

Roce lateral y rotación inducida.

Morero, Lorena Beatriz - Ingeniera Mecánica. Docente de la Facultad Regional Santa Fe – UTN.

Palabras clave: roce lateral; rotación inducida.

Eje temático: Siniestralidad en el tránsito

Resumen:

Se analizó un siniestro en que intervinieron tres móviles, en que se produjeron dos colisiones, donde muchos rastros no fueron relevados y se presentaban dos versiones contrapuestas del hecho.

Se comenzó relevando los vehículos involucrados, lo que permitió formar evidencia sólida con la que se fue reconstruyendo paso a paso el hecho en estudio. De los rastros de pintura y neumáticos sobre las distintas unidades se comprobaron las interacciones que habían tenido lugar entre los mismos, lo que se vio ratificado por los desvíos que estos sufrieron en sus trayectorias inmediatas posteriores al primer impacto y que dieron lugar a una segunda colisión, hasta alcanzar las posiciones de reposo de las unidades.

El trabajo aporta un abordaje desde los rastros, y la investigación subsecuente formulando la evidencia en función de las relaciones físicas entre los móviles, puestas de manifiesto en esos rastros, que se ven ratificadas a su vez por las consecuencias sobre la alteración de las trayectorias de los mismos.

Aporta asimismo una referencia para el análisis de hechos complejos y controversiales con testimonios divergentes, basado en la formación de evidencia a partir de rastros materiales indiscutibles y las relaciones físicas que implican.

1- Introducción

Ante la tarea de reconstruir un siniestro de tránsito el ingeniero cuenta, según el caso, con los rastros relevados por la autoridad policial, en aquellos casos en que se produjeron lesiones o muertes, o las fotografías aportadas por las partes, en accidentes sin lesionados.

Cuando el relevamiento es realizado por personal policial los datos son volcados en actas de inspección ocular y croquis o planos del lugar en que sucedió el siniestro, y en ocasiones fotografías y/o videos de los móviles, los restos diseminados en el lugar, las huellas de neumáticos y, considerando una fuente más amplia, los rastros biológicos. La calidad del relevamiento es sumamente variable: en ocasiones a pesar de haberse realizado cuantiosas mediciones y fotografías nos encontramos con que resultan redundantes y simultáneamente deficientes, en otros casos con muy pocos datos se ha relevado lo esencial. Es por ello que el análisis crítico de rastros por parte del investigador del siniestro cobra un papel fundamental.

En el caso que se analiza en este trabajo, personal policial realizó un primer relevamiento medianamente completo del lugar del siniestro. Se contaba paralelamente con dos versiones de lo ocurrido provenientes de los ocupantes de dos de los tres protagonistas participantes en el hecho –los ocupantes del tercer móvil fallecieron en el mismo-, que no solo resultaban completamente divergentes entre sí, sino además inverosímiles, y con serias incoherencias respecto de los rastros relevados por la autoridad policial.

A partir del análisis de estos testimonios la autoridad judicial a cargo de la instrucción solicitó un relevamiento de los dos rodados cuya participación en el hecho era cuestionada, lo que objetivamente demostraba incoherencias en ambas versiones de lo ocurrido.

En este contexto se realizó el trabajo de reconstrucción analítica del hecho.

2 – Objetivo

Desarrollar la reconstrucción del siniestro a partir de los rastros relevados por personal policial y el relevamiento in situ de los móviles de menor porte –cuyo protagonismo estaba en discusión- y las evidencias físicas que estos develaban, llegando a una explicación racional de lo acontecido, coherente con todos los rastros relevados.

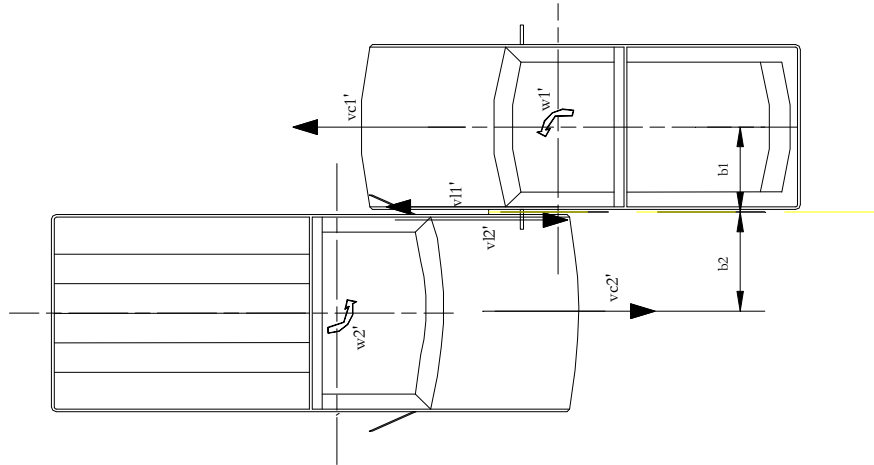
3 - Materiales y métodos

Las fuentes de datos para desarrollar el trabajo fueron el expediente de la causa y el relevamiento dimensional y fotográfico realizado en el lugar del suceso y a los móviles.

La reconstrucción se llevo a cabo a partir de un análisis minucioso de las fotografías que permitió inferir las interferencias entre las trayectorias de los móviles y sus consecuencias físicas, lo que se cotejó con los rastros del hecho para verificar coincidencias, y por último se planteó la modelación matemática de los sucesivos desplazamientos de cada móvil.

Marco teórico- La rotación inducida:

Cuando un vehículo, al que identificamos como el 1, a una velocidad v_1 , se acerca lo suficiente como para contactar a un segundo vehículo 2 que se desplaza en sentido contrario, animado a una velocidad v_2 , se produce una fuerza de rozamiento que se opone, para cada uno de los cuerpos, a su sentido de desplazamiento. Finalizada la interacción, en la zona de contacto tendremos para cada vehículo una velocidad local v_{11}' y v_{12}' , y paralelamente en sus centros de masa velocidades v_{c1}' y v_{c2}' . El momento del impulso de la fuerza de rozamiento $F(t)$ respecto al centro de contacto –equivalente al momento cinético de la colisión- altera la cantidad de movimiento de ambos rodados:



Para el vehículo 1, animado de una velocidad inicial v_1 tendremos:

$$m_1 \cdot (v_1 - v'_{c1}) \cdot b_1 - m_1 \cdot w'_1 \cdot (i_{z1}^2 + b_1^2) = F \cdot t \cdot b_1$$

Paralelamente, para el vehículo 2, animado de una velocidad inicial v_2 :

$$m_2 \cdot (v_2 - v'_{c2}) \cdot b_2 - m_2 \cdot w'_2 \cdot (i_{z2}^2 + b_2^2) = F \cdot t \cdot b_2$$

Igualando en el valor común a ambos móviles $F \cdot t$:

$$m_1 \cdot (v_1 - v'_{c1}) - m_1 \cdot w'_1 \cdot (i_{z1}^2 + b_1^2)/b_1 = m_2 \cdot (v_2 - v'_{c2}) - m_2 \cdot w'_2 \cdot (i_{z2}^2 + b_2^2)/b_2$$

Donde b_1 y b_2 corresponden a la mitad del ancho de cada uno.

Con $m = m_1/m_2$; $k_1 = (i_{z1}^2 + b_1^2)/b_1$; $k_2 = (i_{z2}^2 + b_2^2)/b_2$

$$m \cdot (v_1 - v'_{c1}) - m \cdot w'_1 \cdot k_1 = v_2 - v'_{c2} - w'_2 \cdot k_2$$

Y podemos despejar v_1 :

$$v_1 = (v_2 - v'_{c2} - w'_2 \cdot k_2)/m + w'_1 \cdot k_1 + v'_{c1} \quad (I)$$

Podemos estimar v'_{c2} , w'_2 , w'_1 , v'_{c1} según la trayectoria postimpacto de ambos móviles. Por otro lado debe cumplirse que:

$$w'_1 = (v'_{c1} - v'_{l1}) \cdot b_1 \quad \text{y} \quad w'_2 = (v'_{c2} - v'_{l2}) \cdot b_2 \quad (II) \text{ y } (III)$$

Y simultáneamente las siguientes inecuaciones:

$$v_1 > v'_{c1}; \quad v_1 > v'_{l1} \quad (IV)$$

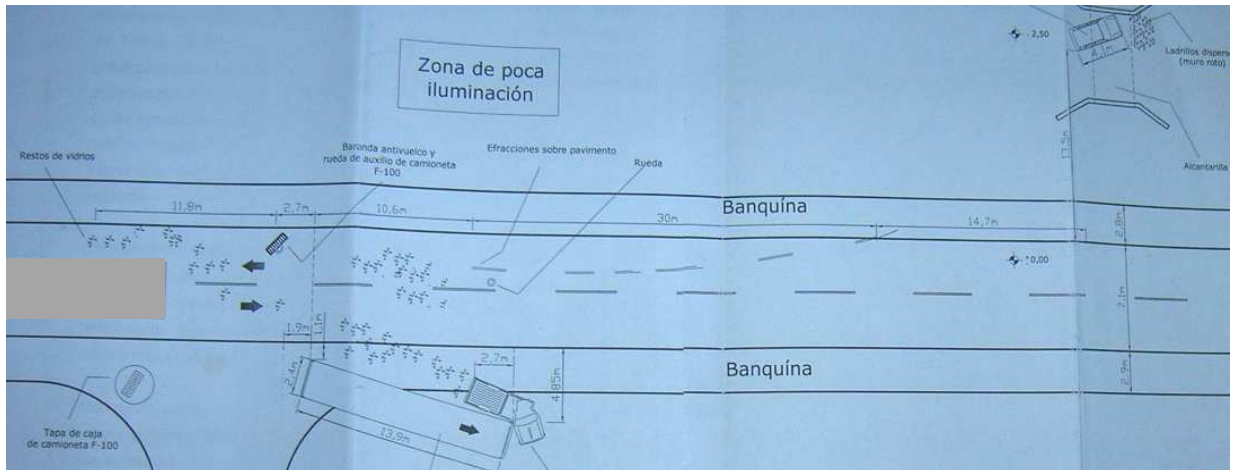
$$v_2 > v'_{c2}; \quad v_2 > v'_{l2} \quad (V)$$

Para valores posibles de v_1 obtendremos los valores de v_2 correspondientes, que podremos segregar con las restricciones planteadas.

4 – Resultados. Antecedentes:

Un día domingo de enero, siendo aproximadamente las 22.30 horas se desplazaban por una ruta provincial tres rodados: una camioneta Ford Courier con dirección Sur a Norte, un colectivo de transporte interurbano de pasajeros fuera de servicio, con igual sentido y una camioneta Ford F100, con sentido Norte a Sur.

Posiciones postimpacto



Análisis de rastros: En la camioneta Ford F100, que quedara bajo el colectivo tenemos rastros de pintura verde sobre su flanco derecho, los que se explican inmediatamente por la interacción con el mismo la cual queda por demás evidenciada en las posiciones finales en que quedaron los rodados. Pero además encontramos, sobre su flanco izquierdo –el cual no tuvo contacto con el colectivo- deformaciones de la chapa, que tuvieron que producirse por el contacto con un elemento rígido actuando desde el frente de la F100 hacia su parte posterior:



Los cuales, además, muestran rastros de pintura blanca, los que solo podrían provenir de una interacción con la Courier -único vehículo blanco interviniente- lo que se ve confirmado al analizar dicha camioneta, en la que encontramos rastros que se corresponden con los hallados en la camioneta F100, que

demuestran un solape suficiente como para plegar los bordes de las chapas de ambos móviles hacia atrás, respecto del sentido de circulación de cada uno de ellos. Además, en la Courier perduran rastros de pintura azul grisácea, color de la F100:



Sabemos entonces que entre ambas tuvo que producirse un contacto de tipo rasante – primera colisión-, que para la camioneta F100 debió comenzar a la altura de la puerta delantera, donde ya se observan rastros de pintura blanca.

Y continuó hasta la parte trasera de la misma, ya que en su portón trasero se puede observar el plegado de la chapa hacia atrás.



Esta interacción explica la segunda colisión -entre la camioneta y el colectivo- por haber quedado la F100 atravesada sobre la calzada, con su frente sobre el carril de circulación del colectivo, por lo que es impactada en su parte frontal-media mientras el colectivo maniobraba hacia la derecha para esquivarla.



Debido a la gran diferencia de masas entre los móviles es que el colectivo, aún a baja velocidad de circulación, tenía la energía suficiente para deformar y arrastrar consigo a la F100.

Simultáneamente se explica una tercera colisión, fin de la secuencia que comienza con el desvío de la Ford Courier hacia su izquierda, sigue su trayectoria derrapando por el pavimento, bajando por la banquina -de aproximadamente 2.5 metros de profundidad- e impactando un murete de ladrillos que sostiene el puente de acceso a un comercio de la zona, derrumbándolo:

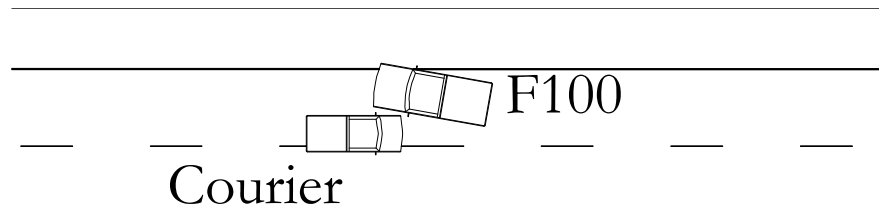


Y es a consecuencia de este recorrido en bajada –en el que debió ir golpeando con su frente el suelo irregular, rebotando y resbalando- y el último impacto con la pared que se deforma su frente:

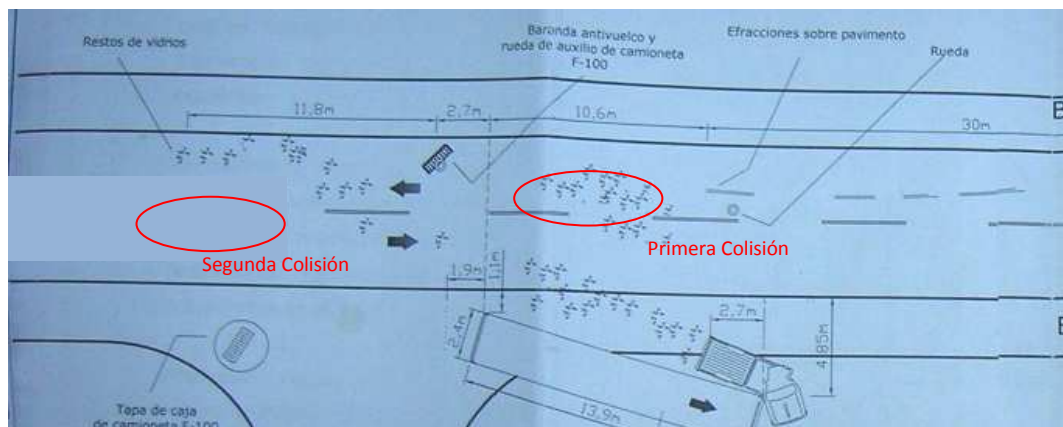


La deformación de su trompa se explica por la acción conjunta de los sucesivos golpes al bajar una banquina de 2.5 metros de altura con superficie muy irregular, el golpe con el muro a su izquierda y contra la acumulación de ladrillos rotos sobre el suelo, producto de esta colisión. Aún pueden observarse los restos de polvo de ladrillo en el frente de la camioneta.

Simultáneamente, puede observarse también que para que el contacto de la Courier con la F100 comenzara a la altura de la cabina es necesario que el contacto se produjera con un cierto ángulo entre ambas camionetas:



Esto indicaría una posible maniobra de evasión por parte de la F100, hacia su derecha, ya que la otra posibilidad –la Courier inclinada a su izquierda- no guarda coherencia con el relevamiento de huellas efectuado por personal policial.



Velocidades postimpacto: Durante el primer contacto –Courier contra F100- la interacción es rasante y por tanto las deformaciones se producen sobre el lateral izquierdo de cada camioneta. Como no es posible determinar cuanta energía se perdió en dichas deformaciones –no existen ensayos que permitan homologar resultados-, un balance general de energía del impacto no es factible, pero si podemos saber cuáles eran sus velocidades inmediatamente luego del primer contacto. Igualmente podemos estimar la velocidad postimpacto del colectivo luego de impactar a la F100.

Camioneta F100:

Recorre unos 17 metros lineales entre la zona de la Primera Colisión y la zona de la Segunda Colisión, y además gira en sentido anti horario debido a la rotación inducida por el roce lateral de la Courier, sin dejar huellas, por lo que la fricción durante su recorrido se corresponde con un coeficiente de desaceleración en derrape, esto es, un $\mu = 0.3$ a 0.4 .

Planteamos entonces que la energía cinética postimpacto es equivalente al trabajo de fricción durante dicho recorrido:

$$\frac{1}{2}m(v_{F100}^2) = m \cdot g \cdot \mu \cdot d$$

m=masa de la F100 mas sus ocupantes

v'= velocidad postimpacto de la F100.

g = 9.8 m/s², aceleración de la gravedad

μ = coeficiente de desaceleración de la F100, entre 0.3 y 0.4

d = distancia recorrida, 17 metros.

Velocidad postimpacto F100				
g - m/s ²	μ	d - m	v'	
			m/s	km/h
9,8	0,30	17,0	10,0	36,0
9,8	0,40	17,0	11,5	41,6

Colectivo de pasajeros:

Recorrió unos 26 metros desde el impacto con la F100 hasta su detención. Dado que no pudo aplicar los frenos, solo detiene su marcha por el roce del metal de la camioneta con el suelo, lo que afecta solo a su eje delantero, mientras el trasero sigue rodando libremente, por ello tomamos un coeficiente de desaceleración de 0.5 veces la fricción metal asfalto (0.4), con una desviación en más y en menos de 0.1: esto nos deja un coeficiente final de entre 0.1 y 0.3:

$$\frac{1}{2}m (v_{Col.}^2) = m_{C+f100} \cdot g \cdot \mu_{m/a} \cdot d_{Col.}$$

m = masa del colectivo mas su conductor, 9500 kg mas 70kg.

m_{C+F100} = masa de ambos móviles y sus ocupantes, se agregan entre 2145 kg mas dos ocupantes, 140 kg.

v_{Col}= velocidad postimpacto del colectivo.

g = 9.8 m/s², aceleración de la gravedad

μ = coeficiente de desaceleración, entre 0.1 y 0.3

d = distancia recorrida, 26 metros.

Velocidad del Colectivo						
m _{C+F100}	m _c	g - m/s ²	μ	d - m	Velocidad postimpacto	
					m/s	km/h
11855	9570	9,8	0,10	26,0	7,9	28,6
11855	9570	9,8	0,20	26,0	11,2	40,5
11855	9570	9,8	0,30	26,0	13,8	49,5

Camioneta Ford Courier: Luego del impacto este móvil primeramente derrapa sobre el asfalto, dejando las huellas relevadas por la policía sobre el pavimento, luego cae por la banquina con lo que aumenta su energía por la diferencia de altura (2.5m), luego sigue a los tumbos, trayecto en el que usaremos un coeficiente de desaceleración que contemple la incertidumbre sobre este valor: 0.35 a 0.75 y finalmente choca un murete de ladrillos, deformando su trompa durante las dos últimas instancias, energía que se estimará con el método de Wood.

Balance de energía específica:

$$E_{\text{postimp.}} - E_{\text{derr.}} + E_{\text{pot.}} - E_{\text{tumbos}} - E_{\text{defs.}} = 0$$

$$\frac{1}{2} \cdot V_{\text{postimp.}}^2 = g \cdot \mu_{\text{derr.}} \cdot d_1 - g \cdot h + g \cdot \mu_{\text{banq.}} \cdot d_2 + E_{\text{defs.}} / m_{\text{Cour.}}$$

donde:

V_{postimp} : velocidad postimpacto de la Courier

g : 9.8 m/s², aceleración de la gravedad

$\mu_{\text{derr.}}$: coeficiente de desaceleración por derrape, 0.3 a 0.4

d_1 : 34 metros.

h : 2.5 metros

$\mu_{\text{banq.}}$: desaceleración en banquina, 0.35 a 0.75

d_2 : 16 metros

$E_{\text{defs.}}$: Energía disipada en deformación.

$m_{\text{Cour.}}$: Masa del vehículo más un ocupante, se toman 1095 y 70 kg

Aplicando Wood para el perfil de deformaciones mensurado obtenemos un valor entre 95 y 115 [kJ].

Energía por derrape, específica			
$g - \text{m/s}^2$	μ	$d - \text{m}$	Joules/kg
9,8	0,30	34,0	100,0
9,8	0,40	34,0	133,3

Energía ganada por caída en la banquina: $9.8[\text{m/s}^2] \times 2.5 [\text{m}] = 24.5 [\text{J/kg}]$.

Energía por tumbos, específica			
$g - \text{m/s}^2$	μ	$d - \text{m}$	Joules/kg
9,8	0,35	16,0	54,9
9,8	0,75	16,0	117,6

$$\frac{1}{2} \cdot v_{\text{postimp},2} = 100 \text{ a } 133 \text{ [J/kg]} - 24.5 \text{ [J/kg]} + 54.9 \text{ a } 117.6 \text{ [J/kg]} + 81 \text{ a } 99 \text{ [J/kg]}$$

E _{derr.}	E _{pot.}	E _{tumbos}	E _{defs.}	E _{postimp.}	V _{postimp.}	
					m/s	km/h
100,0	-24,5	54,9	81,4	211,7	20,6	74,1
133,3	-24,5	117,6	90,4	316,8	25,2	90,6
133,3	-24,5	117,6	99,5	325,9	25,5	91,9

Angulares postimpacto:

Para el colectivo y la Courier son prácticamente despreciables. En el caso de la F100 tenemos una rotación de aproximadamente 90°: Podemos suponer un isocronismo entre los movimientos de traslación y rotación, con lo que tenemos:

$$\frac{1}{2} \cdot v'_{F100} \cdot T = d = 17m$$

$$\frac{1}{2} \cdot w' \cdot T = \alpha = 90^\circ$$

luego

$$w' = \frac{\pi \cdot v'_{F100}}{2 \cdot d}$$

$$w'_{F100} = 0.92 \text{ a } 1.07 \text{ [rad/s]}.$$

Resumen:

	Velocidades lineales postimpacto				Angulares post. rad/d	
	Mínimas m/s	Mínimas km/h	Máximas m/s	Máximas km/h	Mínimas	Máximas
F100	10	36	12	42	0,92	1,07
Colectivo	8	29	14	50	----	
Courier	21	74	26	92	Despreciable	

Luego, con la ecuación I:

$$v_1 = (v_2 - v'_{c2} - w'_2 \cdot k_2) / m + w'_1 \cdot k_1 + v'_{c1}$$

Asignando valores a v_2 podremos calcular v_1 , para todas las combinaciones de datos posibles, restringiendo los resultados con las inecuaciones IV y V:

m	v ₁ '	w'	k	v ₂ '	v ₂	v ₁	Restricciones:	v ₁ -v ₁ '	v ₂ -v ₂ '
0,48	21,00	-0,92	3,60	-10,00	-14,00	19,56		-1,44	-4,00
0,48	21,00	-1,07	3,60	-10,00	-14,00	20,69	v1 mayor a v1'	-0,31	-4,00
0,48	21,00	-0,92	3,60	-12,00	-14,00	23,74	v2 mayor a v2'	2,74	-2,00
0,48	21,00	-1,07	3,60	-12,00	-14,00	24,86		3,86	-2,00
0,48	21,00	-0,92	3,60	-12,00	-15,00	21,65		0,65	-3,00
0,48	21,00	-1,07	3,60	-12,00	-15,00	22,78		1,78	-3,00
0,48	21,00	-0,92	3,60	-10,00	-16,00	15,39		-5,61	-6,00
0,48	21,00	-1,07	3,60	-10,00	-16,00	16,52		-4,48	-6,00
0,48	21,00	-0,92	3,60	-12,00	-16,00	19,56		-1,44	-4,00
0,48	21,00	-1,07	3,60	-12,00	-16,00	20,69		-0,31	-4,00
0,48	21,00	-0,92	3,60	-10,00	-18,00	11,22		-9,78	-8,00
0,48	21,00	-1,07	3,60	-10,00	-18,00	12,34		-8,66	-8,00
0,48	21,00	-0,92	3,60	-12,00	-18,00	15,39		-5,61	-6,00
0,48	21,00	-1,07	3,60	-12,00	-18,00	16,52		-4,48	-6,00
0,48	21,00	-0,92	3,60	-10,00	-20,00	7,04		-13,96	-10,00
0,48	21,00	-1,07	3,60	-10,00	-20,00	8,17		-12,83	-10,00
0,48	21,00	-0,92	3,60	-12,00	-20,00	11,22		-9,78	-8,00
0,48	21,00	-1,07	3,60	-12,00	-20,00	12,34		-8,66	-8,00
0,48	26,00	-0,92	3,60	-10,00	-14,00	24,56		-1,44	-4,00
0,48	26,00	-1,07	3,60	-10,00	-14,00	25,69		-0,31	-4,00
0,48	26,00	-0,92	3,60	-12,00	-14,00	28,74		2,74	-2,00
0,48	26,00	-1,07	3,60	-12,00	-14,00	29,86		3,86	-2,00
0,48	26,00	-0,92	3,60	-12,00	-15,00	26,65		0,65	-3,00
0,48	26,00	-1,07	3,60	-12,00	-15,00	27,78		1,78	-3,00
0,48	26,00	-0,92	3,60	-10,00	-16,00	20,39		-5,61	-6,00
0,48	26,00	-1,07	3,60	-10,00	-16,00	21,52		-4,48	-6,00
0,48	26,00	-0,92	3,60	-12,00	-16,00	24,56		-1,44	-4,00
0,48	26,00	-1,07	3,60	-12,00	-16,00	25,69		-0,31	-4,00
0,48	26,00	-0,92	3,60	-10,00	-18,00	16,22		-9,78	-8,00
0,48	26,00	-1,07	3,60	-10,00	-18,00	17,34		-8,66	-8,00
0,48	26,00	-0,92	3,60	-12,00	-18,00	20,39		-5,61	-6,00
0,48	26,00	-1,07	3,60	-12,00	-18,00	21,52		-4,48	-6,00
0,48	26,00	-0,92	3,60	-10,00	-20,00	12,04		-13,96	-10,00
0,48	26,00	-1,07	3,60	-10,00	-20,00	13,17		-12,83	-10,00
0,48	26,00	-0,92	3,60	-12,00	-20,00	16,22		-9,78	-8,00
0,48	26,00	-1,07	3,60	-12,00	-20,00	17,34		-8,66	-8,00

Por tanto, la velocidad pre impacto de la camioneta Ford Courier queda circunscripta a un rango posible de entre 22 y 30 m/s (78 a 108 km/h) y la de la Ford F100 a un rango entre 14 y 15 m/s (50 a 54km/h).

5 - Principales conclusiones

La calidad del relevamiento que realiza la autoridad policial de siniestro del tránsito es sumamente variable y es por ello que el análisis crítico de rastros por parte del investigador del siniestro cobra un papel fundamental.

La reconstrucción del hecho debe basarse, indefectiblemente, en los rastros físicos –como se puntualizara, analizados críticamente- tanto en función de su pertenencia al siniestro particular como en cuanto a las necesarias consecuencias físicas que cada interacción entre vehículos y/o participantes en el hecho debe tener y es precisamente esta coherencia la que valida el análisis. En este caso particular, las rotaciones experimentadas por los móviles que se explican por el roce lateral durante la primera colisión resultan el centro neurálgico del análisis.

Se pueden analizar las velocidades puestas en juego mediante un modelo matemático especialmente ajustado a las condiciones de borde en este tipo de interacciones.

Bibliografía:

García, Aníbal O., Accidentes de Tránsito - Investigación y Reconstrucción, Ed. Nueva Librería, 2011; p. 217 y ss.

McHenry, Raymond R., SAE 750893: A comparison of results obtained with diferente analytical techniques for reconstruction of highway accidents, 1975.

Warner, Ch., Smith, G., James, M., Germane, G., SAE 830612: Friction Applications in Accident Reconstruction, 1983.

Cenek, P.D., Jamieson, N.J., and McLarin, M.W., Frictional Characteristics of Roadside Grass Types, 2005

Bratten, Thomas A., Paper SAE 890859: Development of a tumble number for use in accident reconstruction,

Wood, Denis P., Paper SAE 920604: Collision speed estimation using a single normalized crush depth-impact speed characteristic, 1992

Wood, Denis P., Determination of speed from crush, en Thomas L. Bohan, Arthur C. Damask, editors: FORENSIC ACCIDENT INVESTIGATION: Motor Vehicles – Cap. 7, Law Publishers, Virginia, 1995 – 2004.

Manual del propietario, Ford Courier.

Ficha técnica Ford F100.