual recorrido.

El objetivo del presente trabajo es, además de advertir sobre este error (muy común), brindar una metodología de cálculo que minimice los errores, y permita un cómputo adecuado de la energía perdida durante el derrape, y en consecuencia, la velocidad asociada a él.

2. PRIMER PASO: ESTUDIO DE LA HUELLA

En varios ámbitos de la práctica de la accidentología se asocia huella de neumático con huella de frenado. Este sustantivo error es aún mayor y más frecuente en la etapa de recolección de datos. Es habitual que ante una huella de neumático, el preventor se limite a tomar su medida (en el mejor de los casos) o a estimarla; y automáticamente asignarle la calidad de “huella de frenado”, aún cuando el rastro en cuestión no se trate más que una huella de neumático, pudiendo ser de frenado o no.

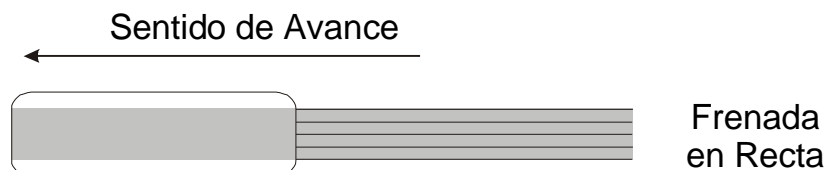
En otros casos, quien realiza la investigación en el lugar del accidente cataloga correctamente la huella como de derrape, e incluso la fotografía, pero quien luego toma esos datos para el cálculo de velocidad la considera de igual modo de que si se tratara de una huella de frenado. En este caso (también bastante difundido) en la determinación de velocidad, el perito se extravía respecto del proceso físico que produjo la imprimación de la huella sobre el pavimento.

Presentaremos en este trabajo casos típicos de estas prácticas, y la correspondiente evaluación para un correcto proceso de investigación del accidente de tránsito.

Distintos tipos de huellas

En cualquier manual básico de introducción al estudio de accidentes de tránsito se presentan los distintos tipos de huellas que se producen. Sin pretender aquí efectuar un análisis exhaustivo de todas ellas, pueden considerarse más frecuentes las *huellas de frenado*, *huellas de derrape*, *huellas de aceleración* y *huellas de rodadura*. A veces hay combinación entre algunas de ellas, o unas se encuentran a continuación de las otras. También importa el trazado de las mismas, ya que nos pueden estar evidenciando un trompo o giro sobre el propio eje, zonas de colisión, etc.

Huellas de frenado: Se trata de una huella oscura, que presenta estrías longitudinales en la misma dirección de la huella (estas estrías se deben a las ranuras del dibujo del neumático). Su ancho coincide con el del contacto del neumático con el piso. Comienza con una marcación suave, y va oscureciéndose.



Huellas de aceleración: Son similares a las anteriores, con la diferencia que comienzan oscuras, y luego se van aclarando hasta desaparecer. También posee estrías longitudinales, y su ancho coincide con el del neumático. Habitualmente son muy cortas.

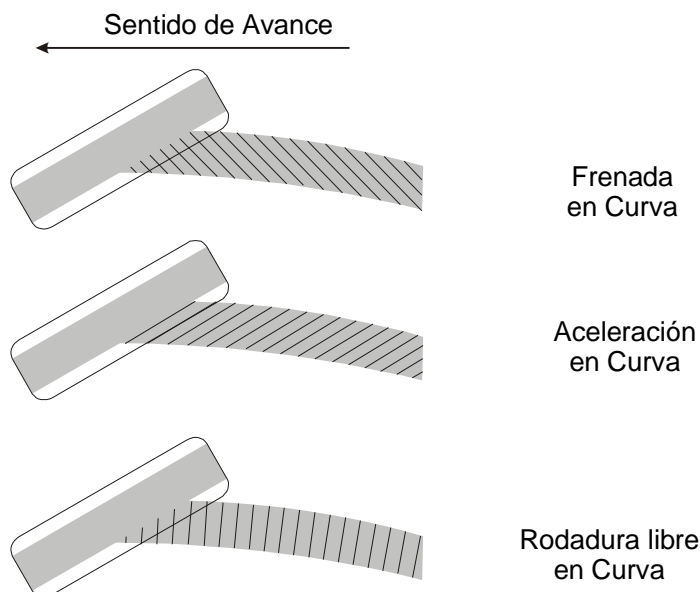
Huellas de rodadura: Normalmente se produce sobre material suelto (arena, tierra) o sobre césped. En los primeros casos, se “imprime” el dibujo de la rueda sobre el material suelto. En el césped, éste queda aplastado, pero no arrancado (en este último caso, hay que investigarlo más bien como rastro de frenada). También este rastro de rodadura suele ser dejado por fluídos (frecuentemente aceite o combustible liberados en una colisión) adheridos a las ruedas de los vehículos. En este último caso, resulta de interés discriminar el recorrido de los rodados colisionantes de los vehículos que pasaron en forma inmediata posterior a la colisión.

Huellas de derrape: Presenta la particularidad de que las estrías no siguen el sentido longitudinal de la huella. Su ancho puede ser mayor, igual o menor que el ancho del neumático, gobernando este ancho el mayor segmento de la pisada perpendicular al sentido del desplazamiento del rodado. Pone en evidencia que el sentido de desplazamiento del vehículo no coincide con el eje longitudinal de las ruedas, con un ángulo entre ambos normalmente superior a los 4° , en vehículos subviradores. La huella de derrape es provocada generalmente por una rueda que se mantiene rodando pero que al mismo tiempo desliza lateralmente en mayor o menor grado; es poco frecuente un deslizamiento neto a 90° respecto del eje del vehículo. Esta huella es frecuentemente curva, y se presenta más oscura en el lado exterior, debido a fenómenos de transferencia de fuerzas a causa de la “acción centrífuga”.

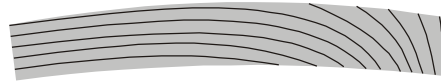
Se vincula normalmente con fenómenos de giro o de dificultades de tenuta en curva, pero no es exclusivo de ello, pudiendo aparecer en diversas situaciones, que deben ser estudiadas en particular.

Es importante destacar que en general **las ruedas se mantienen girando**.

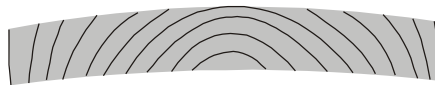
La caracterización típica, como se dijo, es se da en trazados curvos, o que integran curvas. Los patrones generales de estudio de la dirección de las estrías en relación al desplazamiento del rodado (lo que debe establecerse antes de sacar conclusiones) nos permiten evaluar si el vehículo se encontraba en proceso de aceleración, de frenado o bajo los efectos de la rodadura.



A su vez, es habitual encontrar que una huella de neumático se transforma de un tipo en otro a la largo de su recorrido. Podemos hallar una huella de frenado que en su curso da origen a otra de derrape diagonal (típica cuando se produce frenados severos en tramos curvos), o viceversa, como muestra el esquema siguiente:



También la huella de derrape puede evidenciar el giro completo del vehículo sobre su eje. En este caso, además de información hacia dentro de la huella, también nos encontraremos con cruces entre las huellas de distintas ruedas.



Finalmente, es importante recalcar, que antes de comenzar cualquier cálculo o descripción del hecho que se investiga es IMPRESCIDIBLE tratar de vincular el tipo de huella con su trazado, identificar a qué rueda o ruedas corresponde, y la trayectoria y **posición del vehículo en relación a la huella encontrada, para cada momento de la huella estudiada.**

Es habitual que estas huellas y sus variaciones aparezcan en la fase de pos-impacto; o en la transición entre el pre-impacto, impacto y pos-impacto. Una incorrecta marcación o valoración tenderá a errar la real mecánica del desplazamiento, y a en general a sobre-estimar la velocidad de los vehículos involucrados.

3. ERRORES MÁS FRECUENTES EN EL CÁLCULO DE VELOCIDAD, Y SU CORRECTA VALORACIÓN

3.1 En el caso de derrape en zonas de curvas

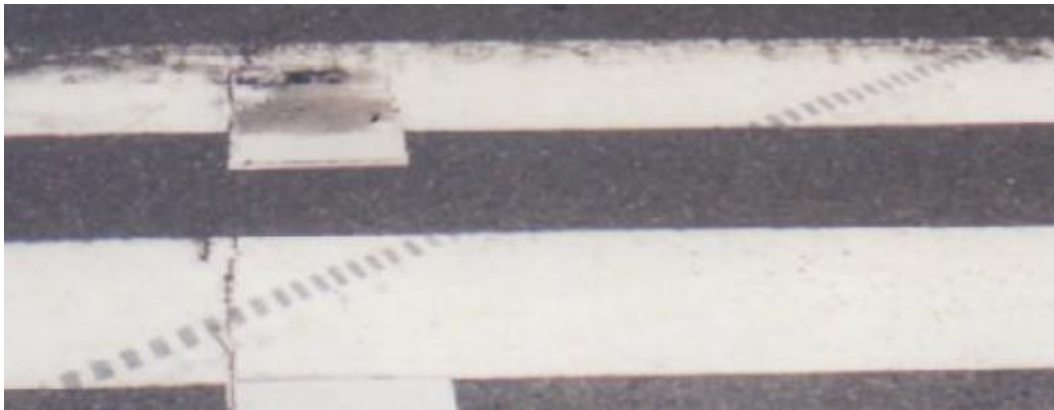
Aquí se presenta una huella de derrape dejada por un vehículo al realizar el giro en una intersección urbana.



En la etapa de toma de datos, se indicó en forma correcta que la huella se trataba de un derrape curvo, siendo la huella exterior de 18 metros y la interior de 5,20 m. Pero, al momento de la valoración de velocidad, el perito adoptó el criterio de calcularla como si pudiera asimilarse a una huella de frenado con bloqueo (y por supuesto, tomando la longitud correspondiente a la huella más larga). De tal forma, informó que el vehículo inició el giro con una velocidad superior a los 57 km/h.

La correcta valoración: En un caso como el presentado, el cálculo correcto se debe basar en la consideración de la velocidad límite para inscribir al vehículo en la curva. Sobre la base de la ubicación de la huella de derrape, y considerando especialmente su inicio, debe encontrarse el radio de la curva circunscripta en la trayectoria del rodado en el momento de pérdida de control (inicio de huella). En este caso, fue de 17 metros.

El estudio de la fotografía permite observar que las estrías del derrape son radiales, por lo que estamos en presencia de un derrape bajo condiciones de rodadura.



En ese caso, podemos tomar la ecuación:

$$V_{\text{lím}} = \sqrt{\mu \cdot g \cdot R}$$

Siendo:

μ : coeficiente de deslizamiento.

g : aceleración de la gravedad

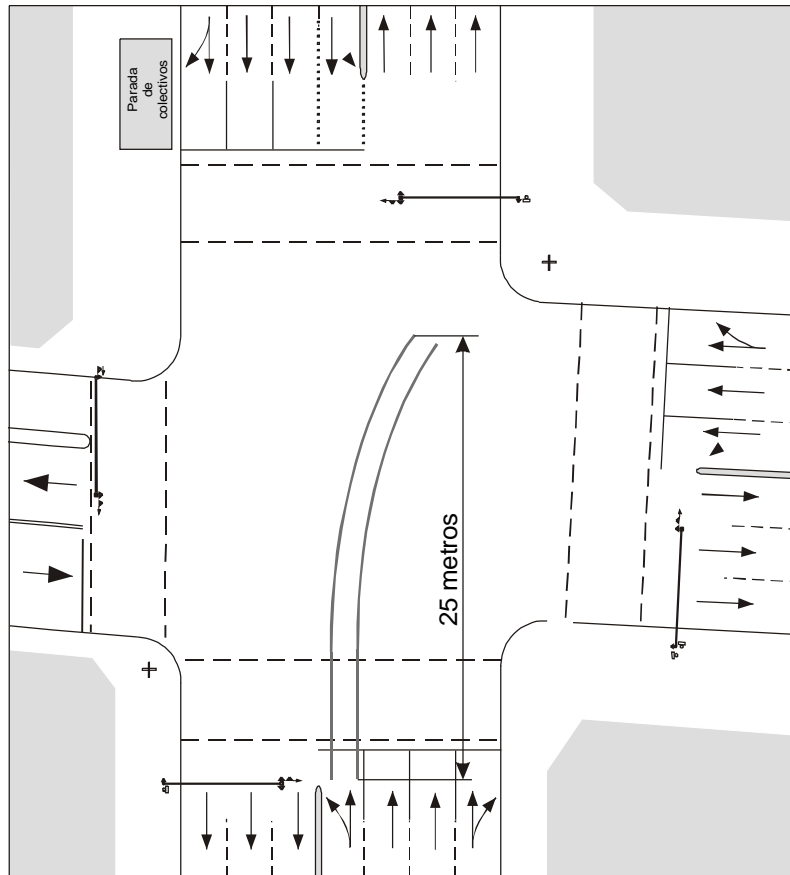
R : radio de la circunferencia circunscripta.

Esta ecuación no es de correcta aplicación si estamos frente a derrape con frenado o con aceleración.

En el caso presentado, la correcta aplicación de las ecuaciones de movimiento arroja un velocidad superior a los 39 km/h. La incorrecta valoración del proceso de producción de la huella y las ecuaciones asociadas ha sobreestimado la velocidad en casi un 50 % respecto de la real.

3.2 En el caso de huellas de neumáticos “sesgadas”

También es común encontrar registros de “huellas de frenada” con la siguiente información:



La indicación de “huellas de frenada” en toda la longitud, en coincidencia con la longitud total de la huella de neumático pone de manifiesto el error en el relevamiento de la huella. Si se trata de un vehículo sin ABS, sabemos que con bloqueo (condición para la “huella de frenado”) no le resulta posible a las ruedas modificar la dirección del desplazamiento, debido a que ya no disponen de la fuerza lateral necesaria para esa maniobra de conducción. En consecuencia, no resulta posible que toda la huella indicada sea de frenado. Las alternativas que se presentan es que estemos ante una huella de derrape de 25 metros (de características que desconocemos, ante la falta de mayores datos), o que parte de la huella sea de frenado (al principio, antes que se produzca el cambio de dirección) y parte de derrape, o que la primer parte haya sido de frenado, y que el cambio de dirección sea producto de la colisión. El punto de inflexión de la huella pudo haber sido omitido por quien relevó los datos, por su falta de conocimiento en la materia, también evidenciado en la falta de acotación de la huella en relación a su inicio y finalización, descripción insuficiente y equívoca de la huella hallada, etc.

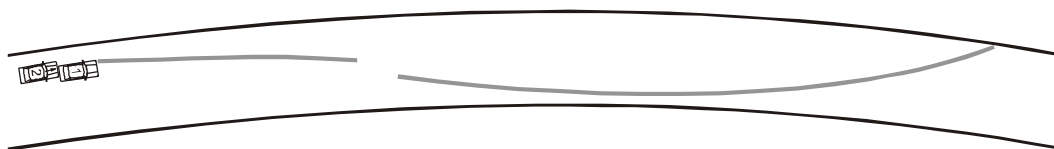
Si se tratara de un vehículo con ABS, que permite la maniobra lateral mientras se frena, no habría rastros de huellas oscuras como las indicadas.

Lo cierto es que ante un caso como el presentado, poco podemos decir en forma seria sobre la velocidad. Sólo nos queda plantear conjeturas e hipótesis. Todo a consecuencia de la deficiencia en la recogida de datos.

Es conveniente tomar especial atención si en la huella hay cambios de dirección en un vehículo sin ABS. Estaremos ante un derrape descontrolado, pero no ante un frenado con bloqueo. Si hay bloqueo, no hay acción de direccionamiento sobre el vehículo, éste seguiría en línea recta.

3.3. En el caso de huellas de derrape por pérdida de control

Hay diversas situaciones en que el conductor pierde el control del vehículo, fuera del caso de giro en curva, y demora en retomar el dominio, o no consigue lograrlo hasta que choca o el vehículo se detiene. En todo ese proceso, las ruedas dejan marcas de caucho, caracterizadas como de “derrape”. Presento a continuación un ejemplo:



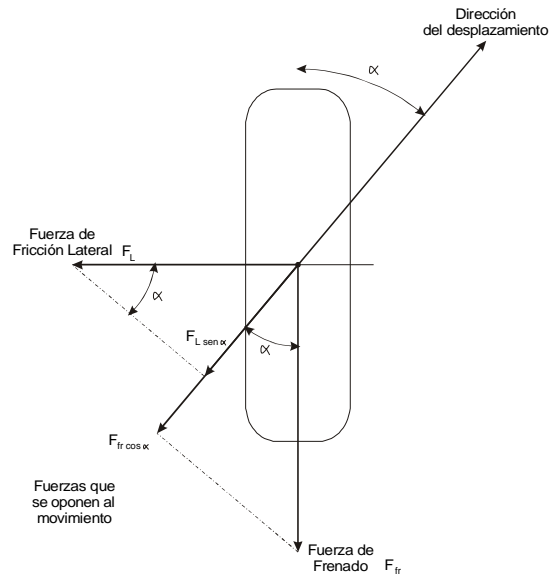
El vehículo **1** fue impactado desde atrás por el vehículo **2**, a consecuencia que el segundo superó la velocidad límite para tomar la curva. El vehículo **1** comenzó a derrapar, y el conductor, sorprendido no consiguió recuperar el control hasta que chocó al final de toda la longitud del derrape. La longitud total de todo el derrape fue de 95 metros. En un peritaje, se tomó de igual modo que si se tratara de un frenado en toda esa longitud. Arrojó una velocidad “mínima” de 130 km/h!!!!

A los efectos de una mejor comprensión del tremendo error que introduce esta metodología, debe señalarse que la huella de derrape relevada no presenta ningún dato de que los frenos del vehículo se hubieran accionado. Puede que sí, puede que no, puede que en algunos momentos, puede que en forma leve. Ante esto, el investigador debe adoptar en todo momento un criterio prudencial. Si el automotor se hubiera cruzado 90° respecto del sentido de desplazamiento, sí podría haberse tomado el coeficiente de derrape perpendicular (aproximadamente similar al coeficiente de deslizamiento que se toma en frenado con bloqueo), pero sólo en el tramo en que se verifica dicho extremo.

Tampoco es adecuado calcular (en este caso) por el criterio de la velocidad límite en curva. No se trata de una situación en que el conductor estaba tratando de inscribir su auto en una curva, con sus ruedas posicionadas en el ángulo de deriva ruedas-trayectoria propio de dicha maniobra, y que perdió la curva por exceso de velocidad. Aquí la pérdida de control se origina en una fuerza exterior que impulsa al rodado a desplazarse en una dirección distinta a la condicionada por la posición de los neumáticos. Esa diferencia de dirección, superior a la deriva que puede admitir el sistema bajo esas condiciones, es lo que provoca el derrape descontrolado. Esta situación se mantiene, aproximadamente, durante todo el recorrido que evidencia huellas de derrape.

En este caso, no aparecería, en principio, solución al problema de la determinación de la velocidad mínima del vehículo, en base a las huellas de derrape encontradas.

Se propone, entonces, buscar el procedimiento de cálculo sobre la base del análisis de las fuerzas a que puede estar sometido el neumático:



En el dibujo tenemos el esquema de la rueda sometida a un desplazamiento en una dirección distinta a la de sus ejes principales. A ese movimiento se oponen fuerzas vinculadas a la fricción que se originan en los dos ejes principales del neumático: Sobre el eje longitudinal, tendremos la acción propia de las fuerzas de frenado, y sobre el eje transversal actuarán las fuerzas de fricción laterales. La proyección de estas dos fuerzas sobre el eje del movimiento, nos aportarán las sendas fuerzas que se oponen al desplazamiento.

En el caso en que constatemos la efectiva aplicación del freno, en este tipo de desplazamiento tendremos fricción sobre ambos ejes imaginarios. Habrá que considerar la magnitud del frenado, y los límites que impone el "círculo de adherencia".

Si la rueda está bloqueada, la suma de estas dos fuerzas será equivalente a la fuerza de fricción máxima disponible ($\mu \cdot m \cdot g$)

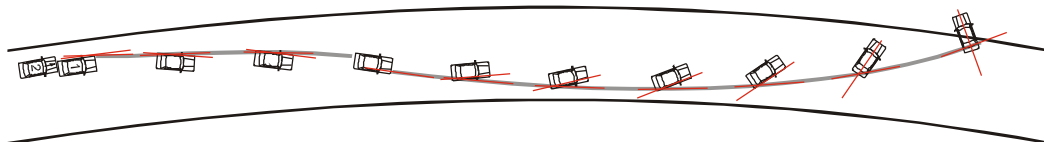
Pero, si no tenemos constancias de aplicación efectiva del freno, debemos evaluar solamente la fuerza de fricción lateral, que sabemos actúa en toda situación de derrape.

Analizaremos este último caso. Nos ayudará para ello el ejemplo propuesto.

No habiendo acción del sistema de frenos, las fuerzas no conservativas que están actuando son las de deslizamiento con rodadura que se da en el sentido lateral (fuerzas laterales).

$$F_r = \mu \cdot \text{sen } \alpha \cdot m \cdot g$$

Se plantea dividir la trayectoria en partes iguales a los fines de obtener N posiciones donde pueda considerarse el efecto de las fuerzas no conservativas. Siendo que se trata de fuerzas de fricción laterales, estarán regidas por el peso del vehículo y el $\text{sen } \alpha$.



De tal modo, se puede obtener un μ equivalente (μ').

$$\mu' = \mu \cdot (\sum \text{sen } \alpha_i) / n$$

Por lo que μ' se puede introducir en la ecuación

$$V = \sqrt{2 \cdot \mu' \cdot g \cdot d}$$

μ : coeficiente de deslizamiento.

g : aceleración de la gravedad

d : distancia

Reemplazando μ por μ' definido éste como coeficiente de fricción equivalente para el cálculo de velocidad en función al coeficiente de roce efectivo promedio en todo el tramo.

Posición N°	Angulo	Seno áng.	Coeficiente Fricc.lateral
1	6	0,105	0,073
2	6	0,105	0,073
3	6	0,105	0,073
4	0	0,000	0,000
5	10	0,174	0,122
6	15	0,259	0,181
7	20	0,342	0,239
8	30	0,500	0,350
9	45	0,707	0,495
10	90	1,000	0,700
Suma		3,295	2,307

Si tomamos como base $\mu = 0,7$

$$\mu' = \mu \cdot (\sum \text{sen } \alpha_i) / n = 0,7 \cdot 3,295 / 10 = 0,23$$

Para el ejemplo presentado, resulta en consecuencia una velocidad de 74,5 km/h. Si el cálculo se hiciera considerando como coeficiente de roce el correspondiente a bloqueo, se obtendría 130 km/h, sobreestimando la energía en un 200%, y la velocidad en un 75 %.

Debe advertirse que las ruedas directrices del automotor pueden no encontrarse durante el derrape paralelas al eje del vehículo, produciéndose una variación de algunos grados en relación al eje longitudinal de las ruedas traseras. Para el cálculo, esta circunstancia se debe corregir efectuando un promedio ponderado entre ruedas delanteras y traseras (considerando coeficientes de reparto de peso). En caso de desconocerse o no poderse estimar la inclinación relativa de las ruedas delanteras, el error en el cálculo será menor, máximo considerándolo en relación a los elevados errores de las prácticas de cálculo aquí cuestionadas, y que son comúnmente utilizadas en la actualidad.

4. CONCLUSIONES

- La difundida práctica de tomar coeficientes de rozamiento de frenado para aplicarlos a simples derrapes introduce importantes errores en el cálculo de velocidad, sobreestimándola. El error introducido por esa metodología es tan grande que resultaría preferible no calcular velocidad a calcularla por dicho método erróneo.
- Es necesario e imperioso instruir a los responsables de la recolección de datos del serio error que se comete al no describir y clasificar la huella correctamente, advirtiéndoles además de los cambios que se van produciendo en su trazado. Además de la medición y mapeo de los distintos tramos de la huella, se debe requerir sea fotografiada en su inicio, desarrollo y finalización.
- La metodología aquí propuesta permite un cálculo adecuado de la energía perdida durante el derrape, y en consecuencia, la velocidad asociada a él (ΔV).
- El coeficiente de rozamiento a aplicar cuando tenemos derrape puro, sin acción de frenado obedece a la siguiente ley matemática:

$$\mu' = \mu \cdot \text{sen } \alpha$$

siendo:

μ' : coeficiente de rozamiento real en una condición dada de derrape sin acción de frenos.

μ : coeficiente de roce neumáticos – piso para condición de bloqueo, en el sitio investigado

α : ángulo entre dirección de desplazamiento del vehículo y eje longitudinal de sus neumáticos.

- En tramos de derrape prolongado, puede usarse como valor promedio ponderado de μ'

$$\mu' = \mu \cdot (\sum \text{sen } \alpha_i) / n$$

BIBLIOGRAFÍA

- § Ruhl, Roland A; Owen, Dwayne G. “**Vehicle Accident Investigation – A Guide for Risk Managers and Claims Personnel**”, (ISBN 1-887257-00-4)
- § Reveley, Mary S; Brown, Douglas R.; Ghenther; Dennis A. “**A Comparison Study of Skid and Yaw Marks**”, Paper SAE 890635
- § Limpert, Rudolf “**Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis**”, , Ed. Michie, Fourth Edition, 1994
- § Irureta, Víctor, “**Accidentología Vial y Pericia**”, Ediciones La Rocca, Buenos Aires, 1996

CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACCIDENTOLOGIA VIAL

Avellaneda (Argentina), 9, 10 y 11 de octubre de 2003.