

VÍCTOR A. IRURETA

Ingeniero naval y mecánico. Perito en accidentología vial. Ex docente (UBA). Ex consejero y miembro (COPIN). Miembro de la Comisión de Peritos de la Junta Central de los Consejos Profesionales de Ingeniería. Miembro correspondiente en la República Argentina (INFORVIAL - ROU). Director del Instituto de Accidentología Vial.

Accidentología vial y pericia

Reconstrucción y análisis de accidentes. Rozamiento y frenado. Embestido - embistente. Puntos accidentológicos. Evaluación de maniobras.
Ejemplos y aplicaciones. Datos útiles.

*3^a edición
corregida, aumentada
y actualizada*



Ediciones La Rocca

BUENOS AIRES
2003

1^a edición: 1996
2^a edición: 1999

364.142 Irureta, Víctor A.
IRU Accidentología vial y pericia
3^a ed. Buenos Aires. La Rocca. 2003
240 ps. 23 x 16 cm
ISBN 987-517-057-7
I. Título. 1. Accidentes viales. Pericias

*A mis padres.
A mi esposa Liliana.
A mi hija Agustina.*

© 2003, Ediciones La Rocca S.R.L.
Talcahuano 467 (C1013AAI) Buenos Aires - Argentina
Tel.: (0054-11) 4382-8526
Fax: (0054-11) 4384-5774
e-mail: ed-larocca @ sinectis.com.ar
Queda hecho el depósito que previene la ley 11.723
Derechos reservados
Impreso en la Argentina

FOTOCOPIAR ES DELITO

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, así como tampoco su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y escrito de los titulares del *copyright*. La violación de este derecho hará pasible a los infractores de las penas previstas en la ley 11.723, ley 25.446, y el Código Penal de la Nación Argentina.

ÍNDICE GENERAL

PREFACIO A LA TERCERA EDICIÓN.....	19
PREFACIO A LA SEGUNDA EDICIÓN	21
PREFACIO A LA PRIMERA EDICIÓN	23

CONCEPTOS PRELIMINARES

1. Accidente de tránsito	25
2. Reconstrucción y análisis de accidentes	26

PRIMERA PARTE RECONSTRUCCIÓN DE ACCIDENTES

CAPÍTULO PRIMERO RECONSTRUCCIÓN

1. Reconstrucción de accidentes	31
2. Protagonistas del accidente	32

a)	Protagonista directo activo (PDA)	32
b)	Protagonista directo pasivo (PDP)	32
c)	Protagonista indirecto activo (PIA)	33
d)	Protagonista indirecto pasivo (PIP)	33
3.	Metodología de la reconstrucción	33
4.	Declaraciones y testimonios	34
5.	Elementos a considerar en la reconstrucción	36
a)	Ubicación témporo-espacial del accidente	36
1.	Macroubicación	36
I.	Aspecto espacial	36
II.	Aspecto temporal	36
2.	Ubicación	37
I.	Aspecto espacial	37
II.	Aspecto temporal	37
3.	Microubicación	37
I.	Aspecto espacial	37
II.	Aspecto temporal	41
b)	Itinerarios previstos por los protagonistas	41
c)	Trayectorias previas de los protagonistas	42
d)	Trayectorias posteriores	43
e)	Daños a las cosas	46
1.	Lámparas	51
2.	Cristales	51
f)	Posiciones finales de los protagonistas	51
g)	Lesiones a peatones	53
1.	Trayectorias posimpacto de peatones embestidos	53
2.	Descripción genérica de un embestimiento ..	53
3.	Trayectorias típicas de peatones embestidos	55
I.	Trayectoria I: proyección frontal (“forward projection”)	55
II.	Trayectoria II: arrollamiento (“run over”)	56

III.	Trayectoria III: montado sobre capó (“wrap trajectory”)	57
IV.	Trayectoria IV: vuelta por guardabarros (“fender vault”)	58
v.	Trayectoria V: vuelta por el techo (“roof vault”)	59
VI.	Trayectoria VI: salto mortal (“somersault”)	60
h)	Lesiones en personas transportadas	61
i)	Nota general sobre lesiones	62
j)	Características ambientales	62

CAPÍTULO II EMBESTIDO - EMBISTENTE

.....	67	
1.	Método de las dos películas	75
2.	Embistente virtual	76

CAPÍTULO III ROZAMIENTO Y FRENADO

.....	79	
1.	Adherencia y deslizamiento	79
2.	Rodadura	80
3.	Leyes de fricción	82
4.	Otros factores que inciden sobre el coeficiente de fricción	84
5.	Factor de desaceleración o frenado (“drag factor”) ..	87
6.	Otros coeficientes de fricción usuales	88
a)	Motos	88
b)	Automóviles	89
	Derrape	89

7. Ensayos de frenado	90
8. Hidroplaneo	91
Velocidad mínima de hidroplaneo	93
9. Huellas de frenado	96
10. Huellas de frenado y de derrape	99
Longitud efectiva de las huellas de derrape	101
11. Velocidad crítica	102
12. Frenado de pánico o "stop panic"	103
13. Eficiencia del frenado (discusión)	104

SEGUNDA PARTE
ANÁLISIS DE ACCIDENTES

CAPÍTULO PRIMERO
ANÁLISIS

.....	109
1. Riesgo y peligro de accidente	110
2. Evitabilidad física del accidente	110
3. Tiempo de percepción y reacción	111
a) Componentes del TPR	111
1. Primera etapa: detección (TP)	111
2. Segunda etapa: identificación	112
3. Tercera etapa: evaluación	113
4. Cuarta etapa: decisión	113
5. Quinta etapa: respuesta	114
b) Tiempo de percepción y reacción total (TPRT)	115
c) Cuantificación del TR (tiempo de reacción)	116
d) Influencia de drogas	119
1. Alcohol	119
2. Marihuana	119

3. Otras drogas	119
e) Influencia de la edad	119
f) Influencia del sexo	120
g) Influencia de la fatiga	120
h) Conclusiones	120
1. Reacción refleja (TR aproximado: 0,1 segundos; TRT: 0,60 segundos)	120
2. Reacción simple (TR aproximado: 0,5 segundos; TRT: 1 segundo)	121
3. Reacción compleja (TR aproximado: 1 segundo; TRT: 1,50 segundos)	121
4. Reacción discriminatoria (TR: más de dos segundos)	121
i) Intervalo entre maniobras consecutivas	121

CAPÍTULO II
PUNTOS ACCIDENTOLÓGICOS

.....	123
1. Punto clave o crítico	123
2. Punto de posible percepción (PPP)	124
3. Punto de posible detección (PPD)	125
4. Punto de percepción efectiva (PPE)	125
5. Demora y distancia de percepción	125
6. Punto de respuesta (PDR)	126
7. Punto de posible comienzo de acción evasiva (Pcae)	127
8. Punto de comienzo de acción evasiva (cae)	128
9. Acción evasiva (AE)	128
10. Punto de impacto (PDI)	129
a) Contacto inicial	129
b) Máximo contacto	129
c) Último contacto (o punto de desenganche)	129
11. Punto de posición final (PDPF)	130
12. Punto sin solución (Pss)	131

CAPÍTULO III
ACCIDENTE FÍSICAMENTE EVITABLE

.....	133
1. Errores y demoras en la percepción	133
2. Errores y demoras en la reacción	134
3. Errores y demoras en la respuesta mecánica	136
4. Accidente físicamente inevitable	137

CAPÍTULO IV
EVALUACIÓN DE MANIOBRAS

.....	139
1. Área teórica de maniobras posibles	139
2. Determinación de los límites del área de maniobras posibles	140
3. Área real de maniobras posibles	141

TERCERA PARTE
APLICACIONES PRÁCTICAS
EN RECONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS
DE ACCIDENTES

CAPÍTULO PRIMERO
CINEMÁTICA. DINÁMICA

.....	147
-------	-----

1. Cinemática (estudio del movimiento)	147
a) Movimiento rectilíneo uniforme	147
b) Movimiento rectilíneo variado	148
c) Movimiento circular uniforme	151
d) Movimiento circular variado	152
2. Dinámica (estudio de las causas del movimiento)	153
a) Leyes fundamentales de la dinámica	153
— Primera ley de Newton (principio de inercia)	153
— Segunda ley de Newton (relación entre fuerza, masa y aceleración)	153
— Tercera ley de Newton (principio de acción y reacción)	154
b) Principio de conservación de la energía	155
c) Principio de las fuerzas vivas	159
d) Principio de conservación de la cantidad de movimiento	159
e) Impulso y cantidad de movimiento	160
f) Momento de la cantidad de movimiento	161
g) Momento de impulso	161
h) Principio del centro de masa o gravedad	162
i) Choque	162
1. Choque central	163
2. Choque excéntrico	165

CAPÍTULO II
DEFORMACIONES Y VELOCIDAD

1. Energía de deformación y determinación de la velocidad por deformaciones remanentes	167
2. Energía insumida por deformaciones en automóviles o "pick-ups"	170
3. Coeficientes aplicables	171
4. Deformaciones y velocidad en motos	176

CAPÍTULO III
EJEMPLOS Y APLICACIONES

1. Cálculo de la velocidad previa al inicio de una frenada, basado en la longitud de las huellas de deslizamiento	179
Frenado sobre superficies distintas	180
2. Cálculo de la velocidad inicial de un móvil cuando se conoce sólo la distancia total de detención (desde la percepción hasta la detención total)	181
3. Cálculo de la velocidad inicial de un móvil cuando se conoce sólo la distancia total de detención e interesa conocer la duración temporal de las maniobras	182
4. Resistencia al avance	184
5. Derrape. Velocidad crítica en curvas	185
6. Determinación del radio de curvatura	186
7. Determinación de distancia mínima a la que se debe iniciar una maniobra para esquivar un obstáculo	188
8. Cálculo de la distancia "D" a que debería haber empezado el frenado con desaceleración "a" un móvil que avanzaba con velocidad "V" para llegar a un punto, un lapso "t" más tarde de lo que lo hizo	190
9. Cálculo de la distancia "D" a que debería haber hecho el "reprise" con aceleración "a" un móvil que avanzaba con velocidad "V" constante, para llegar a un punto, un lapso "t" antes de lo que lo hizo	191
10. Cálculo de la distancia "D" a que debería haber hecho el "reprise" con aceleración "a" un móvil que avanzaba con velocidad "V" y frenó, para llegar a un punto, un lapso "t" antes de lo que lo hizo	192
11. Caída libre	193
12. Cálculo de la velocidad de proyección de una partícula o cuerpo, conocidas su altura inicial y la distan-	

cia entre el sitio donde llegó al piso y aquél desde donde fue proyectado (proyección o efecto misil)	194
13. Determinación de la velocidad de impacto en función de la distancia de proyección	195
14. Cálculo de la velocidad de embestimiento de un camión que portando un "container" impacta con éste en un puente bajo el cual circulaba	199
15. Vuelco	202
16. Cálculo de la velocidad y de la determinación del punto de impacto en función de las posiciones finales de dos objetos que sufrieron fenómenos físicos distintos	206
17. Ejemplo de reconstrucción de un accidente	209
18. Análisis de un accidente	219
a) Para el rodado II	220
b) Para el rodado I	227
19. Evitabilidad del accidente	228
20. Causas del accidente	230

CAPÍTULO IV
DATOS ÚTILES

1. Visibilidad	231
2. Niebla. Alcance de visibilidad	231
3. Frenado. Valores del coeficiente de fricción medio (neumáticos-piso)	232
a) Para automóviles	232
b) Para camiones	232
c) Para motocicletas	232
4. Frenado con máxima eficiencia	233
5. Disipación de energía cinética	233
6. Lapso que insume la aparición de huellas nítidas desde el frenado	233
7. Coeficientes friccionales para vuelco o choque	234

8. Coeficiente de restitución para automóviles	234
9. Deslizamiento de cuerpo humano	234
10. Tiempo de percepción y reacción: duración "standard" de las etapas del TPR	234
11. Duración de la respuesta de elementos mecánicos ..	235
12. Duración de los distintos tipos de reacción y tiempo de reacción total	235
13. Lapsos "standard" que insumen distintas actitudes	235
14. Intervalo entre maniobras evasivas consecutivas ...	235
15. Desvío lateral perceptible por rodado enfrentado	235
16. Velocidades de referencia	236
17. Ángulo crítico de proyección (fórmulas de Searle) ...	236
18. Relación entre la velocidad de embestimiento (VE) y la proyección de peatones (VP)	237
 BIBLIOGRAFÍA	239

PREFACIO A LA TERCERA EDICIÓN

Desde la redacción de la primera edición de este libro, hemos comprobado que la cuestión de embistente-embestido, dejada de lado por parecer obvia en ella, no lo es tanto.

Existen muchas confusiones y errores al respecto, por lo que parece atinado tratar el tema en esta edición, presentando además un método muy sencillo para su determinación, aun por legos.

También se hacen algunas precisiones sobre las huellas de derrape, y su utilización para establecer la velocidad, originadas en los trabajos de Luis Ance.

Asimismo se ha incorporado una discusión sobre el coeficiente de eficiencia de frenado, utilizado erróneamente, a nuestro juicio, por algunos investigadores, y motivo de frecuentes malentendidos.

Hemos ampliado el tópico sobre hidroplaneo e incluido métodos para el cálculo de la velocidad mínima para su producción.

Se ha clarificado el gráfico en el estudio del vuelco.

De igual modo hemos actualizado los coeficientes de rigidez requeridos para la determinación de la energía insumida por las deformaciones y, tratando de aumentar su utilidad, se han agrupado en función de la distancia entre ejes.

El agrupamiento anterior, por la diversidad de modelos testeados con los usuales en nuestro país, se prestaba a confusiones.

Se han reagrupado en dos clases, tanto las camionetas o pick ups, como las kombis o vans, y se han incorporado dos categorías de rodados multipropósito (camionetas deportivas u off roads).

Completando el cuadro, se agregaron los coeficientes de rigidez disponibles para camiones.

EL AUTOR
Buenos Aires, julio de 2003

PREFACIO A LA SEGUNDA EDICIÓN

Dando sustento a lo expresado en el último párrafo del prefacio a la primera edición de esta obra, cumplimos en esta segunda entrega —corregida y actualizada— en poner en manos de nuestros lectores las modificaciones a aquélla que nos han parecido más atinadas.

En tal sentido, al completar el análisis realizado, hemos tomado en consideración las sugerencias que en su momento nos hiciera llegar el licenciado Marcelo Gómez, de Resistencia, Chaco, con el objeto de ser incluidas en la segunda edición que hoy presentamos.

EL AUTOR
Buenos Aires, julio de 1999

PREFACIO A LA PRIMERA EDICIÓN

Aunque hay mucho escrito sobre accidentes viales y en diversos idiomas, desafortunadamente no hemos encontrado alguna suerte de manual que se acomode, desde el punto de vista técnico, al tratamiento judicial que en la República Argentina se da a la cuestión. Existen muchas obras que tratan el tema desde lo puramente jurídico, en tanto otras lo hacen desde y hacia la seguridad vial.

Las que más se acercan a la accidentología como disciplina técnica están dirigidas a la investigación de campo, en la inmediatez de los sucesos, es decir que hacen más hincapié en la recolección y preservación de datos, que en el análisis y reconstrucción mediata del accidente.

La obra que presentamos, dirigida tanto a jueces y abogados, como a ingenieros y peritos, fue pensada para comenzar a llenar este vacío.

La diversidad de profesionales a los que, esperamos, les será útil, nos lleva a presentar disculpas.

A los abogados, por cuanto, aunque se ha tratado de simplificar al máximo el formuleo científico, buena parte del mismo subsiste.

A los colegas ingenieros, debido a que, en el afán de dar accesibilidad al texto, se han reducido todo lo posible los tra-

tamientos matemáticos y teóricos (por ejemplo, se ha prescindido de plantear ecuaciones diferenciales, sólo se menciona el carácter vectorial de algunos parámetros y se enfatiza la prioridad de las operaciones matemáticas, mediante la agrupación redundante con paréntesis, corchetes y llaves), en el convencimiento de que nuestros pares habrán de reconocer los límites de utilidad de las simplificaciones presentadas.

Se dijo al inicio que con estas páginas se pretende comenzar a llenar el vacío existente respecto del tratamiento sistematizado de la accidentología, motivo por el cual recibiremos con agrado las sugerencias, correcciones, experiencias y críticas que se nos hagan llegar, en aras de mejorar futuras ediciones.

EL AUTOR
Buenos Aires, setiembre de 1996

CONCEPTOS PRELIMINARES

1. ACCIDENTE DE TRÁNSITO

Un accidente es un suceso (o encadenamiento de sucesos) inesperado, impremeditado, e indeseado, generalmente de consecuencias desagradables: lesiones a las personas y/o daños a las cosas.

En accidentes de tránsito, habitualmente el suceso es la coincidencia témporo-espacial de dos objetos y/o cuerpos.

Definido de esta manera, un accidente es una situación dinámica que implica un encadenamiento de circunstancias y sucesos que culminan en él.

Este encadenamiento no significa que esté predeterminada la ocurrencia inexorable del accidente, aunque sí que la repetición idéntica de todas las circunstancias y procesos producirá idénticos resultados.

Este razonamiento parece condenarnos a buscar las causas del accidente en el principio de los tiempos, lo cual afortunadamente es un sofisma, ya que la variación de alguna de las circunstancias o sucesos aludidos, en un entorno de inmediatez del accidente, lo habría modificado, e inclusive podría haberlo evitado.

Ello así, a los efectos de la reconstrucción o del análi-

sis del accidente, sólo es necesario estudiar un intervalo témporo-espacial acotado en el entorno del mismo.

Es decir, a los efectos accidentológicos, no es importante determinar si el conductor de un móvil accidentado retrasó el comienzo de su viaje (lo que hizo que estuviese en el sitio del accidente en el instante del mismo) por haber estado tomando unas copas, sino, si en instantes previos al accidente su aptitud para reaccionar adecuadamente estuvo afectada por el alcohol.

El entorno témporo-espacial del accidente está en primera instancia, y a los efectos de su análisis y reconstrucción, limitado: previamente por los instantes-sitios desde donde los protagonistas tuvieron la primera oportunidad de percibir el riesgo, y luego del accidente por los instantes-sitios donde se alcanzó la situación de reposo o estabilidad.

En un proceso ulterior puede ser necesario ampliar los límites; por ejemplo: hacia atrás, buscando fallas mecánicas o humanas previas, y hacia adelante, para saber si previo al registro de los indicios, éstos fueron modificados y de qué manera.

Como se ve, esta ampliación, de existir, será particular para cada caso, y estará dirigida a esclarecer o aportar elementos que tuvieron incidencia en el entorno definido primero.

2. RECONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE ACCIDENTES

La investigación de accidentes está compuesta por tres grandes cuestiones:

- a) Recolección y registro de datos.
- b) Reconstrucción.
- c) Análisis.

Como ya dijéramos, estas líneas pretenden adecuarse al tratamiento del accidente en sede judicial, por lo que la

recolección, que debe tener lugar inmediatamente después del accidente, ya ha debido ser realizada.

Por otro lado, existe buena bibliografía al respecto.

Esto hace que no tratemos las cuestiones referidas a la *recolección y registro de datos*, sin por ello menospreciarlas, ya que la mejor peritación sólo podrá acercarse a la verdad de lo sucedido tanto como se lo permitan los datos oportunamente recolectados y adecuadamente registrados.

Si bien la *reconstrucción* intenta determinar *a posteriori* cómo ocurrió un accidente, mientras que el *análisis* busca encontrar por qué ocurrió, y se basa en la reconstrucción, no debe perderse de vista que ambas cuestiones forman parte del mismo proceso de investigación, pudiendo retroalimentarse en un proceso iterativo.

Como cada parte de la investigación técnica del accidente utiliza herramientas particulares, se ha optado por tratarlas por separado para su mejor sistematización.

PRIMERA PARTE
RECONSTRUCCIÓN DE ACCIDENTES

CAPÍTULO PRIMERO RECONSTRUCCIÓN

1. RECONSTRUCCIÓN DE ACCIDENTES

Es la mejor o más probable explicación sobre cómo ocurrió un accidente, o ciertas partes del mismo.

Consiste en determinar, *a posteriori*, la o las posibles formas en que pudo haber acaecido un accidente, mediante la aplicación de las leyes de la física a los datos y hechos que del mismo se dispongan u obtengan.

Naturalmente, en este proceso retrospectivo, los elementos a considerar pueden aparecer (y generalmente ocurre así) mezclados, confusos, distorsionados, falseados, difusos, y pueden asimismo no tener vinculación con los hechos. De igual modo, elementos de juicio importantes no siempre se hallan disponibles.

Como vemos, y para usar una gastada analogía, se trata de armar un rompecabezas del que no conocemos el resultado, en el que pueden faltar piezas, haber otras que no correspondan al mismo, y aun algunas borrosas.

Afortunadamente, siendo un hecho físico, vienen en nuestra ayuda distintas disciplinas científicas que nos indi-

can cómo deben ser las relaciones entre las piezas del *puzzle*, lo que nos permite ubicar las correctas en su posición, desechar las que no correspondan, clarificar las borrosas y, a veces, suplantar las faltantes.

Evidentemente, esta interrelación de datos, hechos y fenómenos, será tanto más perfecta y cercana a la realidad, cuanto mayor sea la cantidad de elementos fidedignos de que se disponga.

En la reconstrucción de un accidente buscamos entonces encontrar, en su entorno témporo-espacial (en adelante entorno del accidente), cuál fue el comportamiento de los protagonistas, es decir, cuáles fueron sus posiciones, direcciones, orientaciones, velocidades y aceleraciones, en instantes previos, durante el accidente y posteriormente al mismo, desde donde el riesgo era percibible por primera vez, y hasta la estabilización final de los sucesos.

2. PROTAGONISTAS DEL ACCIDENTE

Definimos como protagonistas del accidente a todas las personas o cosas que intervienen en el mismo, directa o indirectamente, activa o pasivamente.

a) *Protagonista directo activo (PDA)*.— Es aquel que, por una acción propia (activo), es afectado por el accidente (directo).

b) *Protagonista directo pasivo (PDP)*.— Es quien resulta afectado por el accidente (directo), pese a que ningún acto suyo (salvo su presencia) contribuyese al accidente (pasivo).

c) *Protagonista indirecto activo (PIA)*.— Es el no afectado por el accidente (indirecto), aun cuando sus acciones influyeron en el mismo (activo).

d) *Protagonista indirecto pasivo (PIP)*.— Es el no afectado (indirecto), y cuyas acciones (salvo su presencia) no influyeron en el accidente.

Así, si un automovilista (A) encandila a otro (B), el que por este motivo está a punto de embestir a un tercero estacionado (C), y, por esquivarlo, embiste a un peatón que paseaba por la vereda (D), resulta:

(A) es *protagonista indirecto activo*, ya que si bien no resultó afectado (indirecto), su acción de encandilar influyó en los hechos (activo).

(B) es *protagonista directo activo*, ya que una acción suya (atropellar) lo convierte en activo, y como resultó afectado en algún grado es directo.

(C) es *protagonista indirecto pasivo*, puesto que, salvo su presencia, ninguna acción suya influyó en el accidente, es decir que es pasivo, y como no resultó directamente afectado, es indirecto.

(D) es *protagonista directo pasivo*, por cuanto, salvo su presencia en el sitio, sus actos no influyeron en el accidente, por lo que resulta pasivo, y como fue afectado por el mismo, aparece como protagonista directo.

3. METODOLOGÍA DE LA RECONSTRUCCIÓN

Una correcta reconstrucción debe explicar coherente y acabadamente todos los fenómenos y procesos que ocurrieron en el entorno témporo-espacial del accidente, interrela-

cionándolos de forma lógica y con arreglo a las leyes de la física.

Ningún dato o indicio debe quedar fuera de la reconstrucción, a menos que se constate que no pertenece al accidente, o que en ninguna cadena de sucesos razonable pueda tener cabida lógica.

A veces se puede reconstruir el accidente llanamente, partiendo de los datos; es lo que llamamos método directo; otras veces es necesario explorar distintas hipótesis, hasta encontrar alguna que explique los hechos y sea coherente con los datos e indicios, para lo cual puede llegar a ser necesario realizar maquetas o modelos de simulación matemática. Es el método indirecto.

Siempre se deben encontrar todas las formas posibles de ocurrencia que se verifiquen con los datos y restantes elementos, es decir, debe evitarse concluir la reconstrucción al encontrar la primera explicación plausible, debiendo continuarse hasta agotar las posibilidades razonables.

4. DECLARACIONES Y TESTIMONIOS

Una cuestión que merece una referencia previa es la consideración que el investigador de accidentes debe dar a los testimonios y declaraciones de protagonistas y testigos.

Dado que un accidente es esencialmente inesperado, y usualmente fugaz, las declaraciones de testigos y protagonistas, aun de buena fe, pueden no ser suficientemente correctas.

Aunque un testigo crea estar diciendo la verdad, en realidad está diciendo *su* verdad, ya que su versión necesariamente está determinada por su subjetividad (para no mencionar posibilidades de falseamiento, ocultación, y deformación voluntarias).

Así, por ejemplo, la percepción de la velocidad de un móvil es variable de una persona a otra, y aun para la misma

persona, puede variar con la edad o la atención que esté prestando (en general, para personas mayores un mismo automóvil *va más rápido* que para los jóvenes, y una persona sorprendida en su abstracción, puede considerar que un rodado se desplazaba más rápidamente de lo que en realidad lo hacía).

Incluso hay factores que distorsionan la percepción: difícilmente se considere, viéndolos aislados, que dos rodados de muy diferente porte circulan a la misma velocidad, aunque lo hagan; el escape libre o la apariencia deportiva de un coche pueden inducir la creencia en desplazamientos más veloces que los reales, y a la inversa, estados de obsolescencia del rodado pueden provocar subestimación de su velocidad real.

Determinadas condiciones (neumáticos nuevos en superficies lisas y secas) pueden provocar que los neumáticos *chillen* aun al girar una esquina a muy baja velocidad, lo que puede dar la impresión de un giro a gran velocidad.

Análogas dificultades se presentan ante la apreciación de distancias, siendo las mismas poco confiables si no se basan en referencias físicas, y aun así, salvo en ensilaciones, el paralaje puede provocar errores significativos.

Como se ve, un testigo puede estar mintiendo sin saberlo, y no deben descartarse declaraciones *adecuadas*, ya sea para minimizar la propia responsabilidad, en el caso de los protagonistas, o por simpatías e intereses de los testigos.

Por lo dicho surge que las declaraciones y testimonios no deben ser considerados determinantes en una primera instancia de la investigación accidentológica.

Sin embargo, desecharlos definitivamente *a priori*, puede privar al investigador de datos interesantes o útiles, motivo por el cual, a nuestro juicio, debe ubicárselos en el contexto corroborativo de los elementos objetivos, en una etapa ulterior de la investigación. Así, entendemos que un informe accidentológico serio, jamás se basa exclusivamente en dichos no corroborados por elementos físicos.

La evaluación genérica de los testimonios debe ser realizada sólo por los jueces; lo único que le cabe al perito es evaluar las implicaciones técnicas de los dichos, analizando la factibilidad física y contrastándola con los elementos objetivos.

En alguna oportunidad, se nos ha presentado el caso en que todas las declaraciones de los protagonistas y supuestos testigos contradecían la evidencia física recolectada por la policía.

En ese caso se optó por basar el informe sólo en la evidencia física y alertar al juez sobre la contradicción mencionada.

5. ELEMENTOS A CONSIDERAR EN LA RECONSTRUCCIÓN

Para reconstruir un accidente es necesario tener en cuenta una serie de elementos, los que adecuadamente interpretados nos brindarán información de suma utilidad; los principales son los que se comentan a continuación:

a) *Ubicación temporo-espacial del accidente.*— Involucra tres aspectos que conviene tratar por separado: macroubicación; ubicación; microubicación.

1. *Macroubicación.* I. *Aspecto espacial:* Determina la región donde ocurrió el accidente, lo cual puede ser de suma importancia; por ejemplo, puede ser urbana o rural, ya que muchas reglamentaciones hacen distinción entre ambas.

También podrá tener importancia el hecho de ser una región quebrada o llana, o posibilidad de fatiga, no descartable en zonas rurales.

II. *Aspecto temporal:* La época del año puede determinar factores ambientales e inclusive humanos, influyen-

tes; por ejemplo, la visibilidad en un cruce puede estar disminuida por exuberancia de los vegetales en primavera-verano, con respecto a la época invernal.

La macroubicación se obtiene de la información general del hecho.

2. *Ubicación.* I. *Aspecto espacial:* Es la determinación del escenario de los sucesos y brinda información muy útil: tipo de piso (coeficiente de rozamiento, estado, baches, etc.); pendientes; obstáculos a la visibilidad; trazado del camino (recta, curva, puente, desvío, paso a nivel, cruce, etc.); tipo y características de las banquinas, etcétera.

II. *Aspecto temporal:* Se refiere a la hora y al día en que ocurrió el accidente, y puede resultar de significativa importancia; por ejemplo, determina si era de noche o de día, la posibilidad de existencia de sombras que enmascaran un riesgo, posibles encandilamientos solares o por luces artificiales, etcétera.

Permite saber si en el entorno temporal del accidente llovía, o estaba mojado el piso, o había niebla, etcétera.

También la humedad del piso, variable con las horas, influye en el coeficiente de fricción, lo que modifica las distancias de frenado.

La ubicación también la obtenemos de la información general del accidente, pero se completa y perfecciona sólo tras la inspección del sitio, con confección de planos y/o tomas fotográficas adecuadas.

3. *Microubicación.* I. *Aspecto espacial:* Es la determinación más precisa posible del PDI (*punto de impacto*), o suceso crucial. En el capítulo *análisis de accidentes* (Segunda Parte) abundaremos sobre el tema.

Tal determinación se realiza en la reconstrucción, tanto directamente de los indicios, como de cálculos a partir de otros, según veremos a continuación:

— Al chocar un rodado con otro objeto sólido, por la conmoción estructural de su carrocería se desprenden los lodos y suciedades que, en mayor o menor grado, todos llevan adheridos en las zonas bajas de la misma.

Tales lodos, si están secos se depositan como polvos (o como barros, si están mojados) en las cercanías de donde ocurrió el impacto.

Si la velocidad es baja la ubicación de estos polvos determina con mucha exactitud el PDI.

A altas velocidades, estos residuos pueden avanzar bastante desde donde se desprendieron hasta donde finalmente se depositaron, por lo cual habrá de calcularse ese avance mediante las fórmulas de caída libre o de Searle, ya que cuando la precisión en la posición del PDI es importante, dicho avance puede ser trascendente.

— Las huellas de frenado pueden determinar el *punto de impacto*.

- Un ensanchamiento de las huellas indica un aplastamiento de los neumáticos. Cuando se produce un choque, acaece una brusca traslación de pesos en el sentido del avance, debido a la violenta desaceleración consecuencia del impacto, lo que provoca que los neumáticos más adelantados resulten sobrecargados, aplástandose contra el piso, por lo que roza contra éste una mayor superficie.

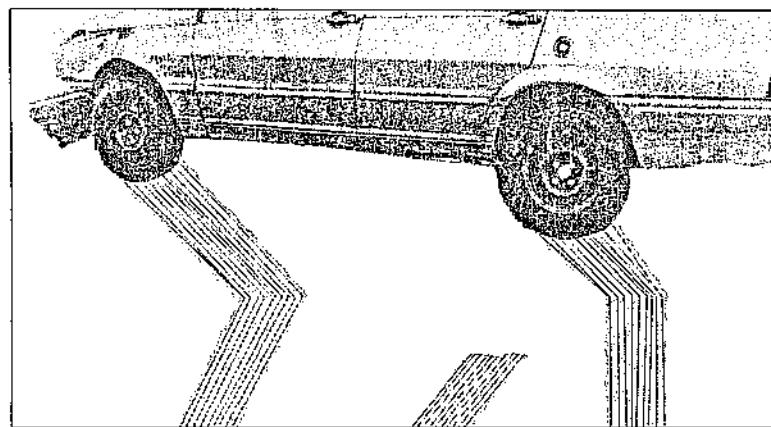
- Hay casos en los que la desaceleración es tal, que el efecto conjunto del aplastamiento de los neumáticos con el descenso de la suspensión delantera permite que la parte inferior de la carrocería golpee el piso, a veces marcándolo y dañándose.

- Un cambio brusco en la dirección de las huellas de frenado suele indicar el PDI, ya que en esos casos de choque

excéntrico, el impacto provoca una cupla que hace girar el rodado.

Cuando, como veremos, un rodado se encuentra patinando o deslizando debido al bloqueo de sus ruedas, la acción de la dirección disminuye sensiblemente, por lo que es imposible que por ésta se logre un cambio brusco en la dirección de avance.

Los cambios en la dirección de huellas de frenado debidos al impacto pueden tener radios de curvatura inclusive menores al radio de giro mínimo del rodado.



- El corte súbito de las huellas de frenado puede indicar también el PDI. Cuando nada interrumpe el proceso de frenado las huellas del mismo van desvaneciéndose suavemente, de atrás hacia adelante.

Cuando dichas huellas se cortan bruscamente es debido a que los neumáticos dejaron de disipar la energía cinética en ese instante; esto puede deberse a que dicha energía ha sido absorbida por otra cosa, por ejemplo, un choque.

Esto no debe confundirse con las interrupciones que provocan las irregularidades del camino, en cuyo caso las solu-

ciones de continuidad son cortas y bruscas (menores a un metro), ni con lo que sucede cuando la huella se corta porque se han dejado de accionar los frenos, motivo por el cual en la parte final de la misma se presenta una zona de transición que, aunque pequeña, es apreciable.

Esto siempre habrá de analizarse en un marco corroborativo, pues la difusión de las huellas suele no ser registrada por quienes hacen la investigación de campo, recogiendo los datos.

Lo mismo sucede con las interrupciones en las huellas debido a que el conductor modula el freno (es decir lo presiona y lo suelta alternativamente), lo que provoca cortes en la huella, de longitud superior al metro, pero con zonas de difusión en los extremos.

— Análogamente a los polvos, los inicios de regueros de líquidos suelen indicar el PDI; en este caso, tanto más cerca del mismo, cuanto menor haya sido la velocidad posimpacto del rodado (habitualmente, los depósitos de los que manan los líquidos se rompen recién al producirse el impacto).

— También se puede ubicar el PDI considerando que, necesariamente, hubo de encontrarse en la intersección de las trayectorias pre y posimpacto de cada uno de los protagonistas directos.

— Un impacto implica la interacción de fuerzas, por lo que el PDI, forzosamente, ha de encontrarse sobre las rectas de acción de las fuerzas interactuantes, las que, a veces, provocan efectos útiles para su determinación.

— Indirectamente se puede determinar el PDI, mediante un proceso iterativo, utilizando dos métodos de cálculo independientes; por ejemplo: distancia de frenado y caída de cristales, conociendo las posiciones finales de éstos y del rodado (lo que no es inusual).

De esta manera, y tomando una velocidad de impacto arbitraria (V_o), se puede obtener la distancia entre el PDI (hasta el momento desconocido) y el lugar en que habrían caído los cristales, si el rodado circulaba a V_o , es decir, determinamos un PDI' con las fórmulas de caída libre o las de Searle.

Entre PDI' y la posición final del rodado tendremos entonces una distancia de frenado D', con la que podemos calcular una velocidad de impacto V' mediante las fórmulas de frenado, tal que, circulando a V' , al rodado le insumiera una distancia D' detenerse.

Luego, reemplazando V_o por V' , reiniciamos el proceso, y obtenemos D" y V", y lo continuamos hasta que entre V_n y V_{n-1} , la diferencia sea menor a la precisión requerida.

Si V_o es elegida criteriosamente el proceso converge rápidamente. Usualmente una precisión del 10% es suficiente.

II. *Aspecto temporal:* Consiste en determinar el instante de la ocurrencia del hecho. Como tal cosa no es posible, aunque suele ser necesario establecer cronologías de sucesos, con precisión menor al segundo, en general se recurre a asignar el instante *cero* al impacto, mientras que a los sucesos previos se les asignan tiempos negativos, y a los posteriores, tiempos positivos. En el capítulo sobre *análisis de accidentes* (Segunda Parte) abundaremos al respecto.

b) *Itinerarios previstos por los protagonistas.*— Siempre es necesario conocer desde dónde provenían y hacia dónde se dirigían los protagonistas, para saber cómo preveían hacerlo, es decir, sus características de circulación.

En circulación correcta y normal los protagonistas siguen trayectorias paralelas al eje del camino, en tramos rectos y en tramos describiendo curvas suaves, con velocidad constante y/o aceleraciones o desaceleraciones leves, todo lo cual puede alterarse ante la aparición de obstáculos, o debido a errores en la conducción.

La utilidad de los itinerarios previstos es, como en el caso de la macrubicación, permitir una primera aproximación al estudio de los hechos, ya que brinda pautas sobre las acciones que hubieran llevado a cabo los protagonistas si no hubiese habido interferencias en su circulación (seguir, detenerse, girar, etcétera).

Comúnmente son datos que se obtienen de la información general del accidente, aunque deben corroborarse con la evidencia física.

Ocasionalmente ocurre que, al menos parte de los itinerarios, deba inferirse de la evidencia, ya que la información general puede ser incompleta, entre otras causas, por fallecimiento de algún protagonista.

c) *Trayectorias previas de los protagonistas.*— Son las trayectorias efectivamente descriptas por los protagonistas antes del accidente, en el entorno de estudio del mismo.

Su utilidad es realmente trascendente, como veremos en el capítulo sobre *análisis de accidentes* (Segunda Parte).

Las trayectorias previas se determinan por medio de la *reconstrucción*, a partir de los indicios:

— Una primera forma de hacerlo es a través de las huellas de frenado, cuya traza indica la dirección de quien la dejó, y sus desviaciones, si bruscas, pueden indicar la dirección de fuerzas incidentes externas a quien pertenecen.

— En algunos casos se cuenta con arañazos dejados en el piso por partes duras de los protagonistas (llantas, por ejemplo), que indican la dirección que llevaba esa parte en el momento de producir la marca. Si no hay elementos que permitan presumir la existencia de giros o rotaciones, será ésa la dirección del móvil en dicho instante.

— Otra forma de reconstruir las trayectorias previas es

a partir de las deformaciones permanentes en los protagonistas directos del accidente.

Los daños dan una idea bastante acabada de la dirección y el sentido de las fuerzas que los produjeron, especialmente los sufridos por las zonas más fuertes y rígidas de cada estructura, ya que éstas resultan menos afectadas por las deformaciones inducidas en otras direcciones.

Considerando el principio de acción y reacción, que más adelante explicaremos, la recta de acción de la fuerza que produjo una impronta en un protagonista debe ser coincidente con la de la fuerza que produjo la impronta en el otro protagonista, lo cual nos permite determinar las posiciones relativas de ambos al instante del choque.

El ángulo que forman las respectivas direcciones de avance es llamado *ángulo de incidencia*.

— Ubicados los protagonistas en el PDI, con sus posiciones relativas definidas por el ángulo de incidencia, quedarán determinadas las trayectorias previas inmediatamente anteriores al impacto si se conoce algún otro punto de cualesquiera de ellas. De lo contrario, habrá infinitas posibilidades de combinaciones de trayectorias previas que, manteniendo el mismo ángulo de incidencia, podrían haber acaecido.

— Las trayectorias posteriores también ayudan a determinar las previas, o al menos permiten descartar muchas opciones, por ser de imposible ocurrencia física, ya que si bien las analizamos por separado, ambas trayectorias pre y posimpacto, son parte de un mismo fenómeno físico continuo.

d) *Trayectorias posteriores.*— Son las efectivamente descriptas por los protagonistas luego del impacto.

Se determinan a través de los indicios y las posiciones finales de los protagonistas.

Como las trayectorias posteriores ocurren luego de haber interactuado las fuerzas de la colisión, ergo, haberse producido los daños, suelen quedar rezagos entre el punto de impacto y el de posición final de cada protagonista.

Estos rezagos son útiles a los efectos de determinar las trayectorias posteriores, y a veces para ayudar a determinar las previas, así como la velocidad de impacto.

Estos indicios pueden ser:

- Huellas de frenado, o bloqueo de algún neumático.
- Arañazos o marcas en el piso dejadas por partes duras de los protagonistas, frecuentemente por haberse dañado en el impacto.
- Partes de carrocería o cargas desprendidas en el impacto.
- Regueros líquidos, los cuales dan una buena idea de la dirección de aquel móvil del que manaban.
- En todos los residuos fluidos cabe la posibilidad de escurreimientos, debido a pendientes locales, por lo que además de tener en cuenta su forma y ubicación deberá atenderse a la eventual necesidad de hacer correcciones por este motivo.
- La industria automotriz utiliza tres tipos de cristales (inclusive en un mismo auto):

Vidrio común: se usa frecuentemente en las ópticas o faros delanteros.

Cristal templado: de uso general en ventanillas y en muchos parabrisas y lunetas. Se rompe en pequeños trozos, asemejando sal gruesa.

Cristal de seguridad o tipo "sandwich": son dos capas de cristal laminado adheridas a una capa de polímero transparente y muy resistente.

Muchos parabrisas son de este material, el cual es de uso obligatorio en algunos países, ya que al astillarse no se desprende con facilidad. Se rompe en trozos grandes.

- Los restos de vidrio tienen comportamiento diferente, según cuál sea el origen de la rotura. Si se rompen por un impacto directo sobre sí mismos tienden a caer en forma gradual, por lo que, de alguna manera, van indicando la trayectoria recorrida desde su rotura.
- Si se rompen como consecuencia de una deformación estructural (compresión coplanar), los templados actúan casi como explotando, dispersándose mucho, pero con una suerte de dirección media, que sirve a los efectos de determinar la que llevaba el móvil al estallarle el, por ejemplo, parabrisas.
- Los cristales de seguridad, si son expulsados por una deformación estructural, permanecen sustancialmente unidos, de modo que también pueden dar idea del movimiento del rodado en el momento de la rotura, sobre todo vinculando su posición final con algún otro punto de su trayectoria.

— Mal que nos pese, a veces son indicios útiles los restos de las víctimas, tales como sangre (que en forma de charcos, suele indicar el sitio de su posición final; como regueros, indica su dirección posimpacto, y como manchas pequeñas asociadas con trozos de epidermis o pelo, o bien residuos de ropa, puede indicar sitios donde golpeó la víctima).

— Los cuerpos proyectados por un embestimiento se

deslizan y ruedan (poco) entre el punto en el que golpean contra el piso y aquel donde finalmente yacen (posición final), por lo que suele quedar esa zona como *barriendo* por ellos. Tal *barriendo* indica la dirección del movimiento del cuerpo al recorrer dicha zona.

e) *Daños a las cosas.*— Al referirnos a los elementos anteriores de la reconstrucción, ya hemos hecho referencia a muchas cosas que, por estar dañadas de determinada manera, representan indicios útiles para cada uno de ellos; acá abundaremos específicamente en la cuestión.

En estas páginas denominamos *punto* a la ubicación *témporo-espacial* de un suceso, y *parte* a la zona o zonas de los protagonistas a las que se hace referencia (parte frontal; parte trasera, etcétera).

Los daños que sufren las cosas, correctamente interpretados, dan buena idea de las direcciones de los esfuerzos que solicitaron a los materiales hasta dañarlos (deformaciones, roturas, cambios de posición).

La interpretación debe ser realizada muy cuidadosamente por quien tenga acabados conocimientos sobre el comportamiento y resistencia de los materiales de que se trate, pues las direcciones buscadas (llamadas principales) suelen estar enmascaradas por deformaciones inducidas o indirectas.

Cuando una fuerza actúa sobre un material, éste se deforma en la misma dirección de la fuerza que origina la deformación, pero simultáneamente se deforma en direcciones perpendiculares a la principal.

Para visualizar esto, tómese una goma de mascar y comprímásela entre dos dedos; se notará que, a medida que se la comprime en una dirección, la goma se ensancha en las direcciones perpendiculares a la de compresión.

Con todos los materiales sucede lo mismo, aunque modificándose las características de respuesta para cada uno.

Entonces, cuando un esfuerzo provoca deformaciones en la dirección de su carga, también las provoca en dos direcciones perpendiculares a ella. Dicho de otro modo, para todo material es imposible reducir su longitud sin aumentar en ancho y en altura.

Éstas son las *deformaciones inducidas* por un esfuerzo, el que provoca *deformaciones principales* en su propia dirección.

Al conjunto de deformaciones provocadas por la acción directa de la carga (principales e inducidas) suele denominárselo *deformaciones directas*.

Además, es dable encontrar daños (deformaciones) que llamamos *indirectos*. Son los causados por la transferencia de esfuerzos (o por deformación) de las partes afectadas directamente a otras con las que se hallan vinculadas; fenómeno que se propaga reduciéndose, debido a la amortiguación que la elasticidad de los materiales provee, y a la disipación de energía que las deformaciones provocan.

Hay autores que también llaman daños indirectos a los producidos en el accidente, pero no como consecuencia directa del impacto sino del cambio de velocidad; por ejemplo, los ocurridos por proyección de objetos sueltos.

A la confusión que pueden provocar sobre la dirección principal los daños inducidos y los indirectos, aun cabe agregarle la que puede producir el *pandeo* de las estructuras.

El pandeo es un fenómeno complejo, vinculado a la resistencia de los materiales, a las características de cada estructura, y al tipo de cargas que lo solicitan.

Grosamente puede decirse que es un comportamiento de la estructura que provoca que su deformación sea distinta a la teóricamente previsible. Ejemplo de ello resulta ser una barra delgada sometida a compresión axial, la que sólo debería acortarse longitudinalmente y ensancharse; sin embargo, en la realidad observamos que se deforma arqueándose lateralmente (flexionándose).

Para comprender esto más fácilmente imaginemos que tenemos dos resortes cilíndricos, del mismo material y diámetro; uno tendrá una longitud del orden de su diámetro, en el otro la longitud será cincuenta veces su diámetro.

Si comprimimos el primero veremos que se acorta axialmente, pero cuando aplicamos el mismo proceso al segundo comprobamos que se arquea lateralmente.

Las estructuras esbeltas, en las que al menos una de sus dimensiones es ínfima en relación con las otras, son especialmente sensibles al pandeo. Tal es el caso de las chapas de los rodados.

Salvo la tracción pura, todos los tipos de solicitudes o combinaciones de las mismas pueden provocar pandeo, y es precisamente la tracción el único tipo de solicitud ausente en una colisión.

Como surge de los dos últimos párrafos, en casi toda colisión de magnitud se producirá pandeo de alguna de las partes comprometidas, lo que aumentará la dificultad de determinar la dirección de la carga principal.

Pese a todo el enmascaramiento aún es válida la idea de que las deformaciones brindan una buena idea de la dirección del impacto, a condición de que se lo tenga en cuenta y se analice la cuestión concienzudamente.

A tal fin es conveniente resaltar que cuanto más sólidas y rígidas sean las estructuras dañadas, con tanta más seguridad podrán indicar la dirección de la carga que las deformó.

Ejes, parrillas de suspensión, columnas de dirección, llantas, chasis, etc., son, a estos fines, mucho más precisos que los paneles de chapa, especialmente ante grandes daños con deformaciones de magnitud.

De todos modos, aun las deformaciones puramente de chapa, analizadas globalmente pueden indicar la dirección del esfuerzo, para lo cual debe tratarse de reconstruir la trayectoria de cada parte desde su posición original hasta su ubicación final. No debe perderse de vista que impactos distintos pueden provocar improntas similares.

Por ejemplo, un rodado que choca frontal y excéntricamente con otro (parte de contacto inicial guardabarros delantero izquierdo) puede mostrar una impronta similar a la que le habría producido un embestimiento en la misma parte pero a 45°.

Sin embargo, la *trayectoria de*, por ejemplo, el triángulo del guardabarros necesariamente habrá de ser distinta; en el primer caso habrá retrocedido, pero manteniendo aproximadamente su misma posición transversal, mientras que en el segundo caso, además de retroceder algo, se habrá acercado sensiblemente al eje longitudinal del coche.

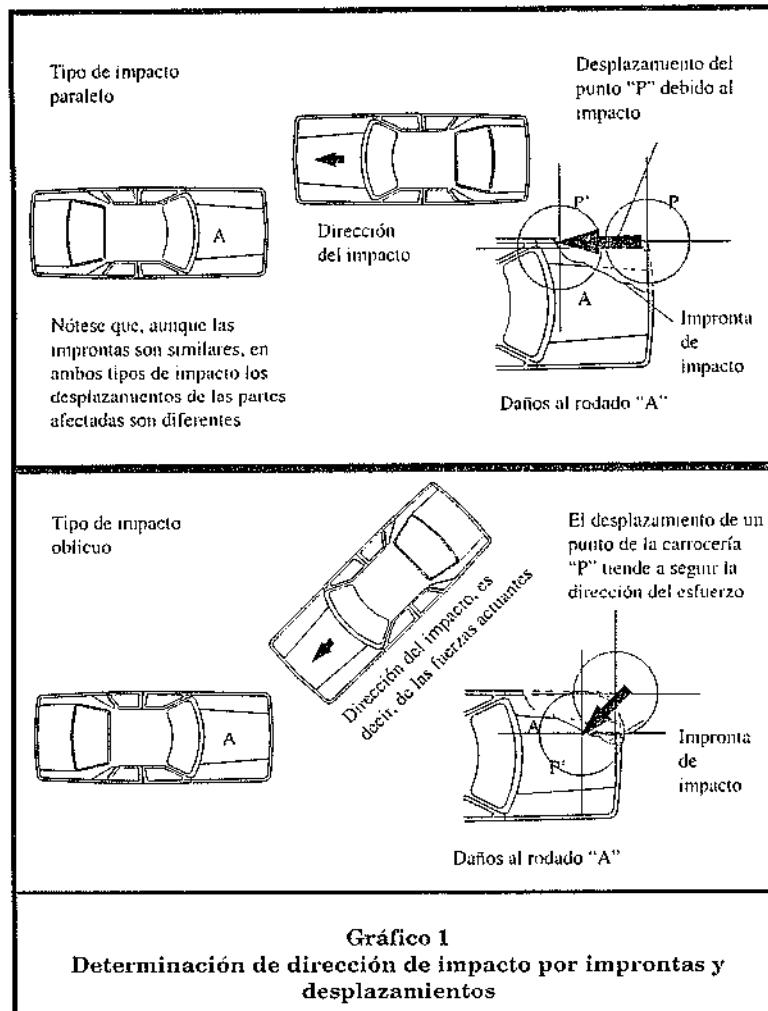
(ver gráfico 1, p. 50)

Otra cuestión que deberá considerarse es la referida a la elasticidad de los materiales; como hemos visto, todo material sometido a una carga se deforma del modo que le impone la misma.

Ahora bien, hasta que la carga alcanza un cierto límite, al retirarse la misma el cuerpo recupera su forma y dimensiones previas, pero cuando dicha carga ha superado el límite en cuestión, el cuerpo, al ser descargado quedará con deformaciones remanentes.

El valor de la carga que hace que el material deje de comportarse elásticamente es el llamado *límite elástico*, y depende de cada material específico.

Debe destacarse que el hecho de superarse el límite elástico no implica necesariamente que el material, una vez descargado, presente las deformaciones máximas que sufrió. Por el contrario, normalmente tiende a recuperar sus formas y dimensiones originales, aunque por haberse superado su período elástico presente finalmente deformaciones permanentes. Esto debe ser tenido en cuenta en la reconstrucción, ya que frecuentemente, mencionamos que las improntas de daños directos deben encastrar, lo cual es cierto, pero el encastramiento perfecto sólo ocurre en el momento de deformaciones



máximas, las que se reducen apenas separados los protagonistas. Dicho de otro modo, al observar cualquier daño podemos tener la certeza de que las deformaciones habidas durante el impacto fueron mayores a las remanentes que estamos viendo.

Se ha comprobado que las deformaciones máximas habidas en un choque (*dynamic crush*) son de entre un 10 y un 20% mayores a las deformaciones remanentes (*static crush*).

1. *Lámparas.* Otro indicio puede provenir de los filamentos de los faros de un rodado siniestrado, en casos en que se discuta si llevaba o no, luces encendidas. Si el bulbo se ha roto cuando las luces estaban encendidas, el filamento generalmente aparece recubierto de un óxido blanquecino, que se puede identificar a simple vista.

Si el bulbo no se ha roto, pero el filamento sí, deberá utilizarse una lupa potente o microscopio para analizar la rotura, ya que, si en su extremo aparece una formación globular de su mismo material fundido, estaremos ante un filamento roto mientras estaba encendido.

2. *Cristales.* Ya hemos mencionado algo sobre rotura de cristales, aunque cabe agregar que en los de seguridad, cuando la rotura se debe a un impacto directo sobre el mismo, presenta un aspecto radial, con centro en la zona de impacto, formando una figura similar a una tela de araña; en cambio, si la rotura es debida a una deformación estructural, presenta líneas paralelas.

Lo anterior puede ser útil a la hora de determinar si un peatón embestido golpeó directamente un parabrisas o éste se rompió porque el cuerpo cayó sobre el techo del rodado.

f) *Posiciones finales de los protagonistas.*— Definimos como posición final de cada protagonista aquella en la cual se estabiliza su situación dinámica.

Generalmente las posiciones finales son de reposo (sitio donde permanecería indefinidamente si no actuaran fuerzas exteriores).

A veces la situación dinámica se estabiliza para alguno de los protagonistas cuando recupera el control de sus acciones.

Por ejemplo, cuando un automovilista, luego de atropellar a un peatón, continúa su marcha sin detenerse, es obvio que, en algún punto posterior al de impacto, ha logrado dominar su rodado.

En este caso estamos ante una estabilización dinámica en ese punto, el que deberá considerarse como punto de posición final, a los efectos accidentológicos.

Cuando la posición final obedece a una estabilización estática puede quedar registrada por quienes hacen la investigación de campo (instrucción policial), pero siempre habrá de ser necesario verificar si los protagonistas han sido movidos desde su verdadera posición final hasta aquella en la cual son registrados.

Muchas veces es imprescindible realizar tales movimientos para no comprometer la seguridad de los protagonistas o de terceros, o simplemente para permitir la fluida circulación.

Cuando se sospecha que ha habido modificaciones en las posiciones finales, o cuando las mismas no están debidamente registradas, debemos recurrir a la interpretación de indicios.

Por ejemplo:

— La posición final de un automóvil suele estar al fin de sus huellas de frenado, si éstas se prolongan luego del punto de impacto (debe considerarse para esto la zona de difusión de las huellas).

— Como ya hemos dicho, la presencia de charcos de fluidos derramados por un rodado suele indicar su posición de reposo.

— Análogamente sucede con la sangre y la situación de reposo de un cuerpo humano (eventualmente animales).

— A veces, la posición de reposo coincide con un choque secundario, por ejemplo, contra el cordón de la vereda, el que puede presentar secuelas del impacto.

g) *Lesiones a peatones.*— 1. *Trayectorias posimpacto de peatones embestidos.* El comportamiento de un cuerpo humano embestido por un rodado está influido por una serie de factores que se interrelacionan, como características de peso y talla, posición al momento del impacto, velocidades de desplazamiento (tanto del peatón, como del agente embestidor), forma del frente de este último, y si estaba o no frenando en el instante de contactar el cuerpo.

2. *Descripción genérica de un embestimiento.* El peatón es golpeado por el extremo frontal del rodado, generalmente el paragolpes, en sus piernas (*primer contacto*).

La parte del cuerpo tocada es acelerada, casi instantáneamente, hasta alcanzar la velocidad del rodado embistente.

Cuando el peatón se encuentra apoyado por su peso contra el piso, el rozamiento que existe entre el piso y su calzado se opone a tal aceleración.

Por otro lado, la inercia propia del cuerpo, que actúa en su centro de gravedad, tiende también a oponerse al movimiento.

Esto provoca que, generalmente, las piernas se arqueen tomando la forma del frente del vehículo, y que la parte superior del cuerpo, que tendió a permanecer en reposo, sea alcanzada por la parte más alta del frente del rodado, por lo que resulta acelerada hasta alcanzar la velocidad del mismo (*segundo contacto*). El cuerpo está ahora animado por un mo-

movimiento rototraslatorio impuesto por los sucesivos contactos que aceleraron partes del mismo.

El *primer contacto* le confirió al cuerpo una velocidad lineal "V" de su centro de gravedad, y una velocidad angular "ω" de giro alrededor de su CG dada por:

$$\omega = V/d$$

donde "V" es la velocidad debida al impacto, y "d" la distancia entre el punto del cuerpo afectado por este primer contacto y su centro de gravedad.

El *segundo contacto* acelera una parte del cuerpo ubicada por encima del punto del *primer contacto*, y su efecto será distinto en función de su posición relativa al centro de gravedad del cuerpo.

Cuando este *segundo contacto* se produce a una altura inferior a la del centro de gravedad del cuerpo —el que se encuentra aproximadamente a unos cinco centímetros por debajo del ombligo—, el punto alcanzado, que tenía una velocidad tangencial "V₂" (menor que "V", por ser "d₂" menor que "d", dada por:

$$V_2 = \omega \cdot d_2$$

en la que "d₂" es la distancia a su centro de gravedad), es acelerado hasta tener a "V" como velocidad tangencial, por lo que se incrementa la velocidad angular a "ω₁", tal que:

$$\omega_1 = V/d_2 \text{ (trayectorias III a VI)}$$

Cuando el segundo contacto tiene lugar por encima del centro de gravedad (CG), el razonamiento es análogo, pero como el cuerpo está animado de una rotación alrededor de ese punto, las partes del mismo que estén por encima del CG tendrán velocidades tangenciales, debidas al primer contacto, opuestas a la velocidad de embestimiento, pero en el segundo contacto toman su mismo sentido, obviamente tras una gran aceleración local (*trayectorias I y II*).

3. *Trayectorias típicas de peatones embestidos.* I. *Trayectoria I: proyección frontal ("forward projection")*: Ya hemos visto que como consecuencia del contacto con el vehículo embistente, el cuerpo del peatón adquiere un movimiento rototraslatorio compuesto por una velocidad lineal "V", y una rotación alrededor de su centro de gravedad, "ω".

El punto del cuerpo sometido al segundo contacto será acelerado en la dirección del impacto; si este punto se encuentra por encima de su centro de gravedad la consecuencia de este segundo contacto será cambiar la dirección de la rotación, impulsando la parte superior del mismo en la dirección del embistente, es decir que tenderá a adelantarse y a caer hacia el piso por delante del rodado.

Si a partir del instante del impacto, el rodado disminuye su velocidad lo suficiente como para detenerse sin volver a contactar con el cuerpo, estaremos en lo que se denomina proyección frontal, o *forward projection*.

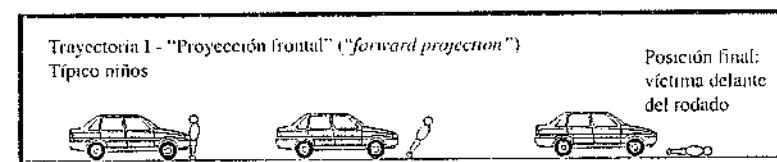


Gráfico 2

Gráficos 2-3: embestimiento por encima del CG

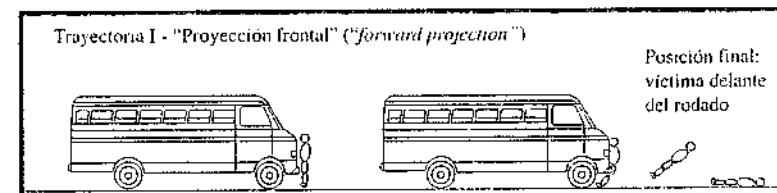


Gráfico 3

Nótese que las lesiones producidas por los impactos directos estarán en las zonas de los contactos primero y segundo, es decir, piernas y parte alta del torso y/o cabeza, zona donde el impacto es más violento.

Pueden aparecer daños en los miembros superiores, y lesiones debidas al golpe contra el piso en las zonas altas del cuerpo.

II. *Trayectoria II: arrollamiento ("run over")*: Existe arrollamiento en el caso en que un vehículo pasa por encima de una persona (o de un animal); sucede asimismo cuando una persona se encuentra en la trayectoria del vehículo.

Además de otras causas independientes, el yacer en el itinerario de un rodado hasta ser arrollado por él, puede deberse a una proyección frontal, en la cual el vehículo no se detiene antes de que lo haga el peatón proyectado por el impacto previo, motivo por el cual lo arrolla.

A las lesiones mencionadas para la trayectoria anterior deben agregárseles las correspondientes a la atricción.

Estas trayectorias ocurren cuando camiones, *kombis*, *pick-ups* o colectivos (en general vehículos grandes), atropellan a personas de cualquier tamaño, o bien debido al embestimiento de niños por automóviles estándar. Ello se debe a las posiciones relativas entre el punto del segundo contacto y el centro de gravedad de las personas involucradas.

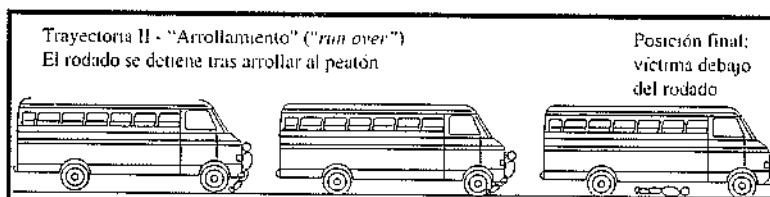


Gráfico 4

Gráficos 4-5: embestimiento por encima del CG

Trayectoria II - "Arrollamiento" ("run over")
Típico niños. El rodado se detiene tras arrollar al peatón

Posición final:
victima detrás
del rodado



Gráfico 5

III. *Trayectoria III: montado sobre capó ("wrap trajectory")*: Cuando el segundo contacto ocurre en un punto por encima del inicial, pero por debajo del centro de gravedad de la persona, hemos visto que la rotación que le había impuesto el primer contacto se incrementa en magnitud.

Si el rodado no se detiene o disminuye sensiblemente su velocidad inmediatamente tras el segundo impacto, el cuerpo pivotará en la zona de contacto (típicamente, el extremo delantero superior de la trompa del vehículo).

Como el sentido de la rotación hace que la parte superior del cuerpo se dirija en contra del movimiento del rodado, ésta girará hasta golpear contra la estructura del móvil.

Durante unos instantes, el cuerpo del peatón embestido adopta la forma de la trompa del automóvil, a la que parece envolver, de allí el nombre en inglés: *wrap trajectory*.

Como la cabeza del peatón es la parte más alejada del centro de giro, estará animada de la mayor velocidad relativa, por lo que su impacto con el coche será el más violento.

Luego del impacto de la parte superior del cuerpo, éste permanece *cargado* sobre el capó, hasta que se separa del coche por la desaceleración del mismo, siendo proyectado hacia adelante, o hasta que el móvil se detiene, si frena suavemente.

En general se acepta que, cuanto mayor es la velocidad, tanto más hacia atrás del rodado golpea la víctima del embestimiento, pero esto, por lo que sabemos, aún no ha podido cuantificarse, aunque se ha propuesto la utilización de una

medida, llamada *wraparound*, a tal fin. Ella surge de considerar la altura, desde el piso, del borde delantero del paragolpes del rodado, en su posición de embestimiento; más la distancia entre éste y el borde delantero del capó; más la distancia entre este punto y aquel donde golpeó la cabeza del peatón.

La diferencia entre el *wraparound* y la altura del peatón, ha sido propuesta como índice de la velocidad de embestimiento, sin que hasta el momento haya tenido éxito.

Frecuentemente aparecen lesiones importantes en piernas, caderas, torso y cabeza por contacto directo entre peatón y vehículo, además de las provocadas por el golpe contra el piso, si existiera.



Gráfico 6

Gráfico 6: embestimiento por debajo del CG

IV. *Trayectoria IV: vuelta por guardabarros ("fender vault")*: Es un caso especial de la anterior, en la que el peatón, por ser embestido con una parte del frente del rodado cercano a su borde lateral y/o por estar animado el peatón de considerable velocidad propia, describe un trayectoria tal que, oblicuamente, lo lleva a pasar sobre el capó y el guardabarros, cayendo al suelo al costado del rodado.

No debe olvidarse que todo movimiento resultante de la combinación de otros, puede analizarse mediante el estudio de cada uno de sus componentes, y que en casos como el considerado, las fuerzas y los impulsos, así como los movimientos que generan, pueden siempre descomponerse según la di-

rección de avance y otra perpendicular; las fuerzas y los impulsos aludidos no provocan efectos en direcciones que forman ángulos de 90° con su recta de acción, en lo que a la cinemática se refiere.

Por lo dicho, al ser embestido un peatón que, por ejemplo, cruza corriendo transversalmente al rodado, pese a ser impulsado hacia adelante por el golpe, continúa con la componente de desplazamiento transversal al vehículo que tenía en el momento del embestimiento, es decir que sigue moviéndose hacia el costado del móvil, aunque lo haga también hacia su frente debido al impacto.

Esto hará que el cuerpo tienda a quedar fuera de la zona *barrienda* por el rodado en su desplazamiento, salvo que fuera enganchado o que alguna fuerza contrarreste su inercia transversal.

Además de las lesiones similares a las del caso anterior, suelen ser importantes las producidas por el golpe contra el piso; frecuentemente la cabeza no aparece lesionada, ya que puede no golpearse, aunque en estos casos suelen ser de importancia las lesiones del tórax y el cuello.



Gráfico 7

Gráfico 7: embestimiento por debajo del CG

v. *Trayectoria V: vuelta por el techo ("roof vault")*: Cuando el vehículo embistente es muy perfilado y/o la velocidad del mismo muy elevada, puede ocurrir que tras los primeros contactos, el rodado avance lo suficiente antes de que el cuerpo descienda por caída, por lo que al hacerlo golpea contra el techo y/o planos traseros del automóvil.

Ocurre que, en determinadas circunstancias, el giro iniciado alrededor del centro de gravedad es tal, que las piernas inmediatamente siguen la rotación, elevándose, es decir que el cuerpo se comporta más rígidamente que en los casos anteriores.

Esto parece deberse a combinaciones especiales de velocidad y posiciones relativas de las zonas de primer y segundo contacto.

Existen registros de accidentes en los cuales la víctima ha caído directamente al piso por detrás del rodado.

Como en este tipo de accidentes el impacto de la cabeza —si es que ocurre— puede no ser la causa principal de la disipación de la energía cinética de rotación del cuerpo, con frecuencia se presentan en ella lesiones de menor intensidad que en las trayectorias anteriores.



Gráfico 8

Gráfico 8: embestimiento por debajo del CG

VI. *Trayectoria VI: salto mortal ("somersault")*: Si en circunstancias como las descriptas para la trayectoria anterior, es decir que provocan un comportamiento rígido del cuerpo, el rodado, en vez de meterse bajo el cuerpo, se detiene, el mismo completará su rotación, por lo que existirán grandes posibilidades de que golpee con su cabeza directamente contra el piso.

Este tipo de embestimiento presenta lesiones de importancia principalmente en cabeza y cuello, además de las de las piernas.

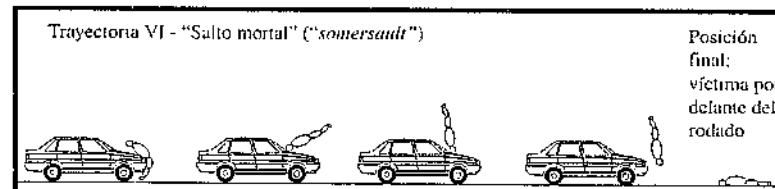


Gráfico 9

Gráfico 9: embestimiento por debajo del CG

Las cuatro últimas trayectorias mencionadas ocurren en embestimientos de personas cuyo centro de gravedad esté a una altura superior a la del punto del segundo contacto. En general adultos embestidos por automóviles de paseo.

Obviamente, las seis trayectorias típicas de peatones embestidos lo son a efectos descriptivos y de estudio, siendo frecuentes en la realidad las combinaciones de las mismas.

Estamos en conocimiento de la existencia de ciertas tablas que relacionan velocidades de embestimiento con las lesiones sufridas por peatones embestidos, pero analizando numerosos ensayos realizados con *dummies* y/o cadáveres hemos llegado a la conclusión de que tales tablas carecen del necesario rigor científico como para ser de utilidad en cuestiones judiciales.

h) *Lesiones en personas transportadas*.— En un choque, los ocupantes de un vehículo pueden sufrir lesiones debido a dos fenómenos, aunque el más frecuente es el de golpear contra partes del interior del *cockpit* debido a la inercia propia, ante la modificación de velocidad producida por el impacto.

Los cinturones de seguridad y las *air-bags* (bolsas de aire) reducen sensiblemente las posibilidades de lesiones atribuibles a la inercia.

El segundo fenómeno es debido a la deformación de la estructura del rodado, la que golpea y/o aprieta a los ocupantes.

Obviamente cuando se verifica esto, en realidad ha habido una combinación de ambos fenómenos

Las ecuaciones del movimiento de los ocupantes son diferenciales de segundo grado que caen fuera del alcance de estas páginas, y son necesarias en escasísimas oportunidades.

Valga resaltar que la dirección en la que se mueven las personas, debido a la inercia, es la que tenían al momento de producirse la modificación de la velocidad, y la violencia con que lo hacen es proporcional a dicha modificación.

i) *Nota general sobre lesiones.*— En general el ser humano sufre lesiones debidas al contacto directo y violento con objetos duros, por lo que tales lesiones suelen indicar la dirección relativa del impacto; por ejemplo, la pierna de un peatón embestido que presenta fractura de tibia o peroné, muy probablemente haya sido la que soportó el primer contacto estando apoyada.

Pero atención, ya que a veces se registran lesiones óseas en zonas relativamente alejadas de donde se recibiera el impacto; así suele ocurrir con los huesos del cráneo, los que pueden fracturarse en la zona opuesta al golpe, o con la parrilla costal, motivo por el cual la determinación de la dirección de la fuerza incidente en un cuerpo humano con base en las lesiones sufridas debe ser realizada únicamente por médicos avezados.

Las menciones realizadas lo han sido a modo ilustrativo y sólo para facilitar la interpretación de fenómenos correspondientes a otras disciplinas.

j) *Características ambientales.*— Ya hemos mencionado algunas en relación con la *ubicación* del accidente, pero su importancia merece un tratamiento específico.

Es frecuente oír hablar del *triángulo del accidente* cuyos vértices son *factor humano, factor ambiental, factor máqui-*

na, o variaciones de estos nombres; sin desconocer la utilidad del mismo, especialmente en problemas de seguridad vial, nos parece más conveniente, a los efectos de la reconstrucción y análisis del accidente, la organización presentada al inicio del capítulo, en la cual las condiciones ambientales son elementos a considerar.

Algunas características ambientales son relevantes en la reconstrucción del accidente, mientras que otras lo son para el análisis del mismo.

Entre las primeras encontramos las climatológicas, que afectan los comportamientos de los materiales; por ejemplo:

— El coeficiente de rozamiento tiende a disminuir con la temperatura, y en superficies mojadas será menor que en la misma superficie seca; en general, será menor aun si sobre el piso existe una capa de hielo, etcétera.

— El tipo de piso, y su estado es otra cuestión importante para la reconstrucción.

— El frío fragiliza los materiales, modificando su comportamiento, especialmente ante cargas dinámicas como las que resultan de un choque, por lo que los daños a las cosas resultan variables con la temperatura (en 1993 un comité internacional de expertos atribuyó a este fenómeno el hundimiento del "Titanic").

Entre las que intervienen en el análisis del accidente encontramos todas las que afectan la visibilidad, tales como oscuridad, niebla, lluvia, encandilamientos, obstáculos a la visión, enmascaramientos, lomas, curvas, etcétera.

— La posibilidad de encandilamiento solar debe tenerse en cuenta, especialmente en las dos horas posteriores al amanecer, y en las dos previas a la puesta del sol. Se debe considerar atentamente la fecha, ya que, como es sabido, la

posición relativa del sol se modifica, no sólo con la hora, sino también con la fecha, para un mismo sitio.

Esta cuestión, que puede ser trascendente, debe analizarse verificando el posible encandilamiento a la hora del accidente (es decir, si el sol se presentaba dentro de la visual directa de algún protagonista, o su luminosidad pudo impedir la visualización de otro), mediante la comprobación en los días inmediatos al accidente, o empleando cálculos basados en datos de almanaques náuticos.

Cabe recordar que la posición relativa del sol se modifica grandemente durante el año, lo que puede distorsionar conclusiones si las observaciones no son realizadas en la inmediatez de los sucesos, o no se las corrige con los cálculos adecuados.

— Ya que han sido mencionados, conviene recordar que los almanaques náuticos son útiles para determinar el grado de oscuridad en los entornos de los amaneceres o anocheceres.

— Si el accidente ocurre cuando uno de los protagonistas recorre o ha recorrido hacia arriba una cuesta pronunciada, puede ser útil verificar la posible incidencia del deslumbramiento solar.

— Dado que luego de un encandilamiento el ojo humano tarda unos cinco segundos en recuperar su capacidad visual, esta posibilidad debe tenerse presente siempre que un accidente haya ocurrido de noche en camino de doble mano de circulación, sobre todo ante choques con objetos o cuerpos sin luz propia, o escasamente iluminados.

— Baker recomienda a los agentes de policía de tránsito de Estados Unidos presumir defecto visual de aquellas personas que, de noche, no puedan distinguir a sesenta metros un peatón vestido con ropas oscuras, ante fondo oscuro, iluminado sólo con las luces medias de un coche.

Los sesenta metros son una cifra netamente conservadora, motivada en la estricta legislación que penaliza el falso arresto en ese país. El valor usual mínimo en esas condiciones es de unos cien metros; tal es el resultado de las experiencias realizadas por la Universidad de Michigan, por Hull y otros.

El encandilamiento reduce esta distancia en un 20%.

Si bien es cierto que con los limpiaparabrisas funcionando correctamente, no hay diferencias significativas en la posibilidad de avistamiento entre una noche lluviosa y una de buen tiempo, la incidencia de factores ambientales es tal que, por ejemplo, con una tormenta suficientemente fuerte como para acumular setenta y cinco milímetros caídos en una hora, un peatón es visible recién a veinte metros (nocturnidad).

El elemento que más influye en la visibilidad es el contraste con el escenario, ya que es lo que determina la *conspicuidad* del objeto.

En accidentología definimos *conspicuidad* como la propiedad de un objeto que hace que se lo vea distintamente en cualquier zona del campo visual, sin tener que ser buscado.

Éste es el motivo por el cual es recomendable para los automovilistas y motociclistas circular con las luces medias encendidas, aun de día, y para los peatones y ciclistas usar ropa clara, o mejor, retroreflectante, o dispositivos luminosos.

En las mejores condiciones de iluminación diafanidad y contraste, un automóvil en ruta, de día, es visible a unos mil seiscientos metros aproximadamente; en condiciones usuales raramente es visible a más de ochocientos metros, pero si tiene sus luces encendidas es visible e identificable en cualquier condición a una distancia equivalente a la de las mejores condiciones.

— La niebla, obviamente, incide decisivamente en la visibilidad; de día, su alcance se reduce a los siguientes valores:

VISIBILIDAD CON NIEBLA DIURNA

- 500 a 1000 m, con niebla débil
- 200 a 500 m, con niebla moderada
- 50 a 200 m, con niebla moderada a fuerte
- 0 a 50 m, con niebla muy fuerte

Como ya hemos dicho, un peatón en noche *sin niebla* es visible a unos cien metros, por lo que es razonable tomar como distancias de visibilidad de un peatón en noche *con niebla* los siguientes valores:

VISIBILIDAD CON NIEBLA NOCTURNA

- 50 a 100 m, con niebla débil
- 20 a 50 m, con niebla moderada
- 5 a 20 m, con niebla moderada a fuerte
- 0 a 5 m, con niebla muy fuerte

En general, de día, la visibilidad de un coche con las luces medias encendidas es tal que se duplican las distancias de visibilidad con niebla correspondientes; de noche, el factor de incremento es mucho mayor, con nieblas débiles puede llegar a veinte veces, decreciendo tal incremento a medida que aumenta la intensidad de la niebla, de modo que para nieblas muy fuertes sólo se duplican las distancias.

CAPITULO II

EMBESTIDO - EMBISTENTE

Según expresamos en el prólogo a esta tercera edición, hemos constatado que existen demasiadas confusiones respecto de la adjudicación de los roles de embistente y embestido.

Si bien éstos son conceptos netamente físicos, tienen connotaciones jurídicas debido a ciertas presunciones juríspudenciales, y hay quienes entienden que, sin más consideraciones, embistente es sinónimo de responsable y/o culpable.

Reiteramos que en estas páginas nos referimos sólo a cuestiones físicas, independientemente de las implicaciones y discusiones jurídicas que tales cuestiones pudieran suscitar.

Es decir, para nosotros *embistente* significa embistente *físico*, sin ninguna sinonimia con *responsable*, *culpable* u otros juicios jurídicos de valor.

Además de las confusiones mencionadas, y relacionadas con estos temas, hemos encontrado con grados de difusión importante entre pseudo expertos, absurdas creencias, como la llamada *ley o efecto martillo*, según el cual el móvil menos dañado sería el embistente y/o el que mayor velocidad desarrollaba.

También hemos visto, inclusive se ha publicado, que la ubicación de los daños en los rodados determinaría su rol de embestido o de embistente.

De este modo, según su autor, si un rodado presenta daños en su frente, es, sin más, embistente, y si los daños los presenta en su lateral resulta ser embestido.

Si bien los daños sufridos por un rodado resultan valiosos indicios de lo ocurrido, no se debe olvidar que son consecuencia y no causa del accidente.

De este modo, limitar la definición de embistente a las consecuencias del embestimiento empieza por ser un error metodológico, y al igual que un reloj parado brinda la hora correcta dos veces por día, estos conceptos erróneos pueden coincidir con la realidad en determinadas circunstancias.

Según la teoría de la ubicación de los daños en los rodados resultaría que es embistente un automóvil detenido (o una columna) que resultó dañado en su frente por el lateral de otro que incidió sobre él con movimiento transversal por estar derrapando. El derrapante resultaría ser embestido.

Esto es un absurdo físico, además de un agravio a la lógica, que puede tener nefastas consecuencias jurídicas, dada la ya mencionada identidad en este campo que algunos adjudican entre embistente y responsable.

Absurdos como éste nos llevan a intentar sistematizar el tratamiento de la cuestión desde el punto de vista físico-mecánico:

En una colisión entre dos cuerpos, embistente es el cuerpo portante de fuerza activa y embestido es el cuerpo que provee la fuerza reactiva.

Si bien estos conceptos son claros y hasta obvios para quienes están familiarizados con los principios de la dinámica, reconocemos que pueden resultar algo abstrusos para quien no lo esté, y como este libro pretende ser de utilidad a ambos (ver prólogo a la primera edición), trataremos de aclararlos.

Desafortunadamente no hemos encontrado definiciones adecuadas sobre la fuerza activa en la bibliografía científica,

probablemente por considerárselo una obviedad, pero habiendo comprobado que, entre quienes investigan accidentes, tal obviedad es sólo aparente, intentaremos desarrollarla.

Cuando dos cuerpos entran en contacto uno con el otro, aparecen fuerzas en cada uno de ellos debido a la interacción mutua.

Ahora bien, para que un cuerpo empiece a actuar sobre otro debe existir una modificación de las condiciones previas, usualmente se debe acercar. (Aunque existen otros modos, ellos escapan al interés accidentológico.)

El cuerpo "A" que se acerca al cuerpo "B" hasta tomar contacto con éste, es el portante de la fuerza activa o acción.

En cuanto entran en contacto, "B" es afectado por la fuerza acción de "A", y simultáneamente aparece en "B" la fuerza reactiva o de reacción, la que a su vez, afecta a "A".

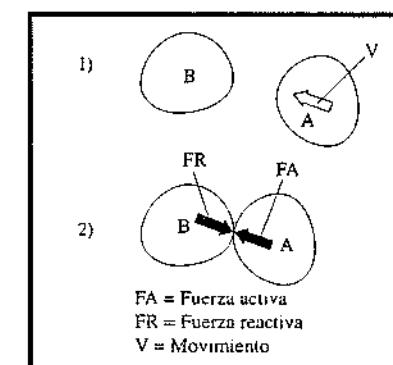


Gráfico 9-A

Estas fuerzas son idénticas en magnitud, coinciden en dirección y tienen sentidos opuestos.

Hemos descripto el principio de acción y reacción o tercera ley de Newton (ver capítulo Dinámica) que se enuncia "A toda acción se le opone siempre una reacción igual en magnitud y dirección (recta de acción) pero de sentido contrario".

Esto demuestra la falacia del absurdo, aunque mentado,

efecto martillo, ya que al chocar dos cuerpos, las fuerzas, aunque opuestas, son siempre idénticas en magnitud, por lo que la gravedad de los daños nada nos puede decir del carácter de embestido o embistente.

Lo explicado hasta ahora es una aproximación intuitiva; sería sencillo definir entonces el cuerpo portante de la fuerza activa o acción como aquel que se acerca al otro, pero, en función de la relatividad del movimiento, en rigor no saldríamos de la incertidumbre.

Podríamos intentar explicar la relatividad del movimiento, y su dependencia de la posición del observador, pero los textos de mecánica y física abundan al respecto, y seguramente mucho mejor que lo que podríamos pergeñar nosotros; sólo recordaremos el cuento en el que un borracho que viajaba en tren proclamaba que para su regreso se iba a montar en un poste de telégrafo, porque los veía pasar hacia atrás muy rápido.

Es decir que para el observador ubicado en el tren (no necesariamente borracho), los que parecen moverse son los postes.

Recordemos que, hasta Copérnico, la humanidad entendía que el Sol giraba alrededor de la Tierra, inclusive, en nuestra habla cotidiana aún se refleja tal creencia (el Sol sale, se pone, etcétera).

Además, aun desde el punto de vista de un observador ubicado en un punto fijo, cuando ambos cuerpos son móviles y tienen trayectorias convergentes, cada uno está acercándose al otro.

Al no poderse definir científicamente quién se acerca a quién para todo observador, no podemos definir al embistente en relación con su calidad de aproximación al embestido.

Por lo analizado podemos afirmar que la fuerza activa es inherente al movimiento de los cuerpos, pero no al movimiento relativo.

Nótese que en la frase anterior mencionamos fuerza y movimiento, es decir velocidad.

De esta manera, podemos afinar más los conceptos, diciendo que cuando dos cuerpos entran en contacto, generándose el par de fuerzas de acción y reacción, el portante de la fuerza activa (embistente) es aquél cuya velocidad o dirección del movimiento coincide en dirección con la recta de acción de las fuerzas de acción y reacción en el instante del primer contacto.

Aun esto no basta para redondear la definición, pues en caso de choques colineales, la incertidumbre subsiste, ya que ambas fuerzas —acción y reacción— coinciden en dirección con el movimiento.

De esta manera llegamos a que:

Embistente (portante de la fuerza activa) es, entonces, el cuerpo, aquel cuyo movimiento, en el instante del primer contacto, coincide en dirección y sentido con la dirección y sentido de una de las fuerzas del par acción y reacción que se genera por el contacto con otro cuerpo.

La fuerza coincidente con el movimiento del cuerpo en dirección y sentido es la fuerza activa.

Nótese que en la definición de embistente hemos condicionado el carácter de tal al *instante del primer contacto entre los cuerpos*.

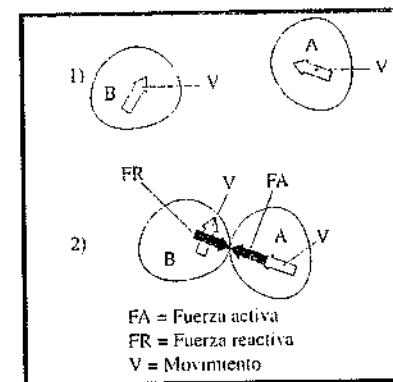


Gráfico 9-B

Esto no es casual; sucede que apenas se tocan los cuerpos, y por la aparición del par de fuerzas interactuantes, los cuerpos reales se deforman, interpenetrándose, inicialmente de forma infinitesimal, pero aumentando con el tiempo hasta asumir en seguida un carácter finito.

De esta manera, debido a la penetración, hay zonas del cuerpo embestido que toman carácter activo, apareciendo en cada instante nuevos pares de fuerzas activas y reactivas.

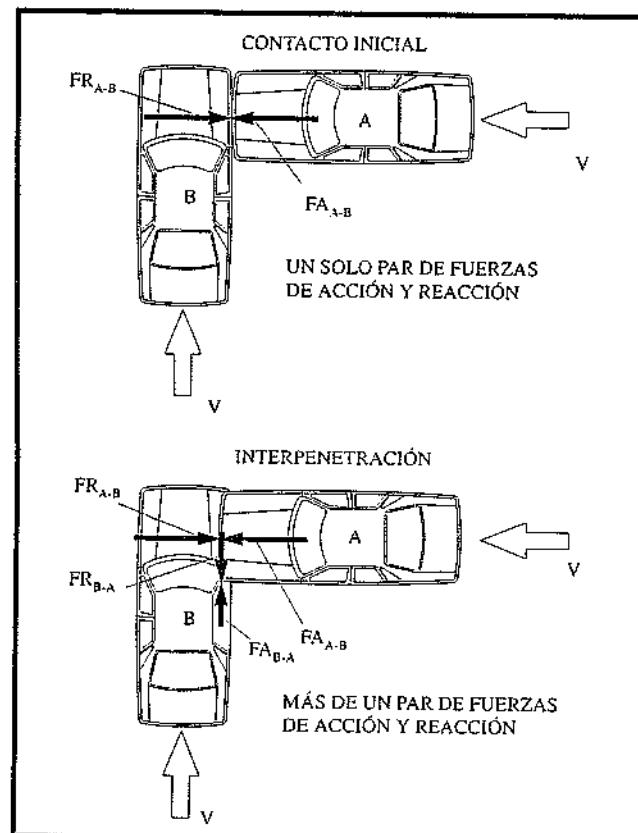


Gráfico 9-C

El fenómeno de aparición de nuevos pares de acción y reacción, debido a la interpenetración de las masas colisionantes, complica la interpenetración de los daños sufridos por los cuerpos.

En cuanto estos últimos se deforman, cada uno es afectado por la acción del otro sobre sí, y por la reacción a la acción que uno efectúa sobre el otro.

Es decir que apenas ocurrido el contacto inicial, cada cuerpo es afectado por dos fuerzas: la reacción a su propia acción y la acción del otro cuerpo sobre él.

En realidad cada uno de estos pares de fuerzas es la resultante o suma vectorial de todas las fuerzas de acción de un cuerpo, y de sus reacciones

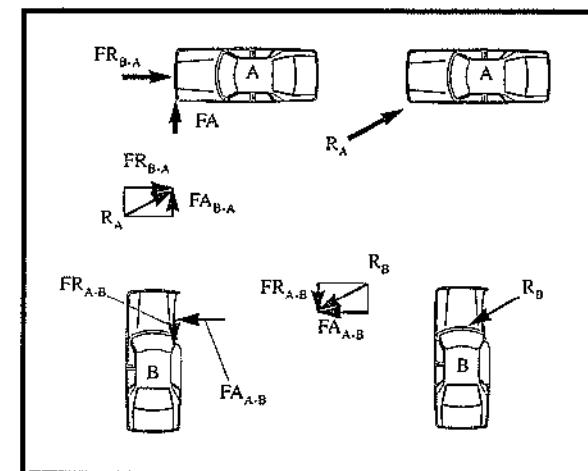


Gráfico 9-D

Es sumamente importante considerar esta cuestión al intentar colegir las direcciones pre-impacto de los móviles a partir de la observación de los daños que éstos sufrieran, porque olvidar, ya sea la reacción a la acción propia, o la acción

del otro cuerpo sobre el analizado, puede llevar a considerables errores.

Como vemos en el gráfico, si olvidásemos considerar la acción del "B" sobre el "A", una vez interpenetrados, deberíamos concluir que el "A" embistió oblicuamente un objeto fijo.

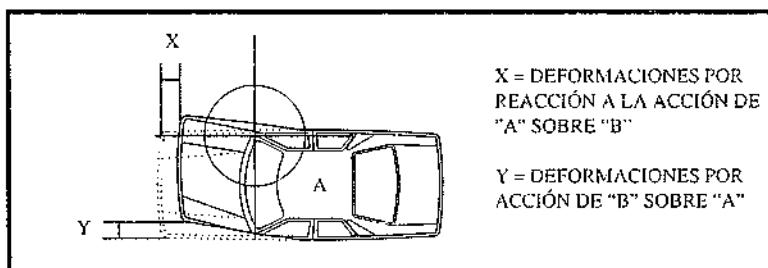


Gráfico 9-E

Incluso, en algunas configuraciones de impacto, la acción del embestido, que, repetimos, ocurre una vez interpenetrados los cuerpos, al deformar la estructura del embistente, da una idea cualitativa de su cantidad de movimiento (magnitud vectorial que es el producto escalar de la masa de un objeto por su velocidad; en alguna bibliografía es llamada *momentum*, siguiendo la terminología norteamericana).

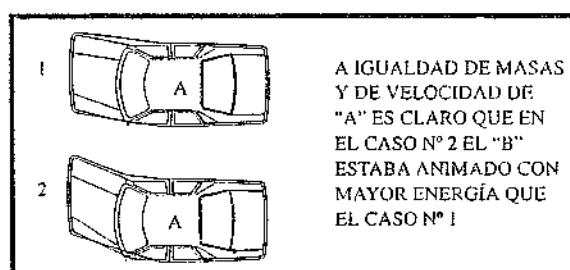


Gráfico 9-F

1. MÉTODO DE LAS DOS PELÍCULAS

Más allá de las justificaciones y explicaciones más o menos precisas que desde lo técnico-científico ensayemos para establecer los roles de embestido y embistente, existen casos cuya configuración convierte casi en inasibles las mismas para quien los analiza.

Para estas situaciones hace años hemos ideado una metodología de análisis mucho más intuitiva, que ha demostrado ser de utilidad para facilitar la adjudicación de los roles en cuestión, aun para quienes no son iniciados en los vericuetos de la cinemática y la dinámica.

El método de las dos películas (podríamos haberlo titulado mucho más pomposamente *¿no?*) consiste en imaginar el movimiento de cada cuerpo como resultado de la proyección de una película cinematográfica independiente.

Ambas películas, proyectadas simultáneamente y sincrónicamente mostrarían los instantes previos al accidente y la ocurrencia del mismo —lo que implica que tenemos definidos los movimientos de los móviles en el entorno del punto de impacto.

Como las películas se proyectan en nuestra imaginación, tenemos la facultad de detenerlas y dejarlas correr independientemente en el momento que lo estimemos necesario.

De este modo, proyectándose ambas películas sincrónicamente, las detenemos un instante infinitesimal antes del primer contacto entre los móviles, instante que podemos llamar "T".

Ahora, *soltamos* la película correspondiente a uno de los móviles, manteniendo la del otro en reposo.

Si observando las consecuencias de esta suelta comprobamos que el móvil que en este caso está en movimiento, *toca* al otro (fijo) en la zona y con la zona comprometidas en el accidente, podremos afirmar que este móvil fue el embistente en el caso real.

Reproduciendo la experiencia imaginaria a partir de "T", pero soltando al otro móvil y manteniendo detenida la película del primero que hemos soltado, verificamos si el segundo pasa sin tocar al que ahora está fijo, en cuyo caso habrá sido el embestido en el caso real.

Hemos puesto la restricción de que el móvil que hemos soltado *toque* al otro en la zona del mismo afectada por el contacto inicial y con su propia zona afectada por el contacto inicial, pues si el contacto se establece entre otras zonas de los móviles estaríamos ante otro accidente, distinto, que podría, tal vez, haber ocurrido de no haber acaecido el que está en análisis.

Existe un caso particular en el que el método de las películas se debe interpretar por el opuesto, es el caso de embestimiento mutuo, o de dos co-embistentes, que convergen oblicua o transversalmente.

En estos casos, al soltarse independientemente cada película, ambos móviles *pasan sin tocar al otro*; como en realidad el contacto ocurrió, resulta forzoso concluir que ambos arriban al punto e instante de impacto simultáneamente; *los dos son embistentes*.

Esto nos permite definir la —muchas veces elusiva— situación de embestimiento mutuo, como aquella en que, con el método de las dos películas, cualquiera que sea el móvil que se *suelte* independientemente, ambos *tocan* al otro, o ambos *no lo tocan*.

Recientemente no hemos enterado de la existencia de un método que, por lo que entendemos, es similar al que proponemos, pero carecemos de información suficiente como para consignarlo.

2. EMBISTENTE VIRTUAL

Aunque extendida jurisprudencia denomina así a quien

por realizar una maniobra evasiva se convierte de virtual o inminente embistente en embestido, no es el caso que trataremos.

Existen casos en que la definición física de embistente contraría el criterio de protagonista activo (Capítulo primero), son los casos de intrusión en la envolvente:

Imaginemos un camión que arrastra un remolque por medio de una *lanza*. Entre la parte trasera del tractor y la delantera del remolque queda un espacio que muchas veces supera el metro.

Aceptemos también que una moto que circula transversalmente al equipo tractor-acoplado, se introduce en el espacio habido entre ambos, y que, antes de tocar con su frente la lanza, es alcanzada por el frente del acoplado.

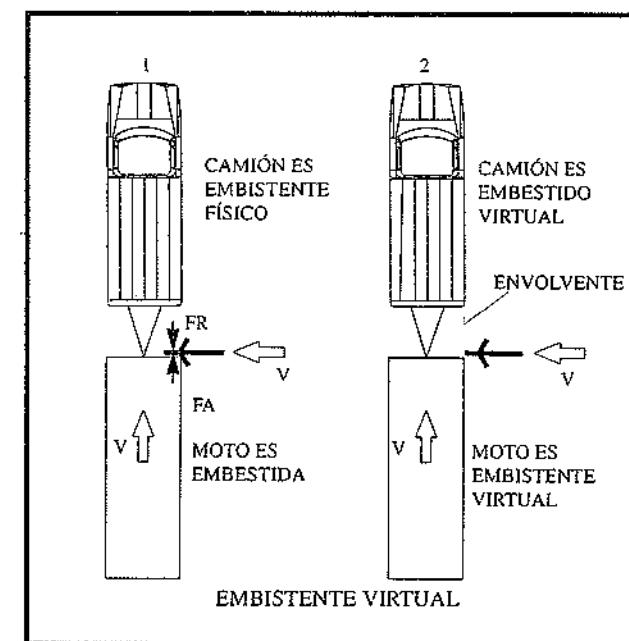


Gráfico 9-G

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 —geométricamente 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 concidiría 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:

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

en la que " μ_0 " 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: $\mu_0 = 0,85$ 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 $(\text{Km}/\text{h})^1$.

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 FRICTION

— 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 FRICTION MEDIO
(NEUMÁTICOS - PISO)

piso	seco	húmedo
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:

$$R=\mu.P$$

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	
	rueda trasera	ambas ruedas
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. HIDROPLANE

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 hidroplaneo.

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 hidroplaneo.

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, uniduosidad, viscosidad, etcétera.

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

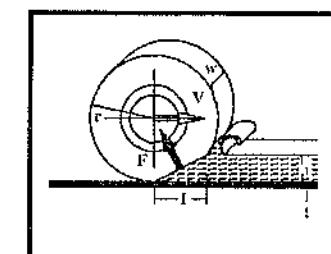


Gráfico 9-H

En este lugar debemos mencionar que al ser deformables, todos los neumáticos presentan un aplanamiento 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:

$$V_h = 5,55 [p/(w/l)]^{0.6}; \text{ para automóviles}$$

$V_h = 29,4 p^{0.21} [1/(w/l)]^{0.5}; \text{ para camiones (perfeccionada por Ivey)}$

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).

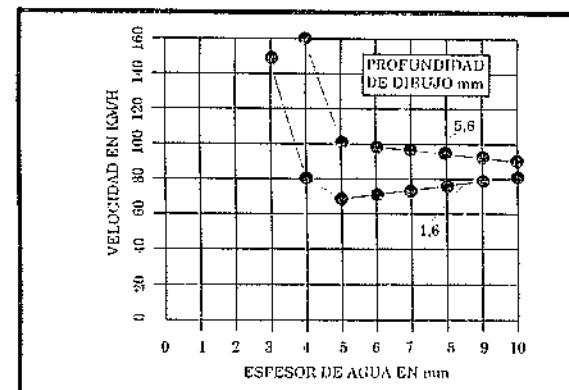


Gráfico 9-I

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.

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 descripto, 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

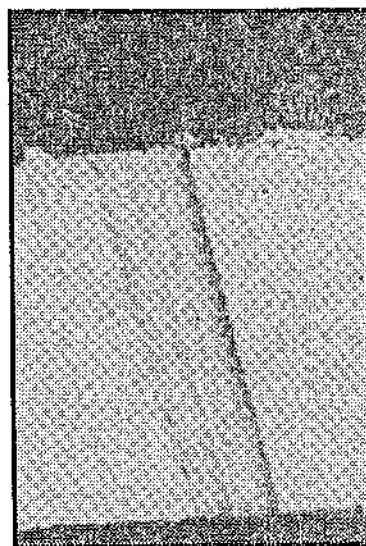


Gráfico 10-A

DESLIZAMIENTO

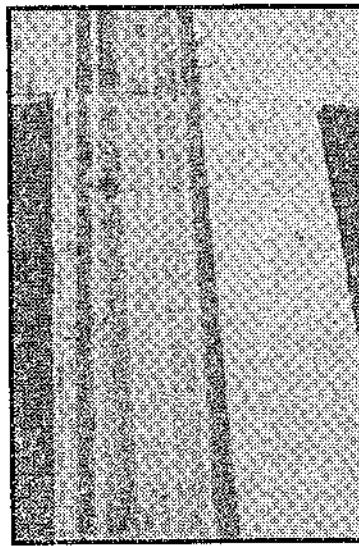


Gráfico 10-B

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

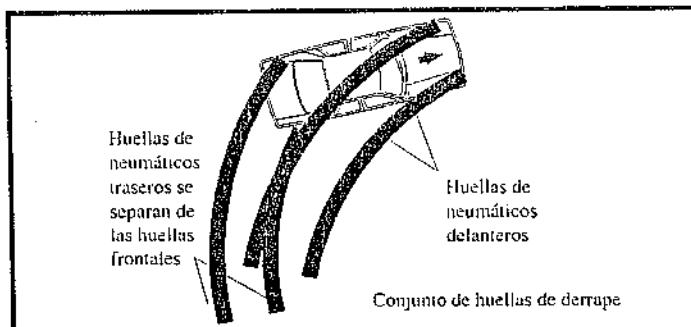


Gráfico 11

Gráfico 11: huellas de neumáticos

Longitud efectiva de las huellas de derrape.— Ya hemos descripto 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 estriás (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 estriás. (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.

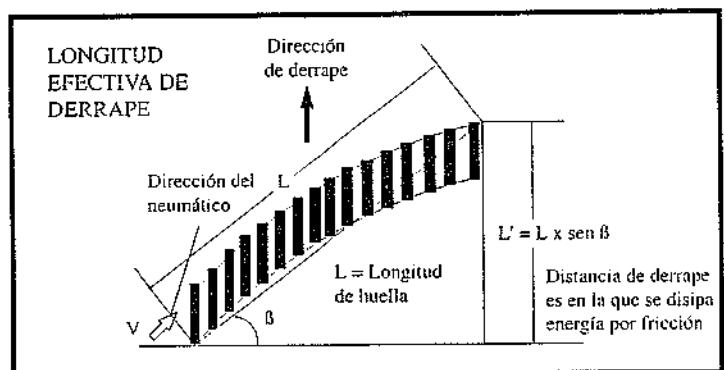


Gráfico 11-B

11. VELOCIDAD CRÍTICA

Las huellas de derrape se producen cuando se supera, en un giro la llamada *velocidad crítica* "V_c", 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 descripta, 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 esquive.

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-locking 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.

1. RIESGO Y PELIGRO DE ACCIDENTE

Previo a entrar en el desarrollo del método de análisis, es conveniente hacer la distinción entre *riesgo* de accidente y *peligro* de accidente.

Un *riesgo* es una situación que puede evolucionar hasta convertirse en peligrosa. Las señales de prevención son avisos de riesgo. Peatones circulando a la vera de la calzada definen un riesgo.

Análogamente, móviles circulando en trayectorias convergentes o cercanas, y cuando circulando en sentido contrario, uno de los móviles se desvía treinta centímetros en dirección al otro (tal movimiento es percibible desde gran distancia).

También representan riesgo los cruces y/o empalmes de caminos o calles y los pasos a nivel ferroviarios, etcétera.

Un *peligro* es una situación tal que, de no modificarse lo suficiente alguno de los parámetros cinemáticos de los protagonistas, desembocará en un accidente.

En tal sentido, son peligros: trayectoria prevista obstruida; curva en el camino; peatones en la calzada; móviles con trayectorias convergentes en un punto-instante, cuyos parámetros no se modifiquen con el tiempo o lo hagan en el mismo sentido (rumbo de colisión), etcétera.

2. EVITABILIDAD FÍSICA DEL ACCIDENTE

Con este concepto expresamos la posibilidad o imposibilidad reales habidas, de lograr evitar un accidente —que realmente ocurrió— mediante la modificación de los parámetros cinemáticos, en un entorno temporo-espacial del mismo.

Como vemos, es una evaluación técnica, y no conlleva juicios de valor, o atribución de responsabilidades.

3. TIEMPO DE PERCEPCIÓN Y REACCIÓN

Una cuestión esencial en el análisis del accidente es la determinación del tiempo que insumió cada etapa del mismo y su comparación con los tiempos estándares o normales, de modo de comprobar si existieron demoras debidas a los protagonistas.

Definimos al lapso que le insume a un conductor percibir y responder a una situación determinada, como *tiempo de percepción y reacción* (TPR).

El TPR está formado por dos tiempos consecutivos: el que insume la percepción o tiempo de percepción (TP) y el lapso que insume la reacción o *tiempo de reacción* (TR).

a) *Componentes del TPR.*— Desde la aparición del estímulo hasta la respuesta del conductor transcurren una serie de etapas en el procesamiento de la información por parte de éste, que es útil considerar.

1. *Primera etapa: detección (TP).* Su inicio coincide con el del TPR, y así se considera cuando el objeto o situación de riesgo entra en el campo de percepción (generalmente campo visual) del sujeto, y finaliza cuando este último toma conciencia de que *algo* se ha presentado.

Ese *algo* puede estar algún tiempo en el campo de percepción antes de ser detectado, lo que origina una demora en la percepción.

La duración de la detección está determinada por una serie de factores, algunos inherentes al sujeto, como sus capacidades sensoriales, otros al objeto de la detección, por

ejemplo su conspicuidad, presentándose asimismo los circunstanciales, como el grado de atención del conductor.

Esta primera etapa finaliza cuando el conductor mueve sus ojos de modo de focalizar en la zona central de sus retinas aquello que ha detectado.

Su duración media es del orden de 0,3 seg., y su finalización determina el fin del *tiempo de percepción*, y el inicio del *tiempo de reacción*.

2. *Segunda etapa: identificación.* Consiste en el inicio del *tiempo de reacción*. En este paso el sujeto obtiene suficiente información sobre el riesgo detectado como para poder hacer una evaluación del mismo.

No es necesario que la información sea completa sobre el objeto riesgoso, pero sí adecuada. Por ejemplo, resulta superfluo saber si un peatón que se apresta a iniciar el cruce de la calle por donde se circula, es hombre o mujer, pero sí es necesaria la estimación de sus velocidades y trayectorias probables, para poder optar por algún curso de acción.

Esta etapa comienza con la focalización visual del objeto y finaliza cuando se ha hecho acopio de la información suficiente como para valorizar el riesgo. Su duración se encuentra determinada también por la conspicuidad del riesgo, la capacidad sensorial del sujeto y ciertas condiciones circunstanciales, como cansancio o estados de intoxicación que perturben el proceso mental de identificación, así como por la habilidad que para esto brinda la experiencia.

En tal sentido, algunos estudios han determinado que si bien los adolescentes poseen respuestas neuromotoras más rápidas que personas maduras, se da el caso de que éstas suelen tener menores tiempos de percepción y reacción totales, ante situaciones reales de manejo, lo que es atribuido a menores lapsos en los procesos de identificación, de evaluación y de decisión.

En esta etapa pueden generarse también demoras, y

errores en la identificación, los que pueden llevar a provocar errores en la evaluación del riesgo.

Es el caso de quien se lanza a pasar a otro rodado en la ruta, porque cree que el rodado que ve a lo lejos va en su misma dirección, cuando en realidad se está acercando velozmente.

La duración de esta etapa es del orden de 0,3 segundos.

3. *Tercera etapa: evaluación.* A partir de la información obtenida y procesada durante la etapa de identificación, el conductor evalúa el riesgo reconociéndolo como tal, como peligro, o desechándolo.

Este proceso culmina cuando se ha llegado a alguna de las conclusiones precedentes, e insume un lapso que tiene las mismas influencias de la etapa anterior (algunos autores las unifican).

Los errores propios de la evaluación del riesgo son causa de no pocos accidentes, por ejemplo, no conceptualizar como riesgo una pelota que atraviesa la calle porque no se percibe a nadie sobre la vereda; el riesgo está en que, de entre autos estacionados, puede salir corriendo un chico, indetectable por su altura.

Otro error de evaluación puede producir la reacción exagerada (*over-reaction*), que provoque o agrave un accidente.

Con frecuencia vemos que un accidente se produce o agrava por *clavar los frenos*, en *stop panic*, cuando una frenada más suave hubiera sido más eficiente, como ya hemos visto.

Los errores debidos a ignorancia (como por ejemplo desconocimiento del significado de una señal) ocurren en esta etapa, y tienen una duración aproximada de 0,5 segundos.

4. *Cuarta etapa: decisión.* Esta etapa, que comienza cuando se ha concluido la evaluación y finaliza al iniciarse la respuesta, consiste en optar entre las siguientes alternativas: 1) cambiar la velocidad (frenar o acelerar); 2) cambiar la direc-

ción (girar a izquierda o derecha); 3) cambiar velocidad y dirección; 4) no modificar los parámetros de su movimiento; 5) secuencias de todas o algunas de las alternativas anteriores.

Se ha demostrado que el lapso que insume esta etapa es tanto mayor cuanto más opciones existan.

Las equivocaciones en la decisión suelen ser causa de accidentes fácilmente evitables; por ejemplo, frenar bloqueando los neumáticos, y por lo tanto reducir la posibilidad de maniobrar, cuando un leve giro y contragiro hubiese permitido evadir un obstáculo.

A veces, decidir requiere información suplementaria, como la que se obtiene de mirar los espejos retrovisores, lo que insume alrededor de 0,9 seg. para el espejo interior y 0,75 seg. para el espejo lateral exterior. Su duración aproximada oscila entre 0,50 y 1 segundo, o algo más, según la situación.

5. *Quinta etapa: respuesta.* Se inicia cuando el centro motor del cerebro envía la orden de ejecución al grupo de músculos apropiado, y finaliza cuando estos músculos comienzan a ejecutar dicha orden, es decir, cuando, o bien empieza a cambiar la presión sobre el pedal del acelerador, o los brazos inician el giro del volante de dirección; el tiempo insumido es de aproximadamente 0,2 seg., siendo su finalización la del TPR y la del TR.

Debe aclararse que la suma directa de la duración de cada etapa no necesariamente brinda un tiempo de percepción-reacción adecuado para todos los casos, ya que puede haber superposiciones o puenteos de etapas, así como reducciones o incrementos en su duración.

Por ejemplo, si al alcanzar la cima de una loma encontrásemos el camino totalmente bloqueado, no habría opciones para la decisión, habría que frenar; además, se reduciría en una décima de segundo, por lo menos, el período de identificación, por ser innecesario el movimiento ocular, dada la ubicación y magnitud del estímulo.

b) *Tiempo de percepción y reacción total (TPRT).*— El TPRT (*tiempo de percepción y reacción total*) es el lapso que, junto con el TRT (*tiempo de reacción total*), en general deben considerarse en el proceso de reconstrucción y/o análisis de accidentes, y se obtiene de sumar al TPR (o al TR), el tiempo insumido por lo que hemos llamado *respuesta mecánica* (TRM).

El TRM se inicia al finalizar el proceso de percepción y reacción humana, es decir, cuando los músculos comienzan a ejecutar las órdenes enviadas por su sistema nervioso, y finaliza cuando el rodado empieza a responder a las acciones ejecutadas por el conductor.

Este tiempo de respuesta mecánica es imputable a distintos factores, básicamente a:

— que todos los elementos mecánicos tienen ciertos huecos, juegos o márgenes que deben ser superados para que la señal que deben transmitir pueda serlo; típico es el caso del juego del volante de dirección;

— que la transmisión de efectos mecánicos no es instantánea; desde que se empieza a disminuir la presión sobre el acelerador, hasta que el vehículo comienza a reducir su velocidad, transcurre un cierto tiempo imputable a la inercia de los mecanismos móviles, y a la elasticidad de los elementos que transmiten la orden, la que *amortigua* la señal, extendiéndola en el tiempo;

— que ciertas maniobras requieren desplazamientos de partes del cuerpo, como por ejemplo, accionar la bocina o frenar (desplazar el pie del acelerador y frenar insume alrededor de 0,25 segundos).

Este TRM insume un lapso del orden de medio segundo, ya que, por ejemplo, desde que se comienza a apretar el freno

hasta que se produce efecto sobre la velocidad del rodado, transcurren unos 0,25 segundos.

c) *Cuantificación del TR (tiempo de reacción).*— Como veremos, en el capítulo referido a puntos accidentológicos, suele ser más útil manejarse con el TR (*tiempo de reacción*) o el TRT (*tiempo de reacción total*) que con el TPR (*tiempo de percepción y reacción*) o el TPRT (*tiempo de percepción y reacción total*).

Ante determinados estímulos el cuerpo humano reacciona en forma refleja; así, al lastimarnos una mano por tocar un objeto punzante, la retiramos antes de tomar conciencia de lo sucedido.

Esto ocurre porque el cuerpo reacciona cuando el estímulo doloroso, vía nervios sensoriales, llega a la médula espinal, desde donde se ordena retirar la mano a los músculos adecuados, y se transmite simultáneamente la información al cerebro, donde se concientiza.

El tiempo transcurrido entre el comienzo del dolor y el retiro de la mano es del orden de 0,1 seg., que es lo que demora el sistema nervioso en transmitir el impulso desde el sitio del daño hasta la médula y desde ésta a los grupos musculares, estableciendo las sinapsis necesarias.

El TR es mucho mayor que el reflejo analizado precedentemente, no sólo porque la distancia a recorrer por el estímulo es mucho mayor, ya que debe llegar al cerebro y volver, sino porque la información debe ser procesada en éste, a diferencia del reflejo, en el cual no se procesa la información sino que se reacciona automáticamente.

Nosotros hemos realizado numerosas veces la siguiente experiencia sencilla, la que sugerimos al lector: dése a una persona un cronómetro de cualquier tipo (ampolla, por ejemplo), y pídale que cuando quiera lo dispare y que lo detenga lo antes que pueda.

Como es fácil comprender, en este caso no se insume

tiempo en detección, en identificación, en evaluación, ni en decisión, es decir que el tiempo que se insume es íntegramente imputable a la respuesta neuromotriz.

Los resultados demostrarán que pocas personas pueden detener el reloj en menos de 0,2 seg. (nunca más de unas centésimas), y eso estando atentas, preparadas, y conociendo de antemano qué y cómo van a hacerlo, con los músculos listos, y disponiendo cuándo hacerlo.

Experimentos similares, de detención de relojes, pero con inicio comandado por el experimentador (encendido de una luz, por ejemplo), han dado resultados análogos, debido a que si bien existe una incertidumbre sobre el momento del inicio, sólo es necesario que el cerebro transmita una única orden: apretar; mientras que en el caso anterior eran tres: apretar, soltar, apretar.

Cuando se introducen elementos de decisión el tiempo de respuesta se magnifica; de este modo, requiriendo distintas respuestas a diferentes señales, se obtuvo que el TR aumenta a 0,35 seg. cuando hay dos posibles respuestas.

Nótese que aún no entran en consideración, detección, identificación ni evaluación.

Se sabe que estos elementos están influidos por la conspicuidad, es decir, la *potencia* del estímulo, y por el grado de atención del conductor, elementos de muy difícil evaluación en ensayos, ya que siempre el sujeto del mismo está alertado sobre su naturaleza, y por lo tanto prevenido.

Se han intentado experiencias interesantes, cuando no graciosas, para tratar de reproducir condiciones reales de circulación; por ejemplo: llevar al sujeto a una pista de pruebas para someterlo a una serie de experiencias manejando un automóvil, cumplirlas y darlas por terminadas, y en el camino de regreso a la base operativa, tras la cima de una loma hacerle encontrar un obstáculo relativamente pequeño (15 por 91 cm) que lo obligue a discernir entre frenar o esquivarlo, tras evaluar la posibilidad de arrollarlo. Éste es el verdadero experimento, del cual se toman las mediciones.

Los resultados fueron que el 85 percentil del TPR estaba en el orden de 1,3 seg., y la media en un segundo.

Cabe aclarar aquí que el 85 percentil es un valor estadístico que tiene altísimas probabilidades de ocurrencia, y es aquel en el cual el 85% del universo considerado se halla comprendido.

Otros tests se han realizado con simuladores tipo videojuego, en los cuales el programa impone la aparición de un accidente inminente luego de un largo y apacible viaje simulado. Medidos los tiempos de reacción, se encontraron dos grupos, uno llamado de *reacción rápida*, cuya media fue de 0,83 seg., y otro denominado de *reacción lenta*, con media en 1,13 segundos.

Se ha cuestionado este experimento porque el sujeto no percibe un riesgo *real*, para sí o para terceros.

Otro interesante experimento fue requerir la colaboración de conductores de paso circunstancial, solicitándoles que cuando oyesen un fuerte ruido en su trayecto apretasen inmediatamente el freno, de forma de encender sus luces de *stop*. La media de esta prueba fue de 0,66 seg., y el 85% de los conductores reaccionó en un segundo o menos; pero lo interesante es que la misma experiencia se llevó a cabo con conductores no advertidos, en el mismo lugar (el ruido era un estremecedoso bocinazo), comprobándose que debido a la sorpresa, el TRT se incrementaba en un 35%.

Es decir que un 35% más del tiempo hallado en el primer experimento refleja las condiciones reales de circulación, lo que lleva el valor medio a 0,89 seg. y el 85 percentil a 1,35 segundos.

Otra prueba interesante por su acercamiento a la realidad fue realizada mediante dos vehículos; uno se colocaba precediendo al de un conductor cualquiera, y el segundo siguiendo a éste. El experimentador del primer automóvil accionaba las luces de freno de su auto, y los ocupantes del tercero registraban el tiempo entre ese instante y el del encendido del *stop* del circunstancial y desprevenido examinado.

Los resultados de esta técnica fueron TRT medio 1,25 seg. y 85 percentil 1,90 segundos.

d) *Influencia de drogas.*— 1. *Alcohol.* Es reconocida la influencia del alcohol en el tiempo de reacción, por lo que en este resumen sólo mencionaremos que con 0,1% BAC (*blood alcohol concentration*) el tiempo de reacción se encontró incrementado en promedio a 0,97 seg. cuando el mismo experimento en sujetos sin alcohol daba una media de 0,77 seg., es decir que el TR se incrementó en un 26%.

2. *Marihuana.* Se ha encontrado que su efecto incrementa el TR. En la misma prueba en que los sujetos a los que se les había administrado un placebo dieron una media de 1,08 seg., los que estaban bajo efecto de marihuana rindieron una media de 1,18 seg. (10% de incremento). También se encontró incremento en los errores de identificación, provocados por esta droga.

3. *Otras drogas.* El valium incrementa el TR en un 10%, y el medazepan en un 5%.

Dada la cantidad de drogas potencialmente incidentes en el TR, la variabilidad de sus efectos en cada individuo, y según la concentración, detenemos aquí su enumeración, so riesgo de invadir demasiado áreas de la toxicología.

e) *Influencia de la edad.*— Se ha encontrado que el TR se incrementa en general con la edad, con medias de un 20% mayor a los 68 años que a los 20, aunque los experimentos de intrusión sorpresiva para conductores desprevenidos, de Olson y Sivak, dan un TPRT menor en un 10% para el grupo de mayor edad que para el de jóvenes.

En posteriores ensayos de control, estando alertados, y sin factor de detección, identificación, evaluación o decisión

(frenar ante una luz que se encendía en el capó), el grupo de mayor edad obtuvo peores resultados que el de menores.

Teniendo en cuenta los ensayos descriptos, se puede inferir que si bien con el aumento de la edad declinan las facultades neuromotoras, se incrementan las capacidades para detección, identificación, evaluación y decisión, tal vez debido a la experiencia.

En función de lo expuesto, y hasta tener nuevas evidencias, consideramos inapropiado diferenciar el TR según la edad, a efectos de la reconstrucción de accidentes.

f) *Influencia del sexo.*— Mal que les pese a las feministas, los ensayos demuestran que las mujeres en general presentan reacciones más lentas que los hombres, aunque para su satisfacción, tal diferencia es demasiado pequeña como para ser considerada (del orden de 0,08 seg. en promedio para el mismo estudio).

g) *Influencia de la fatiga.*— Los ensayos de respuesta simple muestran variaciones leves y alternativas relacionadas con el tiempo de manejo, pero hay evidencias de que el TR aumenta enormemente durante períodos prolongados de viaje, lo que parece estar provocado más por la disminución de la atención y por ensordecimientos que por el TR en sí.

h) *Conclusiones.*— Como hemos visto, el TR está influído por muchos factores y circunstancias, por lo que el investigador deberá manejarse con mucho discernimiento al asignar un valor determinado.

Para facilitar esta tarea presentamos, con la anterior salvedad, la siguiente sinopsis:

1. *Reacción refleja (TR aproximado: 0,1 segundos; TRT: 0,60 segundos).* Obedece a razones instintivas e inconscien-

tes; ocurre en situaciones de emergencia extrema; suele ser una reacción equivocada.

2. *Reacción simple (TR aproximado: 0,5 segundos; TRT: 1 segundo).* Obedece a respuestas planeadas, ante situaciones esperables, para las que se está entrenado por la experiencia.

Ocurre ante las circunstancias normales de manejo; no hay, virtualmente, identificación, evaluación ni decisión, ya que es una respuesta casi automática.

3. *Reacción compleja (TR aproximado: 1 segundo; TRT: 1,50 segundos).* Es la utilizable en la mayoría de los accidentes; obedece a la selección de respuestas posibles habituales; ocurre ante situaciones inesperadas; están presentes todas las etapas de la percepción-reacción, aunque pueden estar superpuestas.

4. *Reacción discriminatoria (TR: más de dos segundos).* Obedece a la búsqueda de respuestas no habituales; ocurre cuando las respuestas habituales no son posibles; por ejemplo, habiéndose quedado totalmente sin frenos, y teniendo que optar entre embestir a una u otra persona, o elegir entre volcar o estrellarse.

i) *Intervalo entre maniobras consecutivas.*— En las reconstrucciones suele encontrarse evidencia de que previo al accidente el conductor realizó más de una maniobra evasiva, y puede ser de utilidad conocer que el intervalo estándar entre dos maniobras consecutivas es del orden de 0,5 seg., debido a que, si bien las etapas de detección e identificación pueden aceptarse en general como innecesarias, subsisten las de evaluación (en este caso, del éxito probable de la maniobra previa), decisión y respuesta.

Al finalizar este capítulo creemos necesario remarcar la necesidad de establecer un TRT adecuado a cada circunstancia.

CAPÍTULO II

PUNTOS ACCIDENTOLÓGICOS

Son entidades de referencia física, en las cuales ocurrió o pudo ocurrir algún hecho relacionado con el accidente o sus protagonistas.

Se definen por tres coordenadas espaciales y una temporal, aunque frecuentemente basta hacerlo por una coordenada espacial sobre las trayectorias de los protagonistas y una temporal.

1. PUNTO CLAVE O CRÍTICO

Generalmente es un sitio-instante donde ocurrió algún hecho trascendente del accidente, como por ejemplo un impacto, choque entre móviles, o embestimiento de peatones.

Existen también accidentes en los cuales no hay impactos, por ejemplo despistes, en cuyo caso determinar el punto clave puede ser muy variable; en el ejemplo dado algún investigador puede considerar que es el punto donde se salió de la carretera, mientras que otro, el punto donde se perdió el

dominio del rodado, y un tercero, el punto en el que algo provocó la pérdida del dominio.

Es útil y recomendable situar el origen de coordenadas, tanto espaciales como de tiempo, en el punto físico-instante en que ocurrió el suceso crítico o clave.

Así, los puntos ubicados antes, física y/o temporalmente, tendrán coordenadas negativas, mientras que los sucesos acaecidos luego, tendrán coordenadas positivas. De esta manera, un punto de la trayectoria de un móvil previo al punto crítico tendrá como coordenadas, por ejemplo: -54 m; -2 s, lo que significa que está situado 54 metros antes del punto crítico, y que el móvil pasó por allí 2 segundos antes de llegar a dicho punto.

Análogamente, si las coordenadas son 54 m; 2 s; significa que el punto en cuestión se halla 54 metros después del crítico, y que el móvil llegó a él tras 2 segundos de pasar por el punto clave.

2. PUNTO DE POSIBLE PERCEPCIÓN (PPP)

Es aquel punto-instante de la trayectoria de un protagonista desde el cual es posible (para una persona sin impedimentos que la inhabiliten para conducir) percibir la existencia de un riesgo o peligro de accidente.

Si bien habitualmente la percepción se realiza a través de la vista, hablamos de *percibir* riesgo o peligro porque un conductor puede percibirse del mismo por otros medios; por ejemplo, puede *oír* una sirena, o *sentir* la vibración de un convoy ferroviario, u *oler* el humo de un incipiente incendio, etcétera.

El PPP depende básicamente de las características ambientales, existencia o no de obstáculos a la visión, características de visibilidad, enmascaramiento de luces o ruidos por otras luces o sonidos, topografía, etcétera.

El punto de posible percepción coincide con el inicio del tiempo de percepción y reacción del protagonista.

3. PUNTO DE POSIBLE DETECCIÓN (PPD)

Es el sitio-instante en el cual el protagonista ya podría haber completado la detección del riesgo o peligro, es decir podría haber tomado conciencia de que *algo* se ha presentado.

Se ubica en la trayectoria del protagonista de que se trate, unos 0,3 seg. después del PPP.

Es el inicio de la medición de la *demora en la percepción*.

4. PUNTO DE PERCEPCIÓN EFECTIVA (PPE)

Es aquel punto de la trayectoria de un protagonista en el cual efectivamente se percata de que *algo* ocurre.

Es frecuente que el riesgo aparezca en el campo de percepción de, por ejemplo, un conductor antes de que éste se dé cuenta de tal circunstancia.

Esto ocurre por varias razones, desatención del conductor y/o escasa conspicioidad del riesgo son las principales.

El *punto de percepción efectiva* coincide con el fin de la etapa de *detección*, la primera de las que componen el TPR (tiempo de percepción y reacción), y con el inicio de la etapa de *identificación*, es decir, el inicio del TR (tiempo de reacción).

5. DEMORA Y DISTANCIA DE PERCEPCIÓN

El tiempo que transcurre desde el PPP hasta el PPE se denomina *demora en la percepción* o *tiempo de percepción*, es

decir que es el lapso que media entre que el riesgo o peligro fueron percibibles y el instante en que efectivamente fueron percibidos.

Como vemos, la demora en la percepción incluye la etapa de *detección*, del *tiempo de percepción y reacción*.

Esta demora puede ser nula en el caso en que ambos puntos (PPP y PPE) coincidan.

Cuando la demora abarca sólo el lapso necesario para la detección, se dice que existe *pronta percepción*, es decir, cuando el PPE (punto de percepción efectiva) precede o coincide con el PPD (punto de posible detección), para lo cual la demora habrá de ser menor o igual a 0,3 segundos.

Cuando excede este valor se denomina *percepción tardía, o excesivamente demorada*.

Si encontramos que en un accidente evitable, pero ocurrido, un protagonista percibió el riesgo-peligro después de tres décimas de segundo desde que éste fuera percibible, podremos asegurar que esta demora fue, cuando menos, causa del accidente.

La distancia que separa el PPP del PPE, es la llamada *distancia de percepción*, y representa el tramo recorrido desde que el riesgo se hizo percibible hasta que efectivamente fue percibido.

6. PUNTO DE RESPUESTA (PDR)

Luego de la detección siguen cuatro etapas del TPR: *identificación, evaluación, decisión y respuesta*. Al finalizar la de *respuesta*, el protagonista está iniciando los movimientos tendientes a lograr una acción evasiva.

Es decir, entonces, que el *punto de respuesta* es aquel en que finalizan los TPR y TR humanos.

Este punto es útil a la hora de determinar si lo que falló para que se produjera el accidente, fue el factor humano o el

mecánico. Si el protagonista ha completado su *tiempo de reacción* TR (es el *punto de respuesta*) sin que se produjeren demoras, y tanto su evaluación del riesgo como la maniobra intentada fueron adecuadas, así como correcta la ejecución de ésta, podremos asegurar que si el accidente era evitable físicamente, la falla fue del elemento mecánico.

7. PUNTO DE POSIBLE COMIENZO DE ACCIÓN EVASIVA (Pcae)

Desde el fin de la etapa de la respuesta y hasta el posible comienzo de la variación de los parámetros que definen el movimiento, transcurre un lapso que hemos denominado TRM (*tiempo de respuesta mecánica*), que incluye las demoras por movimientos de miembros, por inercia y/o huelgos de elementos mecánicos.

Se denomina *posible comienzo de acción evasiva* (Pcae), el sitio-instante en el cual un móvil podría comenzar a variar sus parámetros cinemáticos o intentar hacerlo con los del riesgo (frenar, acelerar, girar, tocar bocina, etcétera).

El Pcae ocurre cuando finaliza el TPRT (*tiempo de percepción-reacción total*), es decir cuando finaliza el lapso comprendido por la suma del TPR (*tiempo de percepción-reacción humano*) más el TRM (*tiempo de respuesta mecánica*).

Debe aclararse que el sitio-instante donde finaliza el TPRT coincide con el de finalización del TRT (*tiempo de reacción total*: suma del *tiempo de reacción humano* más el *tiempo de respuesta mecánica*), porque si bien son distintos, el TR es la parte del TPR que considera sólo la reacción humana y se empieza a medir a partir de la percepción efectiva, mientras que el TPR se inicia en el *punto de posible percepción*.

Es útil la diferenciación, ya que de esta manera, en el análisis podremos utilizar el TR, que no está influido por eventuales distracciones, y determinar la demora en la percepción para poder evaluarla.

8. PUNTO DE COMIENZO DE ACCIÓN EVASIVA (CAE)

Se denomina *comienzo de acción evasiva* (CAE), el sitio-instante en el cual un móvil comienza a variar efectivamente sus parámetros cinemáticos o intenta hacerlo con los del riesgo (frenar, acelerar, girar, tocar bocina, etcétera).

El *comienzo de la acción evasiva* suele poder determinarse físicamente, por ejemplo, un poco antes (0,2 seg.) de donde comienzan las huellas de frenado incipientes, o 0,3 seg. antes de donde comienzan las huellas de frenado nítidas, o donde el móvil empieza a cambiar su trayectoria, etcétera.

También puede calcularse a partir de la posición final, considerando la distancia de frenado, como se indicó en el capítulo respectivo, o retrotrayendo la trayectoria previa al accidente, hasta su intersección con la trayectoria prevista, usando los radios de curvatura compatibles con el desvío, si lo hubo.

La relación entre el PCAE y el CAE brinda una medida de las demoras habidas durante el tiempo de respuesta mecánica.

9. ACCIÓN EVASIVA (AE)

Es toda acción realizada por un protagonista en la inminencia de un accidente, siendo su finalidad evitarlo o minimizar sus consecuencias.

Consiste en la modificación de alguno o algunos de los parámetros cinemáticos propios, o en el intento de corregir los de riesgo o peligro.

Los parámetros modificables son: velocidad, dirección y aceleración.

10. PUNTO DE IMPACTO (PDI)

El *impacto* se produce cuando interactúan fuerzas entre dos cuerpos en un lapso muy reducido, considerándose *punto de impacto* el sitio-instante en el que ocurre un impacto.

Siempre que existe un choque existe un impacto, y como ya hemos visto en el capítulo de microubicación, cada choque en sí presenta una sucesión de fenómenos, cuyos hitos son:

a) *Contacto inicial*.— Es el instante-sitio en el que comienzan a interactuar físicamente los cuerpos, es decir aquel donde y cuando las fuerzas de interacción comienzan a ser distintas de cero.

b) *Máximo contacto*.— Es el instante-sitio en el cual las fuerzas interactantes alcanzan su máximo valor, coincide con la máxima interpenetración de los cuerpos.

c) *Último contacto (o punto de desenganche)*.— Es aquel punto en el cual las fuerzas de interacción vuelven a tomar valor nulo; es decir, cuando los cuerpos se separan, dejan de estar en contacto.

Hay ocasiones en que esto no ocurre, cuando luego del impacto, los cuerpos quedan unidos.

Muy habitualmente se toma el punto de impacto como punto clave, y se le asigna el origen de coordenadas; pero como hemos visto que el impacto en sí presenta diferentes fases con diferentes efectos, se plantea la duda de determinar sobre cuál de ellas debe considerarse el *punto de impacto*.

En primera instancia aparece razonable aceptar como PDI el *punto de contacto inicial*, pero aparece la objeción de

que, al ser infinitésimas por definición, las fuerzas actuantes en este instante, las mismas no bastan para provocar efectos apreciables, y mucho menos para ocasionar daños que puedan dejar huellas útiles para su determinación.

Para que en un choque se produzcan efectos útiles para la determinación de su ubicación, las fuerzas interactuantes deben alcanzar un valor tal que supere el límite de rotura del material en algunos sitios.

Esto ocurre obviamente luego del contacto inicial, pero muy poco tiempo después (centésimas de segundo), por lo que, en general, el error que se comete por considerar el contacto inicial como punto de impacto (PDI) está muy por debajo del admisible.

Frecuentemente, en un accidente ocurren múltiples impactos, cada uno de ellos presenta por lo menos los dos primeros hitos mencionados, aunque generalmente se considera el primer impacto como PDI, dependiendo ello de cada caso.

11. PUNTO DE POSICIÓN FINAL (PDPF)

Es aquel sitio-instante de cada protagonista en la trayectoria posaccidente, donde su situación dinámica se estabiliza, es decir, donde las consecuencias inmediatas del accidente ya han ocurrido.

Si bien es cierto que comúnmente tal punto significa la detención o reposo de los protagonistas, no necesariamente es de esta manera.

Sea el caso de un embestimiento de peatón, con fuga del rodado, el cual no se detiene en las inmediaciones. En estos casos la posición final será aquella en la cual el conductor recupera el dominio de su móvil.

Éste, como algunos otros de los puntos accidentológicos, ha sido tratado también en la parte *reconstrucción*; aquí volvemos a mencionarlo, dada su importancia para el *análisis*.

Hasta aquí hemos definido distintos puntos accidentológicos, que con excepción del *punto clave* o *crítico*, se han presentado cronológicamente; en un análisis conviene volcarlos así en un croquis, para luego insertar el punto siguiente (*punto sin solución*) hacia atrás del *punto de impacto*, o del *punto clave*, según corresponda.

12. PUNTO SIN SOLUCIÓN (PSS)

Este elemento de la accidentología es sumamente útil para evaluar objetivamente la evitabilidad física de un accidente.

Aquel sitio-instante de la trayectoria previa de un protagonista, desde y a partir del cual la percepción óptima y las maniobras más adecuadas, realizadas correctamente por el sujeto, no pueden impedir que el accidente ocurra, se denomina *punto sin solución* (PSS).

A diferencia de los anteriores, no depende de las aptitudes o actitudes del protagonista de que se trate, ya que para su determinación se utilizan tiempos de percepción y reacción total estándar, y maniobras adecuadas, ejecutadas correctamente en un elemento mecánico sin fallas.

Dicho de otro modo, hasta llegar al PSS, cualquier persona habilitada para conducir, que perciba el riesgo, tendría posibilidad de evitar el accidente.

De todas las maniobras evasivas posibles a los efectos de determinar el PSS, entendemos que deben descartarse todas aquellas que impliquen certeza de daños o lesiones al protagonista que las ejecute (por ejemplo, chocar contra una pared para evitar el riesgo inicial), o aquellas que requieran habilidades especiales (como provocar un derrape controlado para forzar un giro a un radio menor que el crítico).

Para determinar el *punto sin solución* deben calcularse los lapsos y/o distancias que insumen las maniobras óptimas,

a los que deberán agregárseles los tiempos y distancias insumidos por el *tiempo de percepción y reacción total estándar*.

La distancia, y el intervalo temporal así obtenido, debe llevarse hacia atrás del punto de impacto, es decir, en sentido contrario a la dirección previa del protagonista de que se trate.

Ésta será la ubicación del PSS.

La comparación entre las posiciones relativas del PPP y el PSS (*punto de posible percepción y punto sin solución*, respectivamente) determina la *evitabilidad física del accidente*.

Si en la dirección del movimiento previo al accidente del protagonista en cuestión, encontramos que el *punto sin solución* precede al *punto de posible percepción*, estamos en presencia de un accidente físicamente inevitable, ya que ninguna acción realizada por este protagonista podría haber impedido el hecho nefasto, a lo sumo pudo, tal vez, disminuir sus consecuencias.

Por el contrario, si en las mismas circunstancias, el *punto de posible percepción* precede al *punto sin solución*, nos hallamos ante un accidente físicamente evitable, ya que existían posibilidades de ejecutar correctamente y a tiempo la o las maniobras adecuadas para que el accidente no se produjera.

Es dable ver que el método permite determinar objetivamente si un accidente ocurrido fue inevitable o no para cada uno de sus protagonistas, y establecer las causas inmediatas del mismo, a tal punto que sería factible realizar un programa de computación que lo hiciera. En eso estamos.

CAPÍTULO III

ACCIDENTE FÍSICAMENTE EVITABLE

Como ya hemos esbozado, la interrelación entre los puntos accidentológicos de *possible percepción* (PPP) y *sin solución* (PSS) nos permite la primera gran discriminación sobre si el accidente acaecido era evitable o no, en su entorno de ocurrencia, desde el punto de vista físico.

La interrelación entre y con los restantes *puntos accidentológicos* permite echar luz sobre las causas inmediatas del accidente.

1. ERRORES Y DEMORAS EN LA PERCEPCIÓN

Si el *punto de percepción efectiva* (PPE) es posterior (sobre la trayectoria del protagonista analizado) al *punto de posible detección* (PPD), podremos asegurar que la demora en la percepción fue, cuanto menos, con causa del accidente.

Las demoras en la percepción normalmente son causadas por desatención o distracción del protagonista (mirar el velocímetro insume unos 0,8 seg.), aunque pueden estar motivadas por diferentes problemas fisiológicos, tales como de-

fectos visuales (miopía, astigmatismo, estrechez del campo visual, falta de visión de un ojo, propensión al encandilamiento, pérdida de visión nocturna), defectos auditivos (sordera total o a alguna frecuencia), etcétera.

Otro elemento que incide en la demora o provoca errores en la percepción, es la *conspicuidad* del riesgo, es decir su calidad de hacerse visible o sobresalir.

Es obvio que es mucho más conspicuo un objeto amarillo que uno gris, en horas del amanecer, sobre una ruta gris o, en las mismas condiciones, un automóvil gris con sus luces encendidas que apagadas.

En la conspicuidad influyen muchos elementos: iluminación, color y textura del riesgo y del escenario, tamaño, etcétera.

Es posible que un riesgo, si bien visible, aparezca enmascarado o camuflado en el escenario en que se presenta, no denotando su condición.

Por lo dicho, conviene que el analista del accidente, para evitar indeterminaciones, tenga muy en cuenta este elemento al fijar el *punto de posible percepción*, haciéndolo ante el elemento real, y no fijándolo teóricamente; de este modo puede precisarse la incidencia del factor conspicuidad en la demora en la percepción.

2. ERRORES Y DEMORAS EN LA REACCIÓN

Si el lapso (y la distancia que conlleva) entre el *punto de posible percepción* y el de *respuesta* es superior al *tiempo de reacción*, estaremos en presencia de un retardo en la reacción; concausa, al menos, del accidente.

Recordemos que las etapas de la *reacción humana* son: *identificación, evaluación, decisión y respuesta*.

En cualquiera de ellas pueden ocaionarse demoras y/o errores, los que pueden concatenarse.

Muchas veces, en una ruta, se duda durante un tiempo si el automóvil que se divisa a lo lejos viene o va, lo que provoca demora en el *TR*, imputable a la etapa de identificación; si se estima que se aleja, cuando en realidad se acerca, se comete error en esta etapa.

Durante la *evaluación* se decide si lo que se ha detectado e identificado, constituye o no un riesgo, y su grado o posibilidad de convertirse en peligro, ponderando sus posibles conductas.

Obviamente, considerar que no es un riesgo un peatón que se dispone a cruzar la calle por la que circulamos, es un error de evaluación, y permanecer dudando sobre si lo es, provoca demora o retardo.

La ignorancia puede ser asimilable a un error de evaluación siendo el ejemplo más inmediato el desconocer el significado de una señal; imaginemos a alguien que no conozca el código de luces de los semáforos, como la mayoría de nosotros ignoramos las señales marineras.

Algunas patologías, como el daltonismo, provocan errores de evaluación.

La etapa de *decisión* insume un tiempo, tanto mayor cuanto más compleja o desconocida sea la situación planteada, por lo que ya se ha detectado, identificado y evaluado.

Naturalmente, la decisión puede ser errónea; por ejemplo, se decide tocar bocina en vez de detenerse, y puede demorarse en exceso.

Generalmente las demoras en la decisión se deben a inexperiencia ante la situación o ante el arte de conducir.

Finalmente, el cerebro ordena hacer lo que se ha decidido (durante la etapa de respuesta). Aquí pueden aparecer demoras o errores, todos imputables a cuestiones fisiológicas: dolores o claudicación de miembros que impidan realizar prestamente lo ordenado por el cerebro; falta de control o coordinación neuromotora; ausencia del vigor necesario para realizar alguna maniobra; etcétera.

Debe notarse que sólo excepcionalmente podrán fijarse los sitios-instantes donde comienzan y terminan las etapas

de la reacción humana; además, como ya se dijo, pueden superponerse, por lo que si se comprueban demoras en la reacción, generalmente no podrá especificarse a cuál de ellas se debe.

En cambio, con cierta frecuencia es posible detectar errores atribuibles a alguna o algunas de las etapas de la reacción.

3. ERRORES Y DEMORAS EN LA RESPUESTA MECÁNICA

El tiempo y/o la distancia transcurridos desde el fin del *tiempo de reacción* (TR), y hasta el *comienzo de acción evasiva* (CAE), es lo insumido por la *respuesta mecánica* (TRM). Durante este lapso pueden ocurrir demoras y/o fallas.

Cuando comprobemos que el TRM resultó demasiado largo, sabremos que ésta fue, por lo menos, una de las causas del accidente.

Los seres humanos podemos cometer errores y demoras dentro de esta etapa: apretar equivocadamente un pedal, mover los miembros demasiado lentamente, paralizarse por el pánico, etcétera.

Los elementos mecánicos pueden fallar, o actuar retardadamente: los sistemas del acelerador pueden trabarse, y continuar acelerando cuando se suelta el pedal; el freno mal regulado puede demorar el inicio del frenado; por diversas fallas del sistema pueden no actuar los frenos; el volante de dirección puede tener demasiado recorrido neutro (juego) antes de accionar efectivamente el sistema de dirección, etcétera.

Debe recordarse que al fin de la *respuesta mecánica* concluyen tanto el *tiempo de reacción total* (TRT), como el *tiempo de percepción y reacción total* (TPRT), por lo que si no se han podido discriminar puntos intermedios, por lo menos se podrá encontrar si ha habido demoras globales, ya sea en el TRT, como en el TPRT, con lo cual, si hubo demora, quedará

abierto el abanico de posibles causas o concausas del accidente, sin poder determinarse a ciencia cierta, cuál o cuáles han sido más operativas.

Aun así, en muchos casos es frecuente detectar errores imputables a alguna de las etapas, inclusive sin poder ubicar a éstas físicamente.

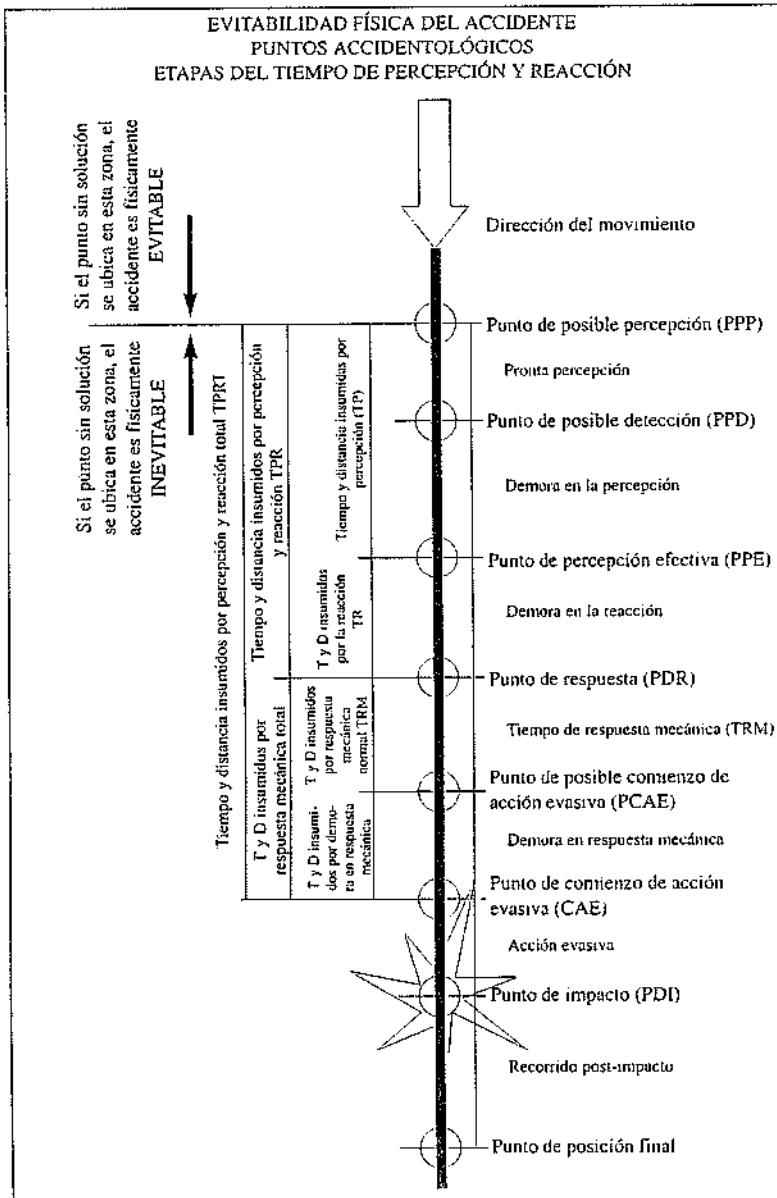
4. ACCIDENTE FÍSICAMENTE INEVITABLE

Ya hemos dicho que cuando aparece un riesgo luego de haber sobrepasado un protagonista su *punto sin solución*, el accidente se torna inevitable para este protagonista.

Ahora bien, que el accidente haya sido inevitable no significa necesariamente que la magnitud de sus consecuencias (daños y/o lesiones) no pudiese disminuirse.

Análogamente al accidente físicamente evitable, en cada caso habrá que analizar el *tiempo de percepción o detección*, para saber si ésta fue o no tardía; el *tiempo de reacción*, para determinar si la misma no fue retardada; el *tiempo y distancia de respuesta mecánica*, para conocer si ella no fue demasiado larga, por defectos mecánicos y/o neuromotrices del protagonista; la *maniobra evasiva*, para saber si fue la adecuada, es decir, la que minimizó las consecuencias y si fue correctamente ejecutada (con qué grado de perfección fue realizada).

Por ejemplo, el accidente podría haber tenido menores consecuencias si: hubiera habido menor demora en la percepción; y/o el tiempo de reacción hubiese sido menor; y/o hubiese habido menor juego en el volante de dirección; y/o hubiese habido menor recorrido neutro en el pedal de freno; y/o el conductor hubiese movido más rápido sus miembros; y/o se hubiese girado en vez de frenar; y/o se hubiese modulado el freno en vez de bloquear las ruedas.



CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE MANIOBRAS

En ambos tipos de accidentes (evitables e inevitables) es posible evaluar la maniobra evasiva intentada —la ausencia de maniobra evasiva debe ser considerada a estos fines como maniobra voluntaria—, para lo cual nos valdremos del análisis del *área de maniobras posibles* y su relación con las maniobras realizadas.

1. ÁREA TEÓRICA DE MANIOBRAS POSIBLES

Como ya hemos dicho, un accidente es físicamente una coincidencia témporo-espacial de dos cuerpos o móviles.

Cada móvil tiene asociados los parámetros cinemáticos variables en cada instante: posición, dirección, velocidad y aceleración.

Es factible, en cada caso, determinar la posible ubicación de cada móvil en el instante del impacto si las variables se hubiesen modificado desde el instante-sitio en que fue posible hacerlo para evitar o minimizar el accidente.

El conjunto de todas las posiciones posibles determina un área limitada por los puntos que podría haber alcanzado el móvil en el instante del impacto, si a partir del instante del fin del *tiempo de reacción total*, se hubiese aplicado la máxima variación posible en los parámetros mencionados.

El estudio de ésta, llamada *área teórica de maniobras posibles*, permite evaluar lo adecuado de la maniobra evasiva intentada y eventualmente la perfección de su ejecución.

2. DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DEL ÁREA DE MANIOBRAS POSIBLES

A partir del final del TRT y hasta el instante del accidente transcurre un tiempo "t".

El móvil animado inicialmente con una velocidad "V", llegará en el lapso "t" a una distancia mínima "d", dada por:

$$d = (V \cdot t) - (0,5 \cdot DA \cdot t^2)$$

donde DA es la máxima desaceleración posible o distancia de frenado, y

$$d = 0,5 \cdot V^2 / (\mu \cdot g)$$

La distancia mínima a considerar será la de menor valor de las dos anteriores.

En "t" también podrá alcanzar la distancia máxima "D", siendo

$$D = (V \cdot t) + (0,5 \cdot A \cdot t^2)$$

"A" es la máxima aceleración posible.

También en el tiempo "t" podría haber recorrido una distancia $DL = V \cdot t$, girando a ambos lados sobre una circunferencia de radio tendremos:

$$R = V^2 / (\mu \cdot g)$$

donde " μ " es el coeficiente de rozamiento lateral, y "g" la aceleración de la gravedad. "R" es el radio mínimo del giro que se puede describir a la velocidad "V", so riesgo de derrape y/o vuelco.

Si bien en aras de la perfección habría que determinar las posiciones de máxima para combinaciones de giro y aceleración, o de giro y desaceleración (para las que son necesarios formuleos mucho más complicados, por la interacción entre deslizamiento y radio crítico), y salvo que aparezcan situaciones muy dudosas cercanas a los extremos, basta unir los cuatro puntos inicialmente descriptos con líneas rectas, para obtener los límites buscados.

El cuadrilátero así determinado es una muy buena aproximación del área teórica de maniobras posibles.

3. ÁREA REAL DE MANIOBRAS POSIBLES

Esta área de maniobras es teórica, ya que supone ausencia de obstáculos a los desplazamientos en todas direcciones; como en la realidad difícilmente se den esas circunstancias, habrá que recortar dicha área con los obstáculos existentes, en cada caso: construcciones, zanjas, columnas, vehículos, etcétera.

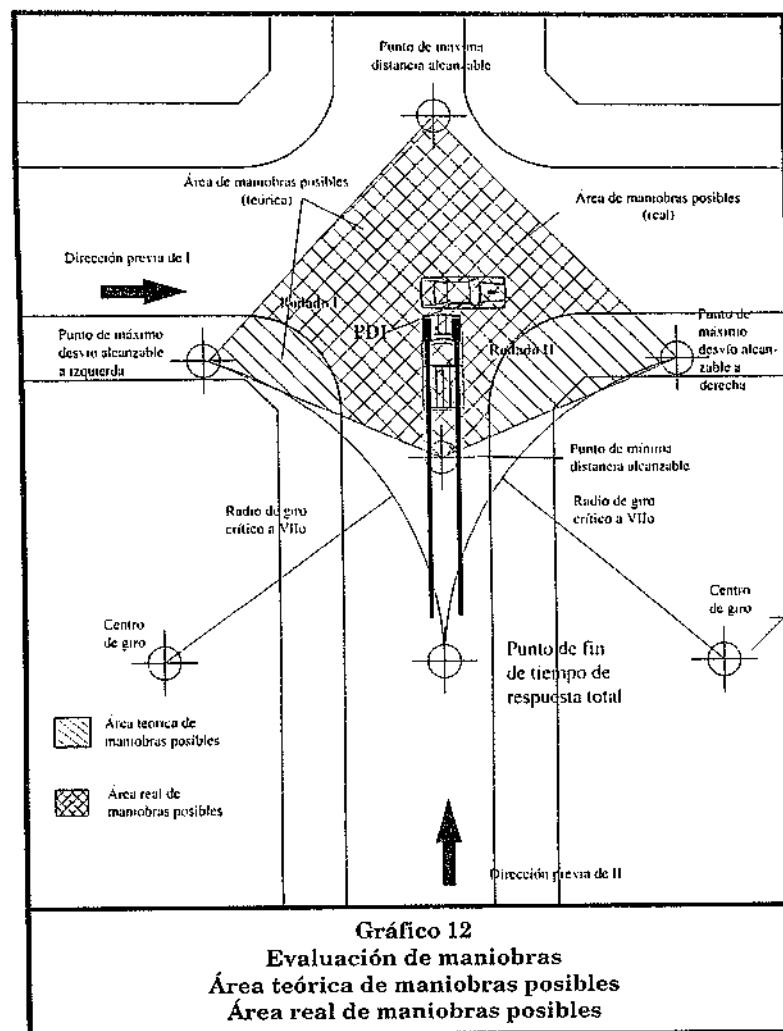
Una vez delimitada el área real de maniobras posibles, por sus límites teóricos y físicos, y graficada a escala, es conveniente superponerle la maniobra realizada por el protagonista en cuestión.

Esto permite evaluar lo adecuado de la maniobra elegida (en función de si fue la que minimizó las consecuencias del accidente).

Si resultara necesario evaluar la calidad de ejecución de una maniobra, por ejemplo para determinar si se frenó ade-

cuadamente, debe procederse a realizar un análisis similar al del área de maniobras posibles, limitado a la maniobra en cuestión (es decir, fijar sus límites teóricos y morfológicos) y tomándolas a partir del punto CAE (comienzo de la acción evasiva) realizada por el protagonista en cuestión. Tal cosa nos permitirá evaluar lo perfecto de su ejecución (es decir, cuánto se acerca a la mejor maniobra posible, la que en realidad se realizó).

Como vemos, el método no sólo nos da la ya importante información sobre si el accidente era evitable o no, sino también dónde pudieron existir las fallas y errores que llevaron al mismo, y en qué consistieron.



TERCERA PARTE
APLICACIONES PRÁCTICAS
EN RECONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS
DE ACCIDENTES

CAPÍTULO PRIMERO
CINEMÁTICA. DINÁMICA

Previamente al desarrollo de cualquiera de los temas que enuncia el capítulo, resulta menester destacar el hecho de que las velocidades, aceleraciones, fuerzas, momentos, etc., son elementos de carácter vectorial, es decir que además de su magnitud (módulo), se definen también por su dirección, sentido y punto de aplicación, en función de lo cual se deberán considerar de esta manera cada vez que se plantee la interacción de los mismos.

1. CINEMÁTICA (*estudio del movimiento*)

a) *Movimiento rectilíneo uniforme.*— En este movimiento la velocidad y la dirección no varían con el transcurso del tiempo, es decir que el mismo se encuentra animado por una velocidad constante a la cual circula un móvil que recorre una distancia determinada en un lapso fijo:

$$V=D/T$$

“V”: velocidad constante (*unidades*: km/h, m/s, m/h, nudos);

“D”: distancia que recorre el móvil que circula a velocidad constante (*unidades*: m, km, yarda, milla);

“T”: tiempo que insume el móvil en recorrer una distancia a una velocidad constante (*unidades*: seg, min, hora).

b) *Movimiento rectilíneo variado*.— Este movimiento se caracteriza por sufrir modificaciones de velocidad en su magnitud, aunque su dirección permanece constante.

La *velocidad media* es la sumatoria del producto de cada velocidad instantánea (V_i) por su lapso de duración (T_i), dividida por el lapso total:

$$V = (V_1 \cdot T_1) + (V_2 \cdot T_2) + \dots + (V_n \cdot T_n) / (T_1 + T_2 + \dots + T_n)$$

Es la velocidad constante a la cual el móvil hubiese recorrido la misma distancia que la que recorrió en un lapso determinado a las distintas velocidades en que lo hizo.

Cabe aclarar que los conceptos de velocidad media y velocidad constante son esencialmente distintos, siendo esta última una magnitud que no se modifica con el tiempo, mientras que la velocidad media resulta del promedio ponderado de las distintas velocidades instantáneas a las que pudo circular el móvil.

Ello implica que si se recorren cien kilómetros en una hora, la velocidad media es de 100 km/h, aunque éstos pudieron recorrerse a 80 km/h durante media hora y a 120 km/h durante otra media hora, o bien a 70 y 130 respectivamente, etcétera.

La variación de velocidad ocurrida en un lapso determinado se denomina *aceleración media*:

$$a = (V_f - V_i) / T$$

“a”: aceleración media (*unidades*: m/s²);

“V_f”: velocidad al cabo del lapso “T”;

“V_i”: velocidad al inicio del lapso “T”.

Si la aceleración es positiva el movimiento se está acelerando; por el contrario, si es negativa se está retardando (la aceleración se toma con su signo).

Velocidad final “V_f”, a la que se llega tras aplicar una aceleración “a”, durante un lapso “T”, a un móvil que circulaba con velocidad “V_i”:

$$V_f = V_i + (a \cdot T)$$

Tiempo “T” que insume pasar de una velocidad inicial “V_i” a una final “V_f”, aplicando una aceleración “a”:

$$T = (V_f - V_i) / a$$

Velocidad media “V”: si la aceleración es constante en un lapso “T”, la velocidad media en ese lapso puede tomarse como:

$$V = (V_f + V_i) / 2$$

En este caso, como

$$D = V \cdot T$$

resulta:

$$D = (V_f + V_i) T / 2$$

Distancia recorrida por un móvil, animado inicialmente

por una velocidad "V_i", al que se le aplica una aceleración constante "a", durante un lapso "T":

$$D = (V_i \cdot T) + (0,5 \cdot a \cdot T^2)$$

Tiempo "T", que le insume a un móvil, animado con velocidad inicial "V_i", recorrer una distancia "D", si se le aplica una aceleración "a":

$$T = \{-V_i \pm [V_i^2 - (2 \cdot a \cdot D)]^{0,5}\} / a$$

Velocidad inicial "V_i", a la que hubo de estar animado un móvil, para que aplicándosele una aceleración "a", durante un lapso "T", recorriese una distancia "D":

$$V_i = [D - (0,5 \cdot a \cdot T^2)] / T$$

Aceleración "a", que hubo de aplicársele a un móvil, animado con velocidad inicial "V_i", durante un tiempo "T", para que recorriese una distancia "D":

$$a = 2[D - (V_i \cdot T)] / T^2$$

Velocidad final "V_f" de un móvil, animado con velocidad inicial "V_i", al que se le aplica una aceleración constante "a", en el recorrido de una distancia "D":

$$V_f = [V_i^2 + (2 \cdot a \cdot D)]^{0,5}$$

Velocidad inicial "V_i", a la que hubo de estar animado un móvil, para que, aplicándosele una aceleración "a", durante una distancia "D", llegase a tener una velocidad final "V_f":

$$V_i = [V_f^2 - (2 \cdot a \cdot D)]^{0,5}$$

Un caso útil y particular de lo expuesto precedentemente, se presenta cuando V_f=0 (detención) y la aceleración "a" es negativa (desaceleración o frenado), entonces:

$$V_i = (2 \cdot a \cdot d)^{0,5}$$

Aceleración "a", necesaria para variar la velocidad de "V_i" a "V_f" en una distancia "D":

$$a = (V_f^2 - V_i^2) (0,5 / D)$$

Distancia "D", necesaria para que una aceleración "a" varíe la velocidad de un móvil de "V_i" a "V_f":

$$D = (V_f^2 - V_i^2) (0,5 / a)$$

c) *Movimiento circular uniforme.*— En este movimiento no se modifica el valor de la velocidad angular, la cual es igual al ángulo recorrido por el radio, al extremo del cual se ubica el móvil en un lapso determinado:

$$\omega = \alpha \cdot T$$

" ω ": velocidad angular (*unidades: grados/seg, radianes/seg, revoluciones por minuto, etcétera*);

" α ": ángulo recorrido por el radio;

" R ": radio;

" T ": lapso.

Las permutaciones de la ecuación anterior permiten hallar cualquiera de los tres parámetros — ω , α , T —, conociendo los otros dos.

Velocidad tangencial “ V_t ” es la velocidad lineal del móvil al extremo del radio “ R ”:

$$V_t = \omega \cdot R; \text{ o } V_t = \alpha \cdot R/T$$

(unidades: m/s, km/h, etcétera).

Aceleración centrípeta o radial “ A_c ” (dirigida perpendicularmente a “ V_t ” y con sentido hacia el centro de giro).

$$A_c = V_t^2/R$$

d) *Movimiento circular variado*.— En este movimiento, con el transcurso del tiempo se modifica la velocidad angular.

La aceleración angular media “ γ ” es la variación de velocidad angular “ ω ” ocurrida en un lapso “ T ”.

$$\gamma = (\omega_f - \omega_i)/T$$

(unidades: grado/seg², etcétera).

La aceleración tangencial “ A_t ” es la variación de la velocidad tangencial “ V_t ” ocurrida en el lapso “ T ”:

$$A_t = (V_{tf} - V_{ti})/T$$

(unidades: m/seg², etcétera).

Aceleración radial o centrípeta:

$$A_c = V_t^2/R$$

(unidades: m/seg², etcétera).

Aceleración total:

$$A = (A_c^2 + A_t^2)^{0.5}$$

Es importante recordar que el *movimiento más general de un cuerpo es una composición de traslaciones y rotaciones*, el cual sufre la aceleración “ a ” de su centro de gravedad y una aceleración angular ($\gamma = m/J$) alrededor de éste, donde “ m ” es el momento de las fuerzas exteriores respecto del centro de gravedad, y “ J ” el momento de inercia del cuerpo respecto del eje perpendicular al plano y que pasa por dicho centro.

2. DINÁMICA (*estudio de las causas del movimiento*)

a) *Leyes fundamentales de la dinámica*.— Éstas fueron formuladas por Newton.

— *Primera ley de Newton (principio de inercia)*. Todo cuerpo mantiene su estado de movimiento (en reposo o movimiento rectilíneo uniforme), a menos que sobre él actúe una fuerza. Esta propiedad se denomina *inercia*, siendo la masa su medida, la cual representa la cantidad de materia de un cuerpo.

Fuerza es la causa del cambio de estado de movimiento (aceleración) de los cuerpos.

Debemos recordar que tanto las aceleraciones como las fuerzas son magnitudes vectoriales, por lo cual en sus interacciones se deben tratar como tales.

— *Segunda ley de Newton (relación entre fuerza, masa y aceleración)*. La aceleración “ a ” producida por la acción de la fuerza “ F ” sobre un cuerpo de masa “ M ”, es de magnitud pro-

porcional a "F", e inversamente proporcional a la masa, siendo su dirección paralela a la de la fuerza:

$$a=F/M$$

Operando en esta ecuación, obtenemos la siguiente forma:

$$F=M.a$$

— *Tercera ley de Newton (principio de acción y reacción).* A toda acción se le opone siempre una reacción igual en magnitud y dirección pero de sentido contrario. Ello implica la imposibilidad de la existencia de fuerzas aisladas, ya que cuando un cuerpo ejerce una acción (fuerza) sobre otro, éste ejerce sobre el primero una reacción igual en magnitud y dirección, pero de sentido contrario.

UNIDADES DE MASA Y DE FUERZA EN LOS DISTINTOS SISTEMAS			
UNIDADES	SISTEMAS	Técnico	
<i>De masa</i>	CGS gramo (g)	MKS kilogramo (kg)	Unidad técnica de masa (UTM); UTM=Kgr.s ² /m
<i>De fuerza</i>	dina (din) din=g.cm/s ²	newton (N) N=Kg.m/s ²	kilogramo fuerza (Kgr)

Es muy importante no confundir el kilogramo masa (Kg), que es una unidad de masa, con el kilogramo fuerza (Kgr), que es una unidad de fuerza.

Un cuerpo de masa $M=1$ Kg, a nivel del mar y a 45° de latitud, pesa 1 Kgr, pero ello no significa que la masa sea igual al peso.

Debe trabajarse siempre con unidades homogéneas.

ALGUNAS EQUIVALENCIAS

De masa	De fuerza
1 Kg = 1000 g	1 Kgr = 1000 gr
1 Kg = 0,102 UTM	1 Kgr = 9,8 N
1 g = 0,001 Kg	1 Kgr = 9,8.10 ⁵ din
1 g = 102.10 ⁻⁶ UTM	1 N = 105 din
1 UTM = 9800 g	1 N = 102.10 ³ Kgr
1 UTM = 9,8 Kg	1 N = 102 gr

b) *Principio de conservación de la energía.*— En el universo no se crea ni se destruye energía, sólo se transforma de una clase en otra, o bien se transfiere de un cuerpo a otro, permaneciendo *constante* la energía total:

$$EC+ET+EP+EQ+ED+\dots = Cte.$$

donde EC = energía cinética (*función de la masa y la velocidad*);

ET = energía de trabajo (*función de la fuerza y la distancia*);

EP = energía potencial (*función de la condición*);

EQ = energía calorífica (*función calórica*);

ED = energía de deformación (*función de la estructura y los materiales*).

Existen asimismo otras formas de energía, representadas por "...", y en cualquier sistema la sumatoria de las variaciones de energía es nula:

$$\Delta EC+\Delta ET+\Delta EP+\Delta EQ+\Delta ED+\dots=0$$

donde Δ = *variación*.

Se denomina energía *cinética* al producto entre la mitad de la masa "M" de un móvil y el cuadrado de su velocidad:

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

y representa la energía que posee un cuerpo debido a la velocidad que lo anima.

En un movimiento plano, en general la energía cinética es:

$$E_c = 0,5 [(M \cdot V^2) + (J \cdot \omega^2)]$$

donde "J" es el momento de inercia del cuerpo con respecto a su centro de gravedad (G), "V" es la velocidad de "G" y "ω" es la velocidad angular de rotación alrededor de "G".

Energía de *trabajo*, o simplemente *trabajo*, es el producto entre la componente de la fuerza "F" que actúa sobre el móvil, en la dirección de su movimiento, y la distancia "D" que se mueve el móvil:

$$ET = F \cdot D$$

Representa la energía insumida por esa fuerza en ese movimiento.

El *trabajo* a considerar en la reconstrucción de accidentes es el realizado por las fuerzas de rozamiento "FR", la más importante de las cuales está constituida por el rozamiento de los neumáticos contra el pavimento durante el frenado:

$$FR = \mu \cdot P$$

donde "μ" es el coeficiente de rozamiento, y "P" el peso del móvil.

Con respecto a la energía *potencial*, diremos que existe de muchos tipos: gravitatoria; nuclear; eléctrica; magnética;

elástica, etc., y que todas ellas tienan en común el hecho de que responden a la *condición*. De tal modo, hay dos que son de utilidad en la reconstrucción de accidentes (gravitatoria y elástica), y que dependen, en el primer caso de la altura y en el segundo del grado de deformación elástica de los materiales.

Para el estudio de la *energía potencial elástica* remitimos a la parte de esta obra en que se desarrolla la *energía de deformación*.

La energía potencial gravitatoria de un objeto es igual al producto entre su peso y la altura que tiene sobre un plano de referencia:

$$EP = P \cdot H$$

donde "EP" es la energía potencial gravitatoria, siendo "P" el peso y "H" la altura.

La energía *calórica*, o simplemente *calor*, en la enorme mayoría de los casos de accidentes es totalmente despreciable, por su escasa magnitud frente a los otros tipos de energía, e inclusive frente a las posibles inexactitudes cometidas en las mediciones.

En todos los casos depende de las masas de los cuerpos involucrados, de sus temperaturas y de la distribución de las mismas.

Siempre que hay interacción entre dos cuerpos reales, existen deformaciones de los mismos, tanto elásticas como plásticas, produciéndose modificaciones de las temperaturas, por las distintas transformaciones energéticas internas que generan calor, el que habitualmente se disipa hacia el medio ambiente.

La energía de *deformación* está integrada por sus dos componentes: energía de deformación *elástica* y energía de deformación *plástica*.

La primera es una energía potencial, es decir que al restaurarse las condiciones iniciales restituirá la energía alma-

cenada, difiriendo entonces de la segunda, por cuanto la deformación plástica insumió energía para modificar el estado interno del material.

En general, en los casos de accidentes viales esta energía de deformación dista mucho de ser despreciable, pero como depende de una infinidad de factores concurrentes, no factibles de determinación precisa, salvo en algunas oportunidades muy especiales en las que se pueden aceptar determinados supuestos, suele ser de cálculo imposible. Debido a la importancia que el tema reviste, en este libro se trata por separado.

En función de lo expuesto, en los casos de reconstrucción de accidentes tenemos:

$$\Delta E_C + \Delta E_T + \Delta E_D + \Delta E_P + \Delta E_Q = 0 \quad ("X")$$

como:

$$\Delta E_c = 0,5 \{ [(M.V_f^2) + (J.\omega_f^2)] - [(M.V_i^2) + (J.\omega_i^2)] \}$$

y

$$\Delta E_T = \mu \cdot P \cdot D = \mu \cdot M \cdot g \cdot D$$

ya que

$$P = M \cdot g$$

siendo "g" la aceleración de la gravedad = 9,81 m/seg²; y

$$\Delta E_P = P(H_f - H_i) = M \cdot g \cdot (H_f - H_i)$$

y como ΔE_Q normalmente es despreciable frente a las otras energías puestas en juego, obtenemos entonces la forma:

$$0,5 \{ [(M.V_f^2) + (J.\omega_f^2)] - [(M.V_i^2) + (J.\omega_i^2)] \} + (M.g) [(\mu \cdot D) + (H_f - H_i)] + \Delta E_D = 0$$

que es una de las ecuaciones más útiles en la reconstrucción y sobre la que volveremos, aplicándola a distintas situaciones.

c) *Principio de las fuerzas vivas.*— Este principio enuncia que la variación de la energía cinética es igual al trabajo de las fuerzas que actúan, lo cual, como vemos, es un caso particular del *principio de conservación de la energía*, cuando no intervienen otras energías, es decir que en la ecuación "X"

$$\Delta E_D = 0 \text{ y } \Delta E_Q = 0$$

siendo su expresión

$$\Delta E_c = E_T$$

por lo tanto:

$$0,5 \{ [(M.V_f^2) + (J.\omega_f^2)] - [(M.V_i^2) + (J.\omega_i^2)] \} = (M.g) [(H_f - H_i) - (\mu \cdot D)]$$

En determinadas circunstancias, tanto uno como otro principio nos permitirán determinar velocidades o distancias de frenado, o bien otros parámetros útiles para la reconstrucción del accidente.

d) *Principio de conservación de la cantidad de movimiento.*— La cantidad de movimiento "CM" de un cuerpo es una magnitud vectorial definida como el producto de su masa por su velocidad:

$$CM = M \cdot V$$

En el caso general de movimiento rototraslatorio, tenemos:

$$CM = (M \cdot V) + (J \cdot V_t)$$

donde "J" es el momento de inercia del cuerpo.

Cuando la sumatoria de las fuerzas exteriores al cuerpo es cero, la cantidad de movimiento permanece constante:

$$CM = \text{Cte.}, \text{ si } FE = 0$$

o dicho de otro modo:

$$\Delta CM = 0$$

lo cual quiere decir que si no actúan fuerzas exteriores, entonces:

$$(M \cdot V_f) - (M \cdot V_i) = 0$$

e) *Impulso y cantidad de movimiento.*— Las fuerzas que actúan durante tiempos muy breves se denominan *impulsivas*; son las fuerzas típicas actuantes en un choque.

Se denomina impulso "I" al producto entre la fuerza actuante "F" y la duración temporal " Δt " de esa acción. También es una magnitud vectorial, con dirección y sentido iguales a los de la fuerza:

$$I = F \cdot \Delta t$$

Un impulso "I" provoca una variación en la cantidad de movimiento " ΔCM " del cuerpo sobre el que es aplicado:

$$I = \Delta CM$$

Nótese que:

$$(\Delta CM) / (\Delta t) = F$$

f) *Momento de la cantidad de movimiento.*— El momento de la cantidad de movimiento "MCM" (producto entre la cantidad de movimiento de un cuerpo y su distancia "D" a un eje) de un sistema de puntos, es igual a la suma de los momentos de cantidad de movimiento de cada uno:

$$MCM_t = MCM_1 + \dots + MCM_n$$

El momento de la cantidad de movimiento de un cuerpo, en movimiento rototraslatorio, indica que:

$$MCM = (M \cdot V \cdot D) + (M \cdot J \cdot \omega)$$

donde "J" es el momento de inercia respecto del eje de rotación, y " ω " es la velocidad de rotación alrededor del mismo.

Cuando sobre el sistema no actúan fuerzas o momentos exteriores "ME", el momento de la cantidad de movimiento permanece constante, es decir que su variación es nula:

$$MCM = \text{Cte.}, \text{ si } F_e = 0, \text{ o } ME = 0$$

$$\Delta MCM = 0, \text{ si } F_e = 0, \text{ o } ME = 0$$

g) *Momento de impulso.*— El momento de impulso "MI" (producto entre el momento de las fuerzas exteriores "ME" y el lapso de su acción) es igual a la variación del momento de la cantidad de movimiento:

$$MI = ME \cdot \Delta t$$

$$MI = \Delta MCM$$

Nótese que:

$$(\Delta MCM) / \Delta t = ME$$

Asimismo, puede demostrarse que:

$$ME = \gamma \cdot J$$

si "J" es constante.

h) *Principio del centro de masa o gravedad.*— Cuando un sistema se encuentra sometido a la acción de fuerzas, su centro de gravedad se mueve como si todas las fuerzas estuvieran aplicadas sobre él.

i) *Choque.*— Decimos que tiene lugar un choque cuando una fuerza finita actúa durante un lapso muy pequeño, de manera que el producto entre ambos sea también una cantidad finita.

Durante un choque el lapso de interacción de los cuerpos en colisión es " Δt " para ambos, y las fuerzas actuantes son iguales y contrarias, así como también lo son sus respectivos impulsos y las variaciones de las cantidades de movimiento, lo cual implica que la variación total de la cantidad de movimiento es nula; siendo nula tal variación las fuerzas de choque son internas al sistema. En función de todo ello, emerge que durante un choque no se modifica la cantidad de movimiento del sistema.

Lo mismo ocurre cuando las fuerzas externas al sistema son insignificantes frente a las de choque o impulsivas.

En una clasificación mecánica de los choques, podemos decir que cuando en uno de ellos se conserva la energía cinética, nos encontramos en presencia de un choque *elástico*; cuando, por el contrario, la precitada no se conserva íntegramente, estamos frente a un choque *inelástico*; finalmente, cuando los cuerpos quedan unidos luego del choque, se entiende que el mismo es *completamente inelástico o plástico*.

Los choques reales son siempre *inelásticos*, aunque en algunos supuestos se puedan tratar como *elásticos*.

Siendo dos cuerpos de masas " M_1 " y " M_2 ", y sus respectivas velocidades antes del choque " V_{1i} " y " V_{2i} ", cabe efectuar el análisis de las distintas posibilidades de choque existentes.

1. *Choque central.* Cuando las direcciones de los movimientos —inmediatamente antes del choque— pasan por los centros de gravedad —o masa— de los cuerpos, nos encontramos ante un choque *central*.

Por tratarse de un choque *perfectamente inelástico*, los cuerpos permanecen unidos luego del mismo, siendo la masa final:

$$M_f = M_1 + M_2$$

Como la cantidad de movimiento del sistema (CM) es constante, resulta:

$$CM = CM_1 + CM_2 = (M_1 \cdot V_{1i}) + (M_2 \cdot V_{2i}) = M_f \cdot V_f = (M_1 + M_2) \cdot V_f$$

siendo " V_f " la velocidad final de los cuerpos unidos, y que despejándola de la ecuación planteada obtenemos:

$$V_f = [(M_1 \cdot V_{1i}) + (M_2 \cdot V_{2i})] / (M_1 + M_2)$$

Debe destacarse que en choques que no sean *perfectamente elásticos*, la energía cinética no se conserva (disipada como calor y/o trabajo de deformación), siendo su valor en este caso:

$$\Delta E_c = 0,5 (M_1 \cdot M_2) (V_{1i} - V_{2i})^2 / (M_1 + M_2)$$

Como se dijo, la mayoría de los choques reales entran en la categoría de *imperfectamente elásticos*, en los que parte de

la energía cinética se transforma en calor o trabajo de deformación plástica, pudiendo demostrarse que las velocidades finales de los móviles serán:

$$V_{1f} = \frac{[(M_1 \cdot V_{1i}) + (M_2 \cdot V_{2i})] - [M_2 k(V_{1i} - V_{2i})]}{(M_1 + M_2)}$$

$$V_{2f} = \frac{[(M_1 \cdot V_{1i}) + (M_2 \cdot V_{2i})] - [M_1 k(V_{2i} - V_{1i})]}{(M_1 + M_2)}$$

donde "k" es la relación entre las velocidades relativas de los cuerpos antes y después del choque:

$$k = (V_{2f} - V_{1f}) / (V_{1i} - V_{2i})$$

El valor "1" del *coeficiente de restitución* (k) indica que nos encontramos ante un choque perfectamente elástico, mientras que cuando vale "0", el choque es totalmente plástico.

Distintos experimentos han demostrado que para un mismo material, "k" varía con la velocidad de choque.

Para estructuras automotrices, la bibliografía internacional toma el valor de "k" entre 0,1 y 0,2; como vemos, se trata de choques mucho más cercanos a lo plástico que a lo perfectamente elástico. En tal caso, la energía cinética disipada como calor y/o trabajo de deformación vale:

$$\Delta E_c = 0,5(M_1 \cdot M_2)(V_{1i} - V_{2i})^2(1 - k^2) / (M_1 + M_2)$$

En los choques perfectamente elásticos, los cuerpos quedan separados luego del choque, con velocidades V_{1f} y V_{2f} respectivamente, pudiendo demostrarse que estas velocidades serán:

$$V_{1f} = \frac{[(M_1 - M_2)V_{1i} + (2M_2 \cdot V_{2i})]}{(M_1 + M_2)}$$

$$V_{2f} = \frac{[(M_2 - M_1)V_{2i} + (2M_1 \cdot V_{1i})]}{(M_1 + M_2)}$$

Debemos recordar que, por definición, en este caso no existe variación de energía cinética.

2. *Choque excéntrico.* Decimos que un choque es excéntrico cuando las direcciones de los movimientos —inmediatamente antes del choque— *no* pasan por los centros de gravedad —o masa— de los cuerpos.

En relación con este tipo de choque, y con respecto al movimiento rototraslatorio, se deben plantear la cantidad de movimiento para cada cuerpo, y el momento de la cantidad de movimiento, también para cada cuerpo, y en ambos casos para antes y después del choque:

$$\Delta CM = 0
(variación nula de la cantidad de movimiento
en el choque)$$

$$\Delta MCM = 0
(momento de la cantidad de movimiento nulo
para el choque)$$

debiendo considerar los momentos de inercia de cada cuerpo con respecto a su eje de rotación, así como sus respectivas velocidades angulares respecto de cada eje y distancias de cada cuerpo con respecto a su eje de rotación.

Es útil usar el concepto de *masa reducida*: "m":

$$m = J/D$$

reemplazándola por "M" en las fórmulas de choque central, junto con:

$$V \equiv D \cdot \omega$$

lo cual permite plantear ecuaciones análogas.

Cuando el choque ocurre en más de una dimensión, suele no bastar la cantidad de ecuaciones planteadas para obtener una solución (cabe recordar que por ser ecuaciones de magnitudes vectoriales, cada una puede descomponerse en tres, según cada uno de los planos de referencia), aunque a veces, en movimientos bidimensionales con sólo dos cuerpos, alcanza con plantear los ángulos de incidencia pre y posimpacto.

CAPÍTULO II

DEFORMACIONES Y VELOCIDAD

1. ENERGÍA DE DEFORMACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD POR DEFORMACIONES REMANENTES

Ya hemos mencionado que uno de los parámetros fundamentales a determinar por la reconstrucción, es la velocidad —y sus variaciones— de cada protagonista.

Infelizmente, no siempre se dispone de los elementos necesarios para poder calcularla, siendo frecuente que se pretenda que se realice la determinación en función de los daños remanentes de los vehículos involucrados.

Los elementos requeridos para determinar la energía de deformación, cada uno de los cuales modifica los resultados enormemente, son, entre otros:

— direcciones relativas al instante del impacto inicial y durante todo el tiempo de contacto, en tres planos perpendiculares entre sí;

— formas y distribuciones de las estructuras durante todo el proceso;

- dimensiones de todos y cada uno de los elementos de los móviles involucrados;
- forma y calidad de las vinculaciones y/o uniones de todos los elementos y piezas de los móviles involucrados;
- en teoría, conocer estos factores permitiría hacer lo propio con la distribución de tensiones en los materiales durante cada instante del accidente;
- la composición química que tuvieran y los tratamientos térmicos y mecánicos que hubieran soportado todos y cada uno de los elementos de los móviles involucrados;
- en teoría, el conocimiento acabado del estado del material permitiría determinar su resistencia mecánica;
- las temperaturas de todos y cada uno de los elementos de los móviles afectados al momento del hecho y su evolución durante el accidente, ya que este parámetro modifica sustancialmente la resiliencia (resistencia de los materiales a las cargas de impacto);
- otro factor de imprescindible necesidad sería el estado superficial de todos los elementos intervenientes, ya que la mera presencia de simples rayones modifica sensiblemente la capacidad de absorción de las cargas de impacto.

Como se ve en esta somera enunciación, la cantidad y entidad de factores determinantes de las características de deformación ante cargas de impacto torna imposible su obtención precisa y, por ende, el cálculo exacto de la energía de deformación, imprescindible para obtener las velocidades.

Resulta conocida la existencia de ciertos gráficos y/o ta-

blas utilizados frecuentemente para determinar velocidades, basados en ensayos de choque de automóviles, los que conviene discutir.

Los que se encuentran en uso en la Argentina en este momento provienen de las conclusiones de los ensayos realizados por Fiat a fines de la década del 50, bajo la dirección del ingeniero Giacossa. Tales ensayos consistían en lanzar con catapulta rodados Fiat 1100 contra paredes u otros rodados.

De las muchas y muy valiosas informaciones que se obtuvieron a partir de estos trabajos pioneros (aunque no fueron los primeros), sólo han trascendido las curvas que relacionan el acortamiento de la estructura con la velocidad de impacto. La sencillez con que han sido presentadas dichas informaciones ha llevado a que sean utilizadas indiscriminadamente por personas no avisadas de sus limitaciones.

Utilizar los resultados de cualquier serie de ensayos sin conocer su rango de validez y dispersión estadística es, cuando menos, aventurado. Hemos visto la utilización de las *curvas de Giacossa* en cualquier rodado y en cualquier posición, e inclusive extrapolaciones de ellas por fuera de los gráficos.

No es necesario ser epistemólogo, científico o técnico para comprender que no se obtienen los mismos resultados al chocar un Fiat 1100 —a la misma velocidad— contra una pared a 90° que si la misma se encuentra inclinada 45°; de igual modo los resultados son distintos si el coche estaba horizontal o cabeceando por una frenada; o si el impacto fue contra el lateral de otro coche, una columna, un camión, un peatón, etcétera.

Si el rodado en análisis es distinto a los utilizados en los ensayos, con estructura diferente, diversos materiales y vínculos entre las piezas, la aplicación de los resultados de ensayos maximiza el disparate.

Hoy en día se utilizan métodos que permiten determinar con mucho más fundamento la energía de deformación, considerando las superficies o los volúmenes deformados, em-

pleando coeficientes de rigidez específicos para cada rodado y para cada zona del mismo, teniendo en cuenta el ángulo de incidencia del impacto. Aun de esta manera, se debe tener muy presente el rango de aplicabilidad del método, *no* cabiendo utilizar el mismo en los siguientes casos:

- cuando se trate de camiones o colectivos;
- cuando se trate de motos o biciclos en general;
- cuando se trate de grandes deformaciones que denoten colapso estructural generalizado;
- cuando las deformaciones sean inapreciables o no comprometan refuerzos estructurales;
- cuando la deformación se haya modificado notoriamente en sentido vertical;
- cuando la estructura esté muy corroída.

Es imprescindible tener en cuenta que los valores que brinda el método son *valores medios* que tienen una dispersión del orden del 30%, lo cual implica que el *valor real* puede estar en un 30% por encima o por debajo del que ofrece el método aludido.

2. ENERGÍA INSUMIDA POR DEFORMACIONES EN AUTOMÓVILES O "PICK-UPS"

Se puede demostrar que la energía disipada para producir el daño es:

$$E = \{(G.W) + [A + (B.x)] \cdot S\} (1 + \tan^2 \alpha)$$

donde $G = A^2 / (2B)$ considera la energía disipada por deformaciones no permanentes; "W" es el ancho afectado por las deformaciones; "A" es la máxima fuerza por unidad de ancho dañado que no causa deformaciones permanentes; "B" es el coeficiente de resistencia al impacto por unidad de ancho dañado; "x" es la ordenada del centroide del área dañada a la superficie original del rodado (distancia de ésta al baricentro del daño); "S" es el área dañada, y "α" es el ángulo de incidencia (ángulo entre la perpendicular a la superficie original del rodado y la dirección del impacto).

La determinación de "x" y de "S" requiere de la integración numérica de las *penetraciones* del daño.

Llamamos *penetraciones* a las distancias medidas normalmente a la superficie original del rodado, entre ésta y la superficie dañada. Se denominan " P_i ", donde el subíndice indica cuál es la medición de que se trata.

A continuación brindamos la fórmula ya desarrollada para seis *penetraciones*:

$$E = (1 + \tan^2 \alpha) (W/5) \{ (5.G) + (0.5.A) [P_1 + (2.P_2) + (2.P_3) + (2.P_4) + (2.P_5) + (2.P_6)] + (B/6) [P_1^2 + (2.P_2^2) + (2.P_3^2) + (2.P_4^2) + (2.P_5^2) + (2.P_6^2) + (P_1 \cdot P_2) + (P_2 \cdot P_3) + (P_3 \cdot P_4) + (P_4 \cdot P_5) + (P_5 \cdot P_6)] \}$$

Para que esta fórmula sea aplicable las *penetraciones* deben ser medidas equidistantemente a una distancia $W/5$.

Debemos recordar que se trata de una integración numérica, motivo por el cual, cuanto mayor sea el número de *penetraciones* utilizado, tanto más cercano a la realidad será el resultado.

3. COEFICIENTES APLICABLES

Se han agrupado rodados en función de tener análogos coeficientes de rigidez estructural.

Los coeficientes de rigidez requeridos para un determinado rodado se deben buscar en función de la distancia entre ejes del mismo (*batalla* para los españoles), lo que en cada tipo de rodado, determina su clase.

Los coeficientes consignados son valores medios para cada clase, por lo que se adjunta, cuando se dispone de ella, la desviación estándar de cada valor.

Tal cosa permite, en cada caso, la determinación de un rango con altas probabilidades de ocurrencia de la energía consumida por las deformaciones, entre un máximo y un mínimo.

El autor debe hacer una notación sobre los coeficientes disponibles para camiones.

En razón de la sorprendente identidad numérica de los coeficientes, tanto "A", como "B", delanteros, laterales y traseros (en unidades británicas todos se consignan "1000", a pesar de la diversidad de unidades), se sugiere su empleo con extremo cuidado.

En efecto, no habiendo podido acceder a los protocolos de estos ensayos, el autor sospecha que se trata de valores asignados arbitrariamente a los efectos de calcular impactos contra rodados menores. Abona esta creencia el hecho de que, a las barreras rígidas utilizadas para el ensayo de impacto, se les asignan valores 1000000 - tanto a "A" (lb/in), como a "B" (lb/sqin).

AUTOMÓVILES						
Coeficientes frontales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	205,49 -240,79	32,08	7,92	5,05	1,07	101,97
2	240,79 -258,06	32,87	4,23	4,58	2,44	118,07
3	258,06 -280,42	36,78	7,07	4,90	1,49	138,11
4	280,42 -298,45	38,34	6,38	4,67	1,92	157,43
5	298,45	51,39	7,98	7,94	2,05	166,30

Coeficientes traseros						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	205,49 -240,79	30,71	4,87	3,81	1,19	123,79
2	240,79 -258,06	28,90	3,43	3,46	1,78	120,70
3	258,06 -280,42	33,75	6,17	3,62	1,39	157,18
4	280,42 -298,45	33,11	0,58	3,29	0,11	166,59
5	298,45	51,98	19,43	9,66	7,28	139,83

Coeficientes laterales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	205,49 -240,79	15,71	4,31	4,18	2,16	29,49
2	240,79 -258,06	17,80	3,01	4,63	2,85	34,18
3	258,06 -280,42	17,04	3,49	5,44	0,73	26,68
4	280,42 -298,45	24,39	nd	6,65	nd	44,71
5	298,45	16,91	nd	6,65	nd	21,49

PICK UPS						
Coeficientes frontales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<289,56	47,36	5,69	7,62	1,84	147,11
2	>289,56	39,09	5,63	4,79	1,35	159,56

Coeficientes traseros						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<289,56	46,16	8,46	7,62	2,75	139,74
2	>289,56	51,74	8,66	8,61	2,91	155,46

Coeficientes laterales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<289,56	18,33	0,58	6,44	0,06	26,10
2	≥289,56	13,88	nd	2,80	nd	34,42

MULTIPROPÓSITOS						
Coeficientes frontales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<265,43	47,36	5,69	7,62	1,84	147,11
2	≥265,43	39,09	5,63	4,79	1,35	159,56

Coeficientes traseros						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<265,43	45,98	8,46	7,62	2,75	138,66
2	≥265,43	51,74	8,66	8,61	2,91	155,46

Coeficientes laterales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<265,43	18,33	0,58	6,44	0,06	26,10
2	≥265,43	13,88	nd	2,80	nd	34,42

KOMBIS O VANS						
Coeficientes frontales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<293,11	55,00	15,95	9,45	5,34	160,06
2	≥293,11	63,86	7,21	10,83	1,52	188,21

Coeficientes traseros						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<293,11	50,02	7,44	8,30	2,47	150,80
2	≥293,11	55,54	13,66	9,92	4,33	155,44

Coeficientes laterales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<293,11	17,09	0,00	5,46	0,00	26,74
2	≥293,11	24,39	nd	6,65	nd	44,71

CAMIONES						
Coeficientes frontales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<265,43	178,00	nd	70,00	nd	226,31
2	≥265,43	178,00	nd	70,00	nd	226,31

Coeficientes traseros						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<265,43	178,00	nd	70,00	nd	226,31
2	≥265,43	178,00	nd	70,00	nd	226,31

Coeficientes laterales						
Clase	Dist. entre ejes (cm)	"A" (kg/cm)	Desv. Std (kg/cm)	"B" (kg/cm ²)	Desv. Std (kg/cm ²)	"G" (kg)
1	<265,43	178,00	nd	70,00	nd	226,31
2	≥265,43	178,00	nd	70,00	nd	226,31

Se reitera y destaca que aunque este método mejora la aproximación a la realidad con respecto a los anteriores, salvo en casos muy especiales no se debe usar como determinante exclusivo de la velocidad, debido a las propias limitaciones estadísticas.

4. DEFORMACIONES Y VELOCIDAD EN MOTOS

Las experiencias de Severy y otros han permitido concluir que cuando una moto impacta el lateral de un automóvil, las deformaciones permanentes en el biciclo (tomadas como el acortamiento de la distancia entre ejes) son función lineal de la velocidad de impacto y no son afectadas significativamente por el tamaño de la motocicleta ni por la zona impactada del automóvil.

Es decir que la mayor energía cinética que presenta una moto grande frente a una chica, a una misma velocidad, resulta compensada por el incremento de la resistencia de su horquilla.

De los gráficos de Severy hemos desarrollado la siguiente fórmula para el cálculo de la velocidad de impacto de una moto, en función del acortamiento de su distancia entre ejes:

$$V = (A \cdot \frac{5}{3}) + 5$$

donde "V" es la velocidad de impacto en Km/h, y "A" es el acortamiento de la distancia entre ejes en centímetros.

No debe perderse de vista que esta fórmula es sólo una buena aproximación, y esto sólo si se la aplica a casos como los del estudio, esto es:

—ruedas de la moto con llantas del tipo de rayos de alambre de acero (llantas de aceros aleados tienen distinto comportamiento);

—que el objeto impactado esté detenido o casi detenido, ya que si el rodado impactado por la moto está en movimiento, al tocarlo, la goma delantera de la moto es arrastrada en su dirección, por lo que el impacto deja de ser axial para la moto;

—acortamientos de la distancia entre ejes mayores de 12 centímetros y menores de 33 centímetros.

CAPÍTULO III EJEMPLOS Y APLICACIONES

1. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD PREVIA AL INICIO DE UNA FRENADA, BASADO EN LA LONGITUD DE LAS HUELLAS DE DESLIZAMIENTO

Por aplicación del *principio de conservación de la energía*, y para un frenado desde “ V_i ” (velocidad inicial) hasta “ V_f ” (velocidad final), en una superficie que presenta un coeficiente de frenado “ μ ”, y una pendiente “ i ” entre el punto de inicio de la huella nítida de frenado y el del final de la misma, con una distancia “ D ” entre ellas, tenemos:

$$V_i^2 - V_f^2 = 2.g.C(\mu + i)D \quad [1]$$

En la ecuación planteada, “ C ” es un coeficiente que considera la disipación de energía cinética por el frenado antes de que los neumáticos impriman su marca, siendo los valores mínimo y máximo de 1,15 y 1,30 respectivamente, para automóviles. En el caso de los camiones, “ C ” vale 1, ya que experimentalmente se ha demostrado que prácticamente no disipan energía antes de dejar huellas de frenado.

Debemos recordar que “ i ” está tomado en su forma frac-

cional, y que su producto por la distancia de frenado "D" determina la diferencia de alturas, debiendo considerarse con su signo.

Con la fórmula precedente se pueden tratar todos los casos de frenado puro, es decir, en los casos en que no intervienen otras energías puestas en juego con la cinética, la potencial gravitatoria y con el trabajo de frenado realizado por el rozamiento.

De esta manera, si se trata de una detención total:

$$V_f = 0$$

Si fuera en un camino razonablemente horizontal:

$$i = 0$$

En este caso:

$$V_i = (2 \cdot C \cdot g \cdot \mu \cdot D)^{0.5}$$

Frenado sobre superficies distintas.— Cuando el deslizamiento se produce sobre dos superficies de distinto coeficiente, ubicadas una a continuación de otra ("μ₁" durante una distancia "D₁" y "μ₂" durante una distancia "D₂") tendremos:

$$V_i = \{2 \cdot C \cdot g \cdot [(\mu_1 \cdot D_1) + (\mu_2 \cdot D_2)]\}^{0.5}$$

Cuando las ruedas de un lado del rodado se deslizan sobre una superficie de coeficiente "μ₁" y las del lado contrario sobre otra de coeficiente "μ₂", entonces será:

$$V_i = [C \cdot g \cdot D \cdot (\mu_1 + \mu_2)]^{0.5}$$

Debemos destacar que algunos estudios realizados en 1989 han demostrado que no existen diferencias significativas entre los coeficientes de fricción desarrollados por neumáticos comunes y por los radiales.

2. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD INICIAL DE UN MÓVIL CUANDO SE CONOCE SÓLO LA DISTANCIA TOTAL DE DETENCIÓN (*desde la percepción hasta la detención total*)

Cuando se debe tener en cuenta el tiempo de reacción-percepción (TR) y no se dispone de las huellas de deslizamiento, se deben combinar las fórmulas para hallar la velocidad inicial, conociendo la distancia total recorrida "D_t" desde el avistamiento hasta el punto de impacto o el de la posición final, recordando que durante "TR" el móvil circula a esa velocidad inicial "V_i" de manera constante, es decir que recorre:

$$D_r = V_i \cdot TR \quad [2]$$

antes de empezar a frenar ("D_r" es la distancia recorrida durante el tiempo de reacción-percepción total), y como la frenada insume una distancia "D_f", de [1] resulta:

$$D_f = (V_i^2 - V_f^2) / [2(\mu + i)g] \quad [3]$$

donde se le ha dado a "C" el valor 1, por cuanto no entran en juego en este caso las pérdidas de energía ocurridas entre el instante de empezar a frenar y el del comienzo de huellas de deslizamiento nítidas, y habiendo llamado "D_f" a la distancia que en [1] llamábamos "D", [3] surge de despejar "D" en [1].

Como:

$$D_t = D_r + D_f \quad [4]$$

podemos reemplazar [2] y [3] en [4]:

$$D_t = (V_i \cdot T_r) + [V_i^2 / (2 \cdot g \cdot (\mu + i))] - [V_f^2 / (2 \cdot g \cdot (\mu + i))]$$

es decir:

$$V_i^2/[2.g(\mu+i)] + (V_i T_r) - [V_f^2/[2.g(\mu+i)]] + D_t = 0$$

ecuación cuadrática cuya solución es:

$$V_{i1-2} = \left[\pm \left(T_r^2 + [V_f^2/[2.g(\mu+i)]]^2 + [(2.d_t)/[g(\mu+i)]] \right)^{0.5} \cdot T_r \right] \cdot [g(\mu+i)]$$

donde "i" es la pendiente en la dirección considerada.

3. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD INICIAL DE UN MÓVIL CUANDO SE CONOCE SÓLO LA DISTANCIA TOTAL DE DETENCIÓN E INTERESA CONOCER LA DURACIÓN TEMPORAL DE LAS MANIOBRAS

El presente constituye un método más para realizar lo estudiado precedentemente, permitiendo a la vez la determinación del tiempo insumido por el proceso de frenado, dependiendo de cada caso la elección del método a emplear.

Debemos recordar que cuando las ruedas se encuentran bloqueadas la desaceleración resulta proporcional al coeficiente friccional:

$$\mu = Xg$$

entonces puede tomarse como fracción de la aceleración de la gravedad "g":

$$a = \mu \cdot g$$

Si "D" es la distancia total recorrida desde la percepción hasta su punto de detención final, se cumple:

$$D = (V_i T_{pr}) + (V_i T) - (0.5 \cdot a \cdot T^2) \quad [A]$$

donde " T_{pr} " es el tiempo insumido por la percepción-reacción, y "T" es el tiempo de frenado efectivo.

Como:

$$V_f = V_i - (a \cdot T)$$

y:

$$V_f = 0$$

entonces:

$$V_i = a \cdot T \quad [B]$$

la que reemplazada en [A], resulta:

$$D = (a \cdot T \cdot T_{pr}) + (a \cdot T^2) - (0.5 \cdot a \cdot T^2)$$

es decir:

$$D = (a \cdot T \cdot T_{pr}) + (0.5 \cdot a \cdot T^2)$$

Esta última es una ecuación cuadrática, cuya solución se incluye a continuación:

$$T_{1-2} = [(-a \cdot T_{pr}) \pm \{ (a^2 \cdot T_{pr}^2) + (2aD) \}]^{0.5} / a$$

Reemplazando el valor "T" en [B], luego de descartar la solución negativa por absurda, se obtiene el valor de "V_i".

Cuando habiendo evidencias de fuerte frenada no hayan quedado huellas, o en oportunidad en que el rodado se encuentre equipado con "ABS", deben incrementarse los coeficientes de rozamiento en un 10% para caminos secos, y en un 20% para pisos húmedos, pudiendo de esta manera considerar el incremento en la eficiencia de frenado que el *no blo-*

queo de los neumáticos presenta ante el frenado con bloqueo de los mismos.

4. RESISTENCIA AL AVANCE

En rigor, cuando no se tengan indicios de frenada de ningún tipo ni de ausencia de la misma, pero sí distancias de detención, la velocidad se deberá encontrar entre la calculada precedentemente y la que se obtiene de aceptar que el vehículo se detuvo sólo debido a la resistencia al avance, dado que el motor no transmitía tracción a las ruedas ni el freno detenía su marcha.

Despreciando resistencias menores, la que se opone al avance "R" está compuesta por:

$$R = R_r + R_a + R_i$$

siendo "R_r" la resistencia de rodadura:

$$R_r = P \cdot \mu_r = M \cdot g \cdot \mu_r$$

donde "P" es el peso del vehículo; "M" es su masa; "g" es la aceleración de la gravedad, y "μ_r" es el coeficiente de rodadura, siendo sus valores:

- neumáticos sobre hormigón ($\mu_r = 0,015$);
- neumáticos sobre adoquines ($\mu_r = 0,020$);
- neumáticos sobre asfalto ($\mu_r = 0,030$);
- neumáticos sobre tierra dura ($\mu_r = 0,050$);
- neumáticos sobre arena suelta ($\mu_r = 0,15$ o más);
- neumáticos sobre barro ($\mu_r = 0,15$ o más).

"R_a" es la resistencia del aire:

$$R_a = 0,005 C_x \cdot A \cdot V^2$$

donde "V" es la velocidad (km/h), "A" es el área proyectada del vehículo en metros cuadrados (aproximadamente 0,9.ancho.alto) y "C_x" es un coeficiente aerodinámico que vale alrededor de 1 para camiones y 0,4 para automóviles estándar, siendo de 0,3 para automóviles deportivos.

"R_i" considera el efecto de la pendiente o inclinación en el sentido de avance:

$$R_i = \pm P \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

Si el vehículo sube una cuesta, su signo será positivo y negativo si desciende, siendo "α" el ángulo que forma la dirección de avance con el plano horizontal.

Recordando que la energía cinética se transforma en energía mecánica durante la detención, y que el trabajo realizado por las resistencias es en este caso:

$$TR = R \cdot D$$

podremos, como antes, calcular la velocidad al inicio de la detención; en esta oportunidad sin frenado.

5. DERRAPE. VELOCIDAD CRÍTICA EN CURVAS

El automóvil derrapa cuando $F_c = \mu_l \cdot P$, donde "F_c" es la fuerza centrífuga, "μ_l" el coeficiente de fricción lateral y "P" el peso.

Como:

$$F_c = M \cdot V^2 / R$$

y:

$$M = P / g$$

donde "R" es el radio de curvatura del giro, y:

$$F_c = P \cdot V^2 / (R \cdot g)$$

entonces:

$$V_c > (\mu_i \cdot R \cdot g)^{0.5}$$

Esta última es la fórmula a emplear para calcular la velocidad mínima en derrapes en curvas horizontales.

Se demuestra que cuando la curva tiene un ángulo de peralte "α", la velocidad necesaria para derrapar es:

$$V_c > \{R \cdot g [\mu_i \pm \operatorname{tg} \alpha] / [1 - (\mu_i \cdot \operatorname{tg} \alpha)]\}^{0.5}$$

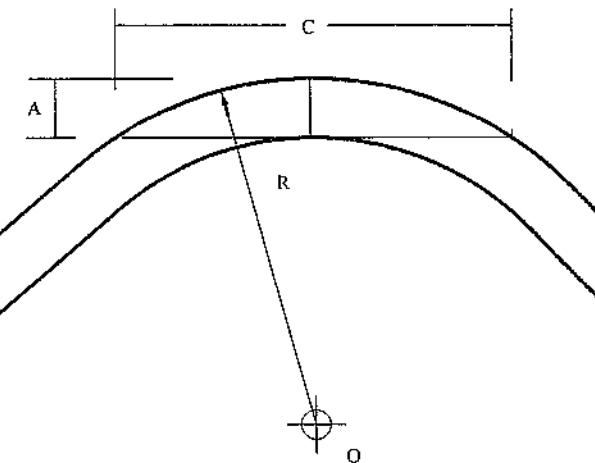
6. DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA

Muchas veces resulta necesaria la determinación del radio de una curva, por carecer de los planos del camino, para lo cual se deben realizar las mediciones que se indican en el gráfico nº 13 y aplicar la fórmula que se brinda seguidamente, teniendo en cuenta que una curva caminera está constituida por dos circunferencias concéntricas (ello es una aproximación suficiente):

$$R = [C^2 / (8 \cdot A)] + (A / 2)$$

donde "R" es el radio de la circunferencia exterior de la curva; "C" es la cuerda de la circunferencia externa trazada tangente a la circunferencia interna, y "A" es el ancho del camino en el punto de tangencia de "C".

DETERMINACIÓN DEL RADIO DE UNA CURVA



C: cuerda del arco exterior, tangente al arco interior.
 A: ancho del camino.
 R: radio del arco exterior de la curva.

$$R = [C^2 / (8 \cdot A)] + (A / 2)$$

Gráfico 13

7. DETERMINACIÓN DE DISTANCIA MÍNIMA A LA QUE SE DEBE INICIAR UNA MANIOBRA PARA ESQUIVAR UN OBSTÁCULO

Para poder obtener a qué distancia "D" de un punto hay que iniciar la maniobra que permita llegar a la zona de dicho punto habiéndose desviado una distancia "X", hay que determinar cuál es el radio mínimo de curvatura que puede describir el rodado a la velocidad que lleva.

Estableciendo que la curva más cerrada que puede describir un rodado será la que le permita encontrarse en la inminencia de derrape, es decir, la inmediatamente inferior a la velocidad crítica, tendremos que para determinar el radio mínimo "R" de la curva que se puede describir sin derrapar, a una determinada velocidad "V", tomaremos ésta como crítica y despejaremos "R" de la fórmula correspondiente a "V_c", que para terrenos llanos será:

$$R > V_c^2 / (\mu_r g)$$

Puede demostrarse que:

$$R \cdot X = R \cdot \cos \alpha$$

lo que permite obtener:

$$\alpha = \text{Arcos}[(R - X) / R]$$

También se demuestra que:

$$D = R \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

que es la distancia mínima a la cual se debe iniciar la maniobra.

En terrenos con pendiente de ángulo "β" será:

$$R > V_c^2 [1 \pm (\mu_r \operatorname{tg} \beta)] / [g (\mu_r \pm \operatorname{tg} \beta)]$$

Debemos recordar que se debe tomar signo negativo cuando el centro de curvatura se encuentre del lado inferior

de la pendiente, y positivo en caso contrario. Asimismo, en todos los casos se debe tomar el valor mayor de "V_c", ya que si se está frenando o acelerando, el radio a calcular debe ser tal que no se derrape a ninguna velocidad, y a mayor velocidad, mayor es el radio crítico.

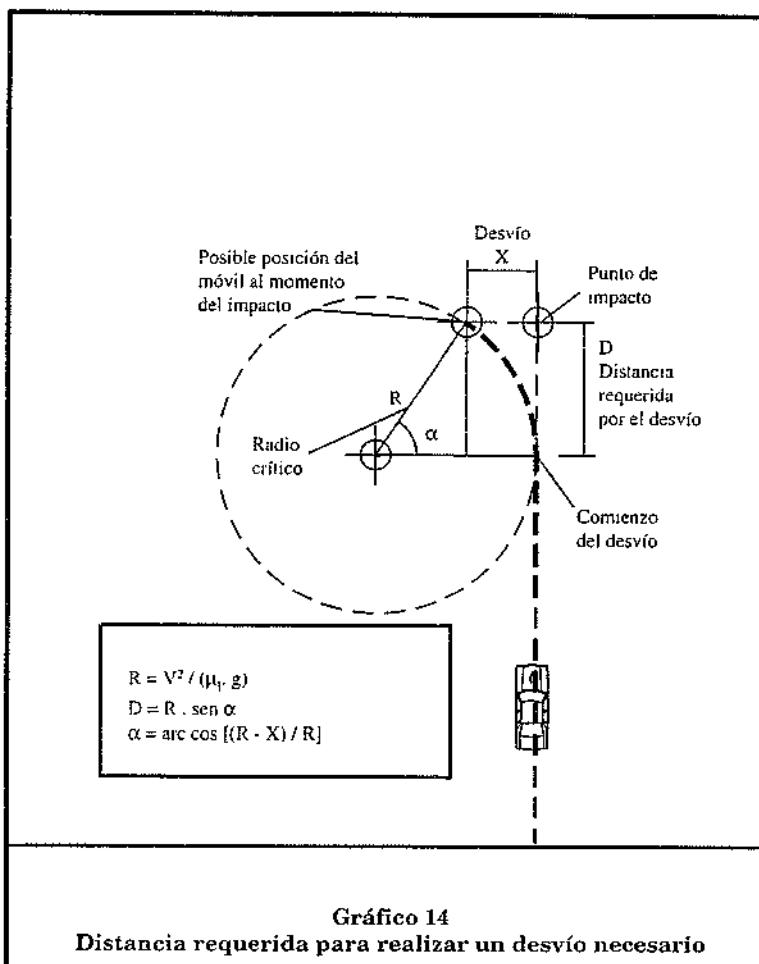


Gráfico 14
Distancia requerida para realizar un desvío necesario

8. CÁLCULO DE LA DISTANCIA “D” A QUE DEBERÍA HABER EMPEZADO EL FRENO CON DESACELERACIÓN “a” UN MÓVIL QUE AVANZABA CON VELOCIDAD “V” PARA LLEGAR A UN PUNTO, UN LAPSO “t” MÁS TARDE DE LO QUE LO HIZO

Este caso resulta útil a los efectos de determinar el *punto sin solución* para la maniobra de frenado parcial.

Si el móvil no frenó, recorrió la distancia “D” en “T”, tal que:

$$D=V.T \quad [1]$$

Si el móvil hubiese frenado, recorrer “D” le hubiese insumido otro lapso “T’”, tal que:

$$T'=T+t$$

Entonces se aplicaría:

$$D=[V(T+t)]-[0,5.a (T+t)^2] \quad [2]$$

como “D” es la misma, podemos igualar [1] y [2], y operando:

$$V.T=(V.T)+(V.t)-[0,5.a (T^2+(2.T.t)+t^2)] \quad [3]$$

Operando a partir de la expresión [3]:

$$T^2+(2.t.T)+[t^2-(2.V.t/a)]=0 \quad [4]$$

obtendremos una ecuación cuadrática de la forma:

$$A.x^2+B.x+C=0$$

con incógnita en “T”, y cuya solución es:

$$T_{1-2}=0,5\left((-2.t)\pm\sqrt{(4.t^2)-4[t^2-(2.V.t/a)]}\right)^{0,5}$$

Una vez encontrado “T”, se calcula “D”, bien con [1] o con [2].

9. CÁLCULO DE LA DISTANCIA “D” A QUE DEBERÍA HABER HECHO EL “REPRISE” CON ACCELERACIÓN “a” UN MÓVIL QUE AVANZABA CON VELOCIDAD “V” CONSTANTE, PARA LLEGAR A UN PUNTO, UN LAPSO “t” ANTES DE LO QUE LO HIZO

Como veremos, este cálculo resulta de utilidad para determinar el *punto sin solución* de la maniobra de intentar adelantarse en lugar de frenar.

A una velocidad “V” constante el móvil recorrió la distancia “D” en “T”, tal que:

$$D=V.T \quad [1]$$

Si el móvil hubiese acelerado, recorrer “D” le hubiese insumido un lapso “T’” menor que “T”, tal que:

$$T'=T-t$$

en cuyo caso se aplicaría:

$$D=V(T-t)+[0,5.a (T-t)^2] \quad [2]$$

como “D” es la misma, podemos igualar [1] y [2], y operando obtener:

$$[V(T-t)+[0,5.a (T-t)^2]]-(V.T)=0$$

entonces:

$$(0,5.a.T^2)-(a.t.T)+(0,5.a.t^2)-(V.t)=0 \quad [3]$$

La expresión [3] es una ecuación cuadrática de la forma:

$$A.x^2+B.x+C=0$$

con incógnita en "T", cuya solución es:

$$T_{1,2}=t \pm \{(a.t)^2 - (2.a)[(a.t^2) - (2.V.t)]\}^{0.5}/a$$

Luego de obtener el valor de "T", reemplazándolo en [2] se determina "D".

El valor de la aceleración "a" que se puede desarrollar depende de cada vehículo y su velocidad, por lo que se deberá obtener el *road test* correspondiente para cada caso.

10. CÁLCULO DE LA DISTANCIA "D" A QUE DEBERÍA HABER HECHO EL "REPRISE" CON ACCELERACIÓN "a" UN MÓVIL QUE AVANZABA CON VELOCIDAD "V" Y FRENO, PARA LLEGAR A UN PUNTO, UN LAPSO "t" ANTES DE LO QUE LO HIZO

Hemos visto que frenando se recorre la distancia "D" según:

$$D=(V.T)-(0,5.\mu.g.T^2) \quad [A]$$

donde "T" es el tiempo que insumió la maniobra, y " $\mu.g$ " es el *drag-factor*, coeficiente de desaceleración correspondiente al frenado.

Acelerando, esa distancia se recorre en un lapso (T-t), tal que:

$$D=V(T-t)+[0,5.a(T-t)^2] \quad [B]$$

Como esta distancia "D" es la misma en los dos casos, podemos igualar ambos segundos términos de las ecuaciones [A] y [B]:

$$(V.T)-(0,5.\mu.g.T^2)=V(T-t)+[0,5.a(T-t)^2]$$

es decir:

$$V(T-t)+[0,5.a(T-t)^2]-(V.T)+(0,5.\mu.g.T^2)=0$$

operando, llegamos a:

$$[a+(\mu.g)]T^2-(a.t.T)+(2.V.t)+(a.t^2)=0$$

que es una ecuación cuadrática de la forma:

$$A.x^2+B.x+C=0$$

con incógnita en "T", cuya solución es:

$$T_{1,2}=\left[(a.t) \pm \left((a.t)^2 - (4.[a+(\mu.g)][(2.V.t)+(a.t^2)])\right)^{0.5}\right]/(2[a+(\mu.g)])$$

Hallando "T" de esta manera, se lo reemplaza en [A] para obtener el valor "D".

11. CAÍDA LIBRE

Otro caso de utilidad para la reconstrucción es el de caída libre, en el cual un objeto es soltado desde una altura "H", con velocidad vertical inicial " $V_{vi}=0$ ", quedando sometido únicamente a la acción de la aceleración de la gravedad "g", empleándose para su resolución las fórmulas correspondientes al movimiento rectilíneo uniformemente variado, reemplazando "a" por "g". Por ejemplo, se determina cuán-

to tiempo le insume llegar al nivel del piso mediante la fórmula:

$$T = (2/g) \{-V_{vi} \pm [V_{vi}^2 - (2.g.H)]^{0.5}\}$$

como:

$$V_i = 0$$

entonces:

$$T = (2/g)(2.g.H)^{0.5}$$

12. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PROYECCIÓN DE UNA PARTÍCULA O CUERPO, CONOCIDAS SU ALTURA INICIAL Y LA DISTANCIA ENTRE EL SITIO DONDE LLEGÓ AL PISO Y AQUEL DESDE DONDE FUE PROYECTADO (PROYECCIÓN O EFECTO MISIL)

Suele ser de utilidad conocer el movimiento de un cuerpo lanzado con velocidad inicial “ V_i ”, que puede tener cualquier dirección (en reconstrucción, lo usual es que sea horizontal, desde una altura “ H ”).

El movimiento describirá una parábola, ya que se encuentra animado de una velocidad inicial “ V_i ”, y sujeto a la acción de la aceleración de la gravedad “ g ”, constituyendo en realidad la composición de dos movimientos independientes, uno de caída libre desde la altura “ H ”, y otro rectilíneo uniforme con velocidad “ V_i ”, siendo por lo tanto susceptibles de ser tratados de tal manera, ya que en el lapso:

$$T = (2/g)[2.g.H]^{0.5}$$

en que el cuerpo llega al suelo en su desplazamiento vertical debido a la caída libre, recorre una distancia horizontal:

$$D = V_i \cdot T$$

debida a la velocidad horizontal.

Esto nos permite, conocidas la distancia de proyección de un objeto y la altura inicial, determinar la velocidad de proyección utilizando:

$$V_i = D/T$$

Se debe tener en cuenta que cuando la dirección de proyección no es horizontal, el formuleo se ve complicado, ya que la velocidad inicial vertical “ V_{vi} ” no será nula, con lo cual se deberá utilizar:

$$T = (2/g) \{-V_{vi} \pm [V_{vi}^2 - (2.g.H)]^{0.5}\}$$

recordando que “ V_{vi} ” es la proyección sobre la vertical de la velocidad de proyección “ v ”, que “ V_i ” es la proyección de “ V ” sobre la horizontal, y que es válida la relación:

$$V = (V_{vi}^2 + V_i^2)^{0.5}$$

13. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DE PROYECCIÓN

A diferencia de lo explicado precedentemente, con este método no se requiere la distancia entre el punto de proyección y aquél donde el cuerpo llegó al piso, sino la existente entre el punto de proyección y la posición final del objeto, lo que incluye rebotes y/o deslizamientos.

Muy frecuentemente, en un accidente se produce la proyección de algún objeto o cuerpo. Existen dos tipos de proyección.

a) Cuando por efecto de un accidente (embestimiento) el cuerpo es acelerado (se modifica su velocidad y/o su dirección) por el impulso del impacto, a partir de lo cual describirá una determinada trayectoria hasta alcanzar su posición final (es el caso de los peatones que son impulsados en la dirección de su embistiente sin haber montado sobre su capó, u objetos embestidos que reproducen estas condiciones).

b) Cuando ante una brusca desaceleración, una parte del móvil se separa del mismo y, debido a su inercia, tiende a continuar el movimiento con la velocidad y dirección que llevaba en el momento de la separación. Es el caso de partes del rodado, como polvos, cristales, carga o trozos de carrocería que se separan del mismo al producirse el impacto; asimismo se encuadran en esta situación, los motociclistas que salen *despedidos* de sus rodados tras una colisión, o bien cuando a continuación de ser embestidos —al igual que peatones o ciclistas son cargados por el rodado embistente durante un trecho antes de ser proyectados.

En ambos casos la trayectoria seguida desde el momento de la separación hasta tocar el piso consistirá en una parábola, es decir que mientras su velocidad horizontal se mantiene constante, su movimiento vertical es permanentemente acelerado por la gravedad. A partir del instante en que el cuerpo toque el piso comenzará a rebotar y/o deslizarse.

Teóricamente y con contrastación empírica, Searle ha demostrado que la distancia total de proyección "D" entre el punto de separación y el de reposo en la posición final, sólo es función de la velocidad inicial "V", el ángulo de proyección "α", y el coeficiente de rozamiento "μ", independientemente del coeficiente de restitución "e", siendo "α" el ángulo vertical que forma la dirección inicial de proyección con la horizontal.

Las fórmulas de Searle son válidas para todos los elementos cuyo coeficiente de restitución sea 0,2 o menor, con la única excepción de aquellos que puedan rodar, como tazas y partes cilíndricas o esféricas.

Todos los objetos presentes en un accidente tienen un coeficiente de restitución "e" igual o menor a 0,2, con excepción de los neumáticos inflados (e=0,7).

En función de ello entonces, un objeto hallado a una distancia "D" del punto de separación, en un piso con coeficiente de fricción "μ", del que se separó con un ángulo de proyección "α", fue proyectado con una velocidad inicial "V", según:

$$V = (2.g.\mu.D)^{0.5} / [\cos \alpha + (\mu \cdot \operatorname{sen} \alpha)]$$

Se demuestra que la velocidad mínima de proyección para una determinada distancia y rozamiento es:

$$V_{\min} = [2.g.\mu.D / (1 + \mu^2)]^{0.5}$$

La velocidad máxima correspondiente sólo se podrá calcular si el ángulo de proyección es menor a un ángulo crítico que depende del coeficiente friccional, del siguiente modo:

$$\alpha_{\text{crít}} = 180^\circ - [2 \cdot \operatorname{arc} \operatorname{tg} (1/\mu)]$$

en cuyo caso tendremos:

$$V_{\max} = (2.g.\mu.D)^{0.5}$$

En la mayor parte de los casos se desconoce el ángulo de proyección real, aunque por fortuna el que puede ser asumido razonablemente es muy inferior al crítico. Veamos la siguiente tabla:

COEFICIENTE DE FRICCIÓN	ÁNGULO CRÍTICO DE PROYECCIÓN
0,3	33°
0,4	44°
0,5	53°
0,6	62°
0,7	70°
0,8	77°
0,9	84°

La contrastación de los resultados obtenidos por aplicación de estas fórmulas con los empíricos, demuestra que las velocidades obtenidas de esta manera son algo menores que las reales de impacto, para el caso de embestimiento de peatones.

No podía ser de otro modo, ya que lo que se calcula con ellas es la velocidad inicial de proyección, que es la que anima al cuerpo a causa del impacto.

La velocidad de proyección es necesariamente menor que la de impacto, por cuanto parte de ésta es insumida por las deformaciones plásticas y elásticas de los cuerpos intervenientes, así como por sus rotaciones y giros (análogamente a un coeficiente de restitución).

Para obtener la velocidad de embestimiento cuando corresponda, hay que tener en cuenta que la de proyección (VP) constituye sólo un porcentaje de la de embestimiento (VE); de esta manera entonces:

- para adultos embestidos por automóvil: $VP=0,64 VE$;
- para adultos embestidos por vehículo frontal: $VP=0,74 VE$;
- para niños embestidos por automóvil: $VP=0,72 VE$;
- para niños embestidos por vehículo frontal: $VP=0,83 VE$.

Llamamos vehículo frontal a aquel cuya forma de trompa impide la rotación del cuerpo embestido (colectivos, *pick-ups*, *vans*, etcétera).

14. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE EMBESTIMIENTO DE UN CAMIÓN QUE PORTANDO UN "CONTAINER" IMPACTA CON ÉSTE EN UN PUENTE BAJO EL CUAL CIRCULABA

Si bien el presente no es un caso frecuente, su planteamiento resulta útil como antecedente para casos que presenten analogías.

Luego de que el *container* transportado impactara contra el puente, el camión se detiene, habiendo avanzado previamente una distancia "D". Consideramos que el chofer aplicó los frenos tan pronto como pudo, es decir una vez transcurrido un lapso " t_r " (tiempo de reacción) luego del impacto, durante el cual el camión avanzó, siendo desacelerado por el coeficiente de rozamiento del *container* (μ_c) contra su playo.

A partir del momento en que se aplican los frenos éstos comienzan a actuar, siendo su coeficiente de rozamiento " μ ", hasta la detención del camión.

El proceso se puede dividir en tres etapas, para su análisis.

a) Al golpear el *container* contra el puente, quedando detenido, su energía cinética es absorbida íntegramente por las deformaciones, vibraciones y/o rotura de soportes.

b) Entre el momento del choque y el de la aplicación de los frenos, el camión continúa avanzando, pero su movimiento es retardado por el rozamiento del *container* contra su playo (coeficiente = " μ_c "). El trabajo que realiza el camión contra el rozamiento del *container* se materializa en la expresión:

$$\mu_c M_c g D_r$$

que por el principio de conservación de la energía debe ser

igual a la variación de energía cinética del camión en ese lapso (tiempo de reacción "t_r"), al cabo del cual la velocidad del mismo se habrá reducido desde la de embestimiento "V_i" hasta "V_f", a la que se aplican los frenos:

$$\Delta E_{c1} = 0,5 \cdot M [V_i^2 - V_f^2] = \mu_c \cdot M_c \cdot g \cdot D_r$$

donde:

"M_c": masa del *container*;

"M": masa del camión (incluye la masa del *container*);

"g": aceleración de la gravedad;

"D_r": distancia recorrida durante el tiempo de reacción;

"D": distancia entre el punto de impacto y el de detención del camión.

Con este planteo estamos aceptando que el chofer recién se percató del riesgo ante el golpe del *container* contra el puente, y que durante el lapso que naturalmente le insumió empezar a frenar, el camión siguió avanzando, aunque iba siendo frenado por el rozamiento del *container* contra su caja.

De esta manera, cuando comenzó a frenar, su velocidad ya había disminuido desde la velocidad inicial "V_i" hasta "V_f", habiendo avanzado entre tanto el camión de masa "M" una distancia "D_r".

Por lo tanto:

$$V_i^2 - V_f^2 = 2 \cdot \mu_c \cdot g \cdot D_r \cdot M_c / M \quad [1]$$

c) La variación de energía cinética producida desde que se aplican los frenos hasta que el camión se detiene (V_f=0), lo que ocurre luego de recorrer la distancia "D_f", se debe al trabajo de rozamiento conjunto del *container* y los neumáticos contra el piso, debido a la acción de los frenos:

$$\Delta E_{c2} = 0,5 \cdot M [V_r^2 - V_f^2] = (\mu \cdot g \cdot M \cdot D_f) + (\mu_c \cdot g \cdot M_c \cdot D_f)$$

operando:

$$0,5 \cdot M [V_r^2 - V_f^2] = [(\mu \cdot M) + (\mu_c \cdot M_c)] g \cdot D_f \quad [2]$$

donde:

"μ": es el coeficiente de frenado del camión;

"D_f": es la distancia durante la cual actúan los frenos;

"V_f": es la velocidad final.

Como V_f=0, reemplazando "V_f" de [1] en [2], y operando, se obtiene:

$$[(\mu \cdot M) + (\mu_c \cdot M_c)] g \cdot D_f = 0,5 \cdot M [V_i^2 - (2 \cdot \mu_c \cdot g \cdot D_r \cdot M_c / M)]$$

operando nuevamente:

$$[(\mu \cdot M) + (\mu_c \cdot M_c)] g \cdot D_f + (\mu_c \cdot M_c \cdot g \cdot D_r) = 0,5 \cdot M \cdot V_i^2$$

Como:

$$D_f = D - D_r \quad [4]$$

entonces:

$$[(\mu \cdot M) + (\mu_c \cdot M_c)] g (D - D_r) + (\mu_c \cdot M_c \cdot g \cdot D_r) = 0,5 \cdot M \cdot V_i^2$$

operando:

$$(\mu \cdot M \cdot D) + (\mu_c \cdot M_c \cdot D) - (\mu \cdot M \cdot D_r) = 0,5 \cdot M \cdot V_i^2 / g \quad [3]$$

Como "D_r" es la distancia que se recorre en "tr" con retraso debido al rozamiento del *container* y velocidad inicial "V_i", entonces:

$$D_r = (V_i \cdot T_r) - (0,5 \cdot a_c \cdot T_r^2)$$

y como a_c=μ_c·g [4] es la desaceleración que sufre el camión por efecto del rozamiento del *container*, tenemos:

$$D_r = (V_i \cdot T_r) - (0,5 \cdot \mu_c \cdot g \cdot T_r^2) \quad [5]$$

Reemplazando [4] y [5] en [3] y operando, obtenemos:

$$[V_i^2/(2.g)] + (\mu \cdot T_r \cdot V_i) - \{[\mu + (\mu_c \cdot M_c/M)]D + (0.5 \cdot T_r^2 \cdot g \cdot \mu_c \cdot \mu)\} = 0$$

que es una ecuación cuadrática de la forma:

$$A \cdot x^2 + B \cdot x + C = 0$$

cuya solución es:

$$x_{1-2} = \{-B \pm [B^2 - (4 \cdot A \cdot C)]^{0.5}\} / (2 \cdot A)$$

y que nos permite hallar la velocidad del camión al instante del impacto.

Tal solución es:

$$V_i = g \left(\pm \left[(\mu^2 \cdot T_r^2) + (2/g) \cdot [(\mu \cdot D) + (\mu_c \cdot D \cdot M_c/M) + (0.5 \cdot g \cdot \mu_c \cdot \mu \cdot T_r^2)] \right]^{0.5} \cdot (\mu \cdot T_r) \right)$$

Descartando la solución negativa por absurda se obtiene la velocidad buscada.

Se debe destacar que se ha despreciado la energía que entrega el motor en el lapso considerado, lo cual —en los casos en que el camión circule en primera baja— puede provocar un error considerable. De igual modo, tampoco se ha tomado en cuenta el efecto que el choque tiene sobre el avance del camión, al aceptar que toda la energía cinética del *container* se consume sin afectarlo, lo cual, obviamente, minimiza la velocidad obtenida.

15. VUELCO

Definimos como vuelco el movimiento que realiza un rodado en el cual un rolido —o rotación en un plano perpendi-

cular a su eje longitudinal— coloca su centro de gravedad “G” más allá de la vertical de uno de sus neumáticos; es decir del punto en el cual el equilibrio deja de ser *estable*.

Hasta que el centro de gravedad “G” alcance la posición mencionada, cualquier fuerza transversal aplicada a un vehículo hará que el mismo role (rote) un cierto ángulo; una vez retirada dicha fuerza el móvil volverá a su posición inicial, lo cual indicará que la misma era de equilibrio estable.

Cuando la rotación coloca al centro de gravedad “G” exactamente en la vertical de su punto de apoyo, al retirar la fuerza que provocó tal situación el móvil permanecerá en esa posición; es decir que estará en equilibrio, aunque se tratará de un equilibrio inestable, ya que cualquier fuerza que se le aplique, hará que se desplace.

Si esta fuerza tiene la facultad de provocar una rotación como la mencionada (por pequeña que ésta sea), el centro de gravedad “G” superará la posición de equilibrio inestable y el móvil continuará rotando en esa dirección (vuelco) hasta hallar una posición de equilibrio estable.

Se demuestra que para que un rodado de peso “P” y trucha “d” vuelque por efecto de una fuerza “F”, aplicada transversal y horizontalmente, a una altura “h” del piso debe ser:

$$F > 0.5 \cdot P \cdot d/h$$

Esta fuerza puede ser la centrífuga en una curva o la acción de otro cuerpo, como en un choque.

En el caso de la fuerza centrífuga la misma se aplica en el centro de gravedad, por lo cual “h” será la altura del mismo desde el piso.

En la reconstrucción de accidentes suele ser más útil disponer de la energía insumida para el vuelco.

Para volcar un rodado es necesario que su centro de gravedad experimente un movimiento girando alrededor de un centro instantáneo de rotación (que se encuentra en el punto exterior de apoyo del neumático hacia cuyo lado se gi-

ra) hasta ubicarse en la vertical de dicho centro instantáneo de rotación.

Como sabemos que sólo realizan trabajo mecánico las fuerzas que actúan sobre cuerpos que se mueven en su misma dirección, y que la energía total insumida o trabajo realizado es independiente del camino seguido, en virtud de ello podemos decir que:

$$E > (F \cdot d/2) + (P \cdot \Delta h) + (F \cdot Y) + P \cdot X$$

donde "F" es la sumatoria de las fuerzas horizontales y transversales, y "d" representa la trocha del rodado (el centro de gravedad "G" se debe mover horizontalmente una distancia $d/2$); "P" es la sumatoria de las fuerzas verticales (en general el peso del automóvil), y " Δh " es la elevación del centro de gravedad del rodado.

El " Δh " mínimo para vuelco es:

$$\Delta h = [(0,25 \cdot d^2) + h^2]^{0,5} \cdot h$$

donde "h" es la altura inicial del centro de gravedad desde el piso. Si se comprobase que en el momento de iniciarse el vuelco, el neumático de apoyo se encontraba elevado una distancia "H" por efecto de las fuerzas actuantes, deberá sumarse "H" a " Δh ".

"Y" representa un factor de corrección ante la posibilidad de que "F" no pase por "G". Si "F" pasa por arriba de "G" su signo debe ser negativo, si por el contrario, lo hiciera por debajo, su signo será positivo.

"X" corrige la posibilidad de que "P" no pase por "G"; si lo hiciera del lado de "G" que contribuye a su rotación es negativo, y en caso contrario será positivo.

Se ha mencionado porque teóricamente resulta posible un "X" discreto, aunque en la práctica rara vez es distinto de cero.

Si "F" fuese la fuerza centrífuga (más genéricamente *fuerzas iniciales*) "Y" sería igual a cero, ya que la misma se aplica en "G".

Si bien se ha tratado el tema del vuelco hacia un costado, las ecuaciones resultan válidas para vuelcos en cualquier dirección, a condición de adecuar los valores a una sección central del vehículo paralela a la dirección del movimiento.

Cuando el vuelco se haya debido a un impacto, puede ser necesario el planteamiento de ecuaciones de cantidad de movimiento lineal y angular.

El vuelco debido a las fuerzas iniciales se produce luego de un tramo de movimiento transversal del rodado (derrape).

El vuelco comienza donde finalizan las huellas de los neumáticos, o bien donde éstos encuentran algún obstáculo que les impide continuar con su deslizamiento.

Si la superficie es blanda, el movimiento transversal de los neumáticos dejará una especie de surco, en cuyo extremo final se suele encontrar acumulación de los materiales de dicha superficie, empujados por el deslizamiento.

En superficies duras, es dable encontrar arañazos provocados por el rozamiento del borde de la llanta con la misma, en la inminencia del vuelco.

La deformación transversal que sufren los neumáticos que lideran el desplazamiento puede permitir que entre el talón del neumático y su asiento en la llanta, queden atrapados residuos (piedras, pasto, tierra, etc.), lo cual resulta de utilidad para la determinación de la posición del rodado en los momentos previos a la iniciación del vuelco.

Experimentalmente se ha comprobado que una vez iniciado el vuelco, el rodado sufre una desaceleración, hasta llegar a la posición final, en un rango de 0,36 a 0,61 g *drag-factor*, con una media ponderada de 0,42 g, lo cual permite calcular la velocidad lineal al inicio del vuelco, y recordando la relación entre el factor de desaceleración y el coeficiente de rozamiento, determinar la velocidad al inicio de las huellas de deslizamiento, como si este factor fuese de rozamiento.

También se ha comprobado empíricamente, que la velocidad angular del vuelco debido a fuerzas iniciales, es del

orden de 1 rps, es decir 360° por segundo, o un cuarto de vuelta en un cuarto de segundo.

Ello explica por qué, usualmente, en este tipo de accidentes —en automóviles— aparece más golpeado el lateral contrario a aquel en cuya dirección se produjo el vuelco.

Ello es de esta manera por cuanto para iniciar el vuelco, el centro de gravedad "G" se debió elevar más de 30 cm. Dadas las dimensiones de los automóviles, y el hecho de que se tarda 0,25 seg en caer 30 cm (para cuando el centro de gravedad "G" ha bajado esos 30 cm, el rodado ha girado 90°), y como los coches son más anchos que altos, mientras baja para pegar con el techo, sigue girando, de modo que usualmente golpea primero el borde opuesto del techo o el lado contrario a aquel en cuya dirección se produjo el vuelco.

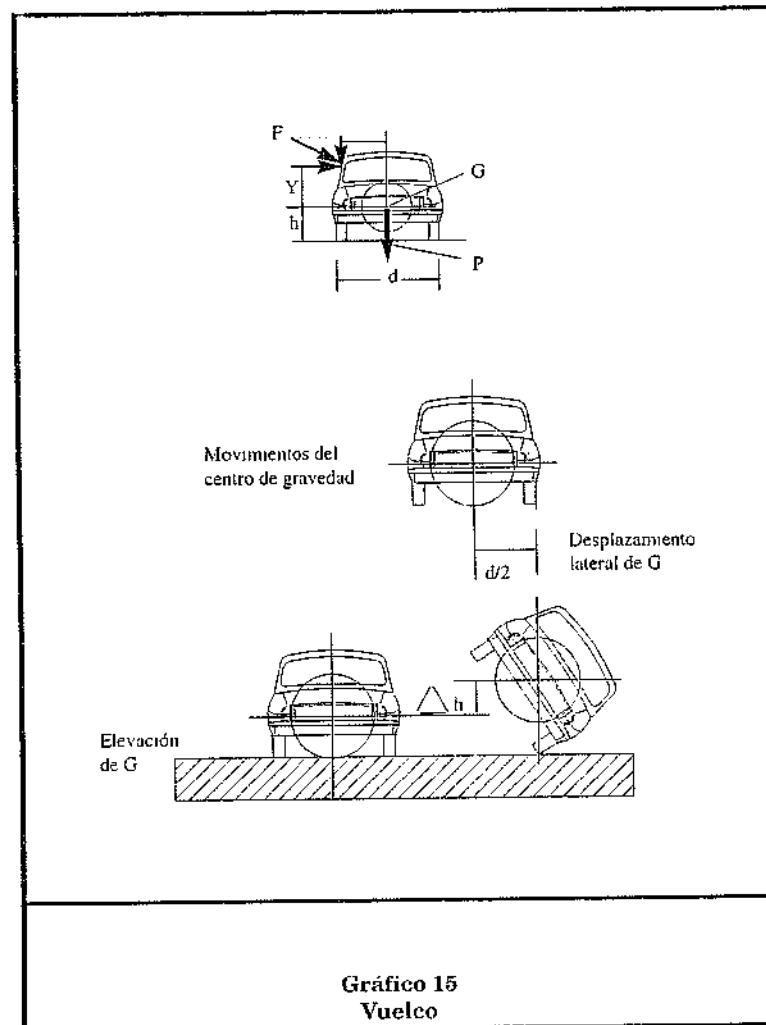
Obviamente todo esto no resulta válido para camiones, colectivos, o cualquier otro vehículo cuya anchura no sea significativamente mayor que su altura.

Otro dato interesante hallado experimentalmente, es que en cada golpe contra el piso, la velocidad translacional del centro de gravedad "G" se reduce alrededor de 3 m/seg, lo cual permite una grosera estimación de la velocidad al inicio del vuelco, si se conoce la cantidad de impactos contra el piso que dio el rodado, incluido el de detención final.

(ver gráfico 15, en p. 207)

16. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD Y DE LA DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE IMPACTO EN FUNCIÓN DE LAS POSICIONES FINALES DE DOS OBJETOS QUE SUFRIERON FENÓMENOS FÍSICOS DISTINTOS

Muy frecuentemente el accidentólogo se encuentra con que los únicos datos de que dispone son las posiciones finales de los protagonistas, y de algún elemento que, habiendo participado dinámicamente del accidente, aparece separado de los protagonistas.



Con esta escasa información, aun resulta posible lograr una reconstrucción —al menos parcial— del hecho, a condición de que las trayectorias posimpacto de los elementos considerados puedan ser analizadas por su fenomenología parti-

cular. Tal es el caso de cristales u otros elementos pertenecientes a un rodado y que se hayan separado del mismo en el momento del impacto. De este modo, mientras el movimiento posimpacto de los cristales estuvo gobernado por las leyes de proyección (bajo las cuales debe ser analizado), el movimiento posimpacto del rodado lo estuvo —por ejemplo— por las de frenado. En consecuencia, se trata de encontrar el punto en que comenzaron a experimentar fenómenos distintos, y la velocidad que animaba a ambos objetos en ese instante. De esta manera se puede determinar el "PDI" mediante un proceso iterativo con dos procesos de cálculo independientes, por ejemplo: distancia de frenado y caída de cristales, conociendo las posiciones finales de éstos y la del rodado. Tomando una velocidad de impacto arbitraria (V_o) se puede obtener a qué distancia (D_o) del "PDI" —hasta el momento desconocido— habrían caído los cristales, si el rodado circulaba a una velocidad " V_o "; es decir, determinamos un "PDI" con las fórmulas de caída libre o las de Searle:

$$D_o = V_o^2(\cos \alpha + \mu \cdot \operatorname{sen} \alpha) / (2 \cdot g \cdot \mu)$$

Es decir que "PDI" se ubicará a una distancia " D_o " antes de la posición final de los cristales. Entre "PDI" y la posición final del rodado tendremos entonces una distancia de frenado " D' ", con la cual podemos calcular una velocidad de impacto " V' ", mediante las fórmulas de frenado, tal que circulando a " V' ", al rodado le insumiera una distancia " D' " detenerse:

$$V' = [2 \cdot g \cdot \mu \cdot D']^{0.5}$$

Ahora, reemplazando " V_o ", reiteramos el proceso y obtenemos " D' " y " V' ". Continuamos este método de aproximaciones sucesivas hasta que entre " V_n " y " V_{n-1} " la diferencia sea menor que la precisión requerida. Cuando ello ocurra, podremos decir que el *punto de impacto* se hallaba a una distancia " D_n ", previo a la posición final, y que la velocidad a la que se separaron los objetos fue " V_n " (obviamente en ese instante común a ambos). Si " V_n " es elegida criteriosamente, el

proceso converge rápidamente (usualmente una precisión del 10% resulta suficiente).

17. EJEMPLO DE RECONSTRUCCIÓN DE UN ACCIDENTE

Luego de un accidente se han registrado los elementos que se observan en el gráfico 16 (*ver gráfico 16, en p. 182*).

- 1) Los polvos indican la zona del punto de impacto.
- 2) El ensanchamiento de sus huellas de frenado determina la posición del rodado II en el instante del impacto.
- 3) El charco de agua determina la posición final de su trompa, motivo por el cual resulta obvio que este rodado fue movido —luego de la estabilización de los hechos— desde su posición final hasta aquella en que aparece dibujado.

De lo expuesto podemos inferir que la posición final *real* del vehículo II es la que se observa en el gráfico 17 (*ver gráfico 17, en p. 183*).

- 4) Las huellas de frenado del rodado II indican su dirección previa.
- 5) La recta que une la posición de la trompa del rodado II en el momento del impacto con el charco determina la dirección posimpacto de su movimiento.
- 6) La ubicación de la impronta de impacto en el rodado I determina, junto con la dirección previa del rodado II, la dirección de su trayectoria previa.
- 7) La recta que une la posición de la impronta del rodado I en el "PDI" y en su posición final determina su trayectoria posimpacto.
- 8) El conjunto de direcciones previas y de daños sufridos por los rodados (el II mostró daños en su trompa, típicos de compresión anteroposterior, mientras que el I acusó impronta de impacto transversal en el lateral trasero derecho) indican que el rodado II fue el embistiente físico.
- 9) El ángulo de incidencia del choque fue de aproximadamente 90° .

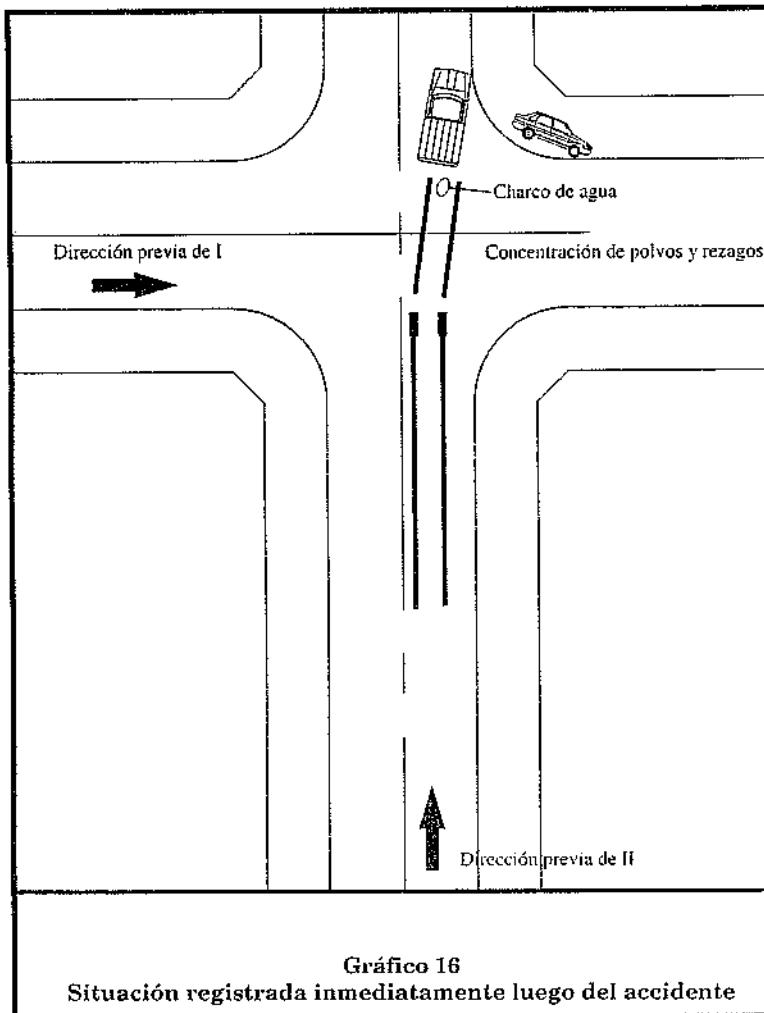


Gráfico 16
Situación registrada inmediatamente luego del accidente

10) Luego del impacto el rodado I adquirió un movimiento transversal que llevó a sus neumáticos izquierdos a impactar lateralmente con el cordón de la vereda; como consecuencia de este impacto el rodado volcó, debido a su inercia.

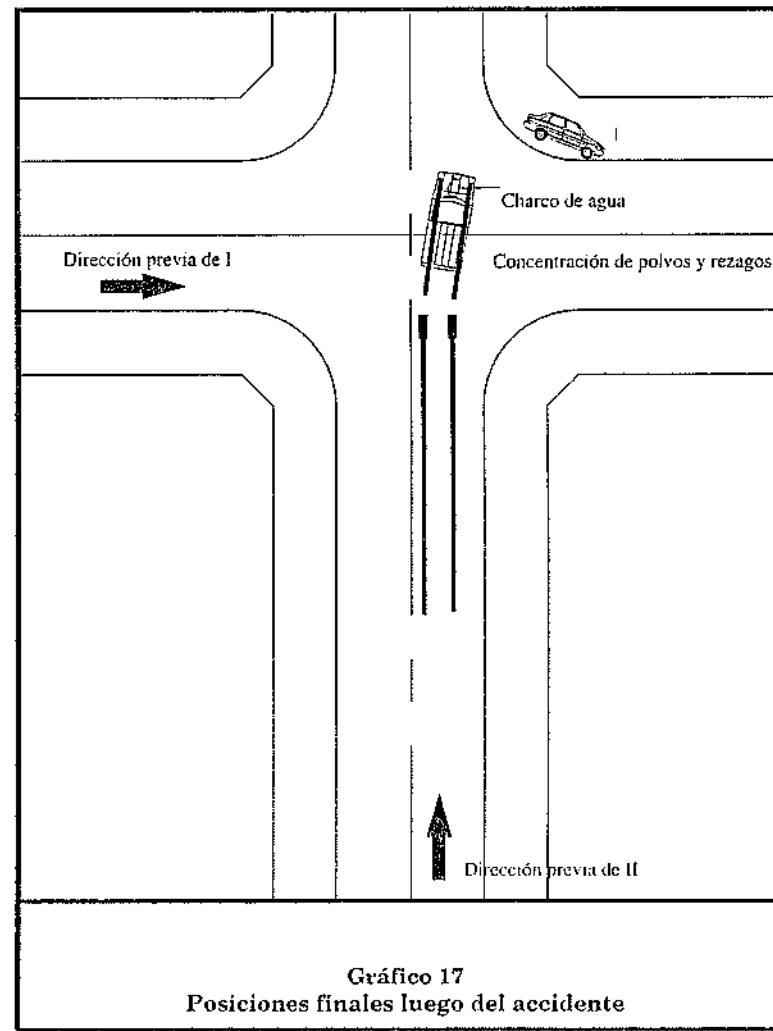
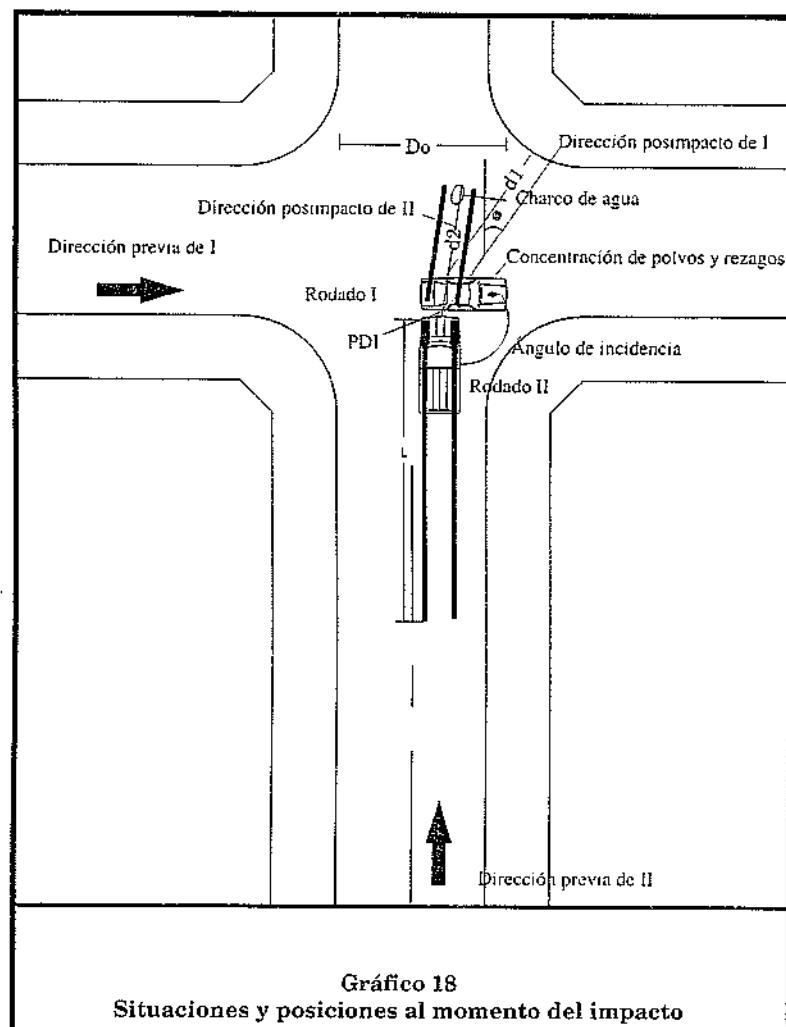


Gráfico 17
Posiciones finales luego del accidente

Del análisis efectuado surge claramente que las posiciones y situaciones de ambos vehículos al momento del impacto son las que se observan en el gráfico 18.



Los elementos detallados precedentemente nos permiten realizar las consideraciones siguientes:

a) El escaso desplazamiento longitudinal del rodado I (producto de su propia inercia) desde el "PDI" hasta su posición final, implica que al momento del impacto hubo de estar animado de escasa velocidad.

b) Todo el movimiento transversal del rodado I se realizó a expensas de la energía transferida por el impacto del rodado II en esa dirección.

Los fenómenos de movimiento longitudinal del rodado II y transversal del rodado I están gobernados por la siguiente ecuación energética:

$$EC_o = EF_{II} + ED + ET_I + EP_{II} + EV_I$$

donde:

EC_o es la energía cinética que animaba al rodado II en el momento de iniciar su frenado;

EF_{II} es la energía disipada durante el frenado del rodado II;

ED es la energía insumida por las deformaciones que produjo el impacto;

ET_I es la energía insumida por el desplazamiento transversal del rodado I desde el "PDI" hasta el comienzo del vuelco;

EV_I es la energía requerida para producir el vuelco del rodado I;

EP_{II} es la energía consumida por el rodado para recorrer su trayectoria posimpacto.

Por lo tanto, con excepción de la componente longitudinal del movimiento del rodado I (embestido transversalmente), todos los fenómenos físicos que ocurren son debidos a la energía cinética del embistiente (rodado II).

Para resolver la ecuación energética planteada es conveniente el tratamiento en orden cronológico inverso.

Hemos visto que para la energía insumida por el vuelco del rodado I se aplica:

$$EV_I = (0,5 \cdot F.d) + (P \cdot \Delta h) + (F \cdot Y) + (P \cdot X)$$

Como la fuerza "F" que provoca el vuelco es inercial (baricéntrica), y dado que la altura del cordón de la vereda es sumamente pequeña frente a las otras dimensiones, resulta válido considerar que, en este caso, tanto "X" como "Y" son nulas.

Por lo tanto:

$$EV_I = (0,5 \cdot F \cdot d) + (P \cdot \Delta h)$$

donde "d" es la trocha del rodado; "Δh" la elevación máxima de su centro de gravedad, y "P" su peso.

Sabemos que:

$$F = 0,5 \cdot P \cdot d/h$$

y que:

$$\Delta h = [(0,25 \cdot d^2) + h^2]^{0,5} - h$$

donde "h" es la altura del centro de gravedad del rodado I, la cual —en caso de no disponerse del dato cierto— se puede tomar con más que suficiente aproximación como la semisuma de las alturas de las fijaciones a la estructura de los paragolpes trasero y delantero para esa condición de carga.

Para la energía insumida por la trayectoria posimpacto del rodado I, como consideramos sólo el desplazamiento transversal, el que ocurre venciendo la resistencia por rozamiento de los neumáticos, podemos plantear que vale:

$$ET_I = \mu_l \cdot P \cdot d_1 \cdot \cos \alpha$$

donde " μ_l " es el coeficiente de rozamiento lateral (15% superior al longitudinal); " d_1 " es la distancia entre el punto de impacto y el de inicio del vuelco, y " α " es el ángulo que forma la trayectoria posimpacto del rodado I con la dirección preimpacto del rodado II.

Obviamente la suma de EV_I más ET_I representa la energía cinética posimpacto que animó transversalmente —a consecuencia del impacto— al rodado I, es decir:

$$EC_{I2} = EV_I + ET_I$$

Como también:

$$EC_I = 0,5 \cdot M_I \cdot V_{I2}^2$$

podemos obtener " V_{I2} " como:

$$V_{I2} = [2(EV_I + ET_I) / M_I]^{0,5}$$

que es la componente transversal de la velocidad del rodado I inmediatamente luego del choque.

Como lo demuestran las huellas posteriores al "PDI", rodado II continuó con su movimiento de frenado luego del choque, en función de lo cual la energía necesaria para realizar tal desplazamiento resulta ser:

$$EP_{II} = 0,5 \cdot M_{II} \cdot V_{II2}^2$$

la cual se disipó al efectuar el movimiento contra el rozamiento de los neumáticos:

$$EP_{II} = 0,5 \cdot M_{II} \cdot V_{II2}^2 = \mu \cdot M_{II} \cdot g \cdot d_2$$

Ello nos permite obtener también " V_{II2} " como:

$$V_{II2} = (2 \cdot g \cdot \mu \cdot d_2)^{0,5}$$

que representa la velocidad del rodado II inmediatamente luego del choque.

La velocidad del rodado I antes del impacto en la dirección en la que se está analizando (transversal a su avance) es cero, es decir:

$$V_{IIt}=0$$

A partir de la definición del coeficiente de restitución "K":

$$K = (V_{II2} - V_{I2}) / (V_{II1} - V_{II2})$$

Asimismo, podemos obtener "V_{II1}" como:

$$V_{II1} = V_{II} - [(V_{II2} - V_{I2}) / K]$$

que es la velocidad del rodado II inmediatamente antes del accidente.

El valor "K" oscila entre 0,1 y 0,2, por lo cual podemos tomar un valor medio de 0,15, o bien podemos trabajar con los valores extremos, obteniendo entonces valores máximos y mínimos.

La energía insumida por las deformaciones del choque responde a la ecuación:

$$ED = 0,5(M_I \cdot M_{II})(V_{II} - V_{II1})^2(1 - K^2) / (M_I + M_{II})$$

Es frecuente que la utilización del coeficiente "K" sea inadecuada, generalmente debido al hecho de que durante el choque la interpenetración puede haber provocado un *enganche* entre las estructuras, lo cual puede apartar en mucho el resultado de una simple restitución elástica; de ser posible, en estos casos resulta conveniente estimar la energía de deformación mediante el método ya brindado al ver *energía de deformación*.

En cuanto a la energía disipada por el frenado del rodado II antes del impacto, cabe señalar que se trata de la parte de la energía cinética inicial de dicho rodado disipada durante la frenada anterior al choque debido al rozamiento de los neumáticos durante la longitud de ésta:

$$EF_{II} = \mu \cdot g \cdot M_{II} \cdot L \cdot C$$

donde "M_{II}" es la masa del rodado II; "L" la longitud de su frenada desde el inicio hasta el "PDI"; "C" el coeficiente que considera la disipación de energía previa a dejar huellas de frenado nítidas; "g" la aceleración de la gravedad, y "μ" el coeficiente de frenado.

Como ya tenemos calculadas todas las energías parciales puestas en juego, podemos determinar la energía cinética inicial EC_o que animaba al rodado II como su sumatoria.

Conocida entonces EC_o, podemos obtener "V_{IIo}", ya que:

$$EC_o = 0,5 \cdot M_{II} \cdot V_{IIo}^2$$

y entonces:

$$V_{IIo} = (2 \cdot EC_o / M_{II})^{0,5}$$

que es la velocidad de circulación previa del rodado II.

Para calcular la velocidad al momento del impacto del vehículo I, consideraremos que su desplazamiento longitudinal se debe exclusivamente a su energía cinética previa.

Como no se han registrado huellas de frenado de este móvil, su velocidad en el momento del impacto se encontrará entre las que surjan del cálculo de detención sin frenar (V_{II1} mín) y del de máximo frenado entre el punto de impacto y su posición final (V_{II1} máx).

Este último valor será la velocidad máxima a la que pudo estar circulando en el momento del impacto, para luego del mismo quedar donde lo hizo.

Entonces:

$$V_{II1 \text{ máx}} = (2 \cdot g \cdot l \cdot \mu_{\text{máx}})^{0,5}$$

en la que "l" es la proyección sobre su dirección previa de la distancia entre el "PDI" y la posición final de "I":

$$l = d_1 \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

“ μ máx” es el coeficiente de rozamiento equivalente a la frenada con máxima eficiencia, y

$$V_{II \text{ min}} = (2 \cdot TR / M_1)^{0.5}$$

donde “TR” es la energía insumida para vencer la resistencia al avance “RA” mientras se recorrió “l”; como:

$$TR = RA \cdot D$$

entonces:

$$V_{II \text{ min}} = (2 \cdot RA \cdot l / M_1)^{0.5}$$

A los efectos jurídicos puede resultar de utilidad determinar la velocidad máxima “ V_{I_0} máx” a la que el móvil I pudo haber ingresado a la bocacalle:

$$V_{I_0 \text{ máx}} = [(2 \cdot \mu \text{ máx} \cdot g \cdot D_0) + V_{II}^2]^{0.5}$$

donde “ D_0 ” es la distancia entre el ingreso a la bocacalle de la zona impactada del rodado y el punto de impacto.

Ello nos permitirá verificar la posibilidad o imposibilidad física de que el rodado I ingresase al cruce a una velocidad excesiva, con todo lo cual ya nos encontramos en condiciones de describir los fenómenos acaecidos en el entorno temporo-espacial del accidente.

El rodado II, que circulaba por el medio de su mano a “ V_{II_0} ” en dirección Norte, acciona sus frenos en frenada de pánico (*stop panic*), pese a lo cual embiste en su lateral trasero derecho al móvil I, con una velocidad de impacto “ V_{III} ”.

La energía disipada y/o transferida durante el choque hizo que su velocidad, inmediatamente después del mismo, fuese “ V_{II_2} ”.

Tras el impacto, el móvil II continúa su movimiento, aun frenando, hasta alcanzar su posición de reposo.

El rodado I, circulando hacia el Este, es embestido en su lateral trasero derecho cuando circulaba a una velocidad comprendida entre “ $V_{II \text{ min}}$ ” y “ $V_{II \text{ máx}}$ ”.

Como consecuencia del embestimiento, el móvil describe una trayectoria oblicua, cuya componente transversal a su dirección primitiva se origina en la transferencia de energía impuesta por el móvil II al embestirlo.

Esta trayectoria lo lleva a impactar lateralmente con sus ruedas izquierdas contra el cordón de la ochava y consecuentemente volcar.

Debemos aclarar que nada se puede decir sobre los parámetros que regían el movimiento del móvil I antes del impacto, ya que no se registran elementos que permitan su determinación; por lo tanto, dicho rodado —con anterioridad al impacto— pudo haber estado circulando a velocidad constante “ V_{II} ”, bien haber acelerado desde una velocidad menor (inclusive desde la detención), como haber estado frenando desde una velocidad superior a “ V_{II} ”.

De la ubicación del punto de impacto (PDI) podemos deducir que el choque se produce cuando el móvil I estaba terminando el cruce y el móvil II estaba ingresando al mismo.

18. ANÁLISIS DE UN ACCIDENTE

En este punto procederemos a realizar el *análisis* del accidente reconstruido en el ejemplo anterior.

Como ya hemos explicado, el “PDI” (punto de impacto) queda definido por la ubicación de los polvos y de la trompa del móvil II en ese instante (determinada por el ensanchamiento de sus huellas de frenado).

A la ocurrencia del impacto le asignamos el instante $T=0$ (cero), y la coordenada cero en cada una de las trayectorias de los móviles.

a) *Para el rodado II.*— Como ya lo viéramos, el comienzo de acción evasiva (CAE) de este móvil se encuentra sobre su trayectoria, 0,50 segundos antes del inicio de las huellas de frenado.

Para ubicar temporalmente este punto debemos conocer la velocidad desarrollada por el móvil II en el instante de comenzar a dejar nítidas huellas de su frenado V_{II_0} , para lo cual contamos con el dato de que la energía disipada durante el trayecto que media entre dicho inicio y el "PDI" es EF'_{II} , y que:

$$EF'_{II} = \mu \cdot g \cdot M_{II} \cdot L$$

la que a su vez es equivalente a la variación de energía cinética:

$$0,5 \cdot M_{II} [(V_{II_0})^2 - (V_{II_1})^2]$$

de donde obtenemos:

$$V_{II_0} = [(2 \cdot \mu \cdot g \cdot L) + (V_{II_1})^2]^{0,5}$$

Como a su vez:

$$(V_{II_0} - V_{II_1}) / T_f = \mu \cdot g$$

donde " T_f " es el lapso insumido por el frenado (recordar que " $\mu \cdot g$ " es el factor de desaceleración o *drag-factor*), entonces:

$$T_f = (V_{II_0} - V_{II_1}) / (\mu \cdot g)$$

Por lo tanto, el comienzo de la acción evasiva (CAE) estuvo ubicado temporalmente a:

$$T_f + 0,5 \text{ segundos}$$

antes del impacto, es decir en:

$$TCAE = -(T_f + 0,5)$$

Su ubicación física (DCAE) surge de:

$$DCAE = -[V_{II_0}(T_f + 0,5)] - [0,5 \cdot \mu \cdot g (T_f + 0,5)^2]$$

El punto de percepción efectiva (PPE) se ubicó en un lapso equivalente al tiempo de percepción y reacción (TPR) antes del "CAE".

Dadas las circunstancias de autos, corresponde considerar *reacción compleja*, es decir un

$$TPR = 1 \text{ seg}$$

por lo que el *punto de percepción efectiva* se encontró en el instante

$$TPPE = -(T_f + 0,5 + 1)$$

Como durante el tiempo de reacción el móvil estaba animado de una velocidad constante " V_{II_0} ", su ubicación física será $V_{II_0} \cdot TPR$ antes del "CAE", es decir:

$$DPPE = -[V_{II_0}(T_f + 0,5)] - [\mu \cdot g (T_f + 0,5)^2] + V_{II_0} \cdot TPR$$

El "PSS_{II}" (punto sin solución para el móvil II) depende de la maniobra que se considere; por lo tanto pudo haber intentado:

A) frenar para detener totalmente su marcha antes del "PDI";

B) frenar para retrasar su llegada al "PDI" (unos segundos de retardo habrían bastado para que el rodado II pasase por delante sin ser embestido);

C) desviar lo suficiente su trayectoria para pasar por detrás del móvil I;

D) pasar por delante del móvil I mediante la adecuación de velocidad (ya sea manteniendo la inicial o acelerando);

E) intentar modificar los parámetros cinemáticos del otro rodado (por ejemplo, tocar bocina);

F) algunas combinaciones posibles de las maniobras antedichas.

Determinaremos ahora el "PSS" para cada una de ellas, destacando que resulta suficiente que una de las mismas haya sido posible para calificar el accidente como evitable.

A) *Frenar para detener totalmente su marcha antes del PDI.* La distancia total que insume el frenado hasta la detención total de un móvil que circule con velocidad inicial "V_{IIo}" es:

$$D_f = 0,5 V_{IIo}^2 / (g \cdot \mu_{\max})$$

Como hemos determinado que para este caso el tiempo de percepción y reacción es "TPR", lapso durante el cual el móvil circula a la velocidad inicial "V_{IIo}", el "PSS_{IIA}" (punto sin solución del móvil II para la maniobra A) se encontrará entonces a una distancia del "PDI" dada por:

$$DPSS_{IIA} = [0,5 \cdot V_{IIo}^2 / (g \cdot \mu_{\max})] + V_{IIo} \cdot TPR$$

B) *Frenar para retrasar su llegada al "PDI".* En este caso, el lapso de retardo "t" se debe calcular como:

$$t = L_x / V_{II}$$

donde "L_x" es la distancia entre el extremo delantero de la impronta habida en el rodado I y el extremo trasero de dicho móvil, ya que "t" representa el lapso que hubiese bastado para que este auto pasara frente al móvil II sin que se tocasen.

Precedentemente hemos visto que para que esto ocurra el frenado se debe iniciar un tiempo "T" antes del accidente, tal que:

$$T_{1,2} = \left\{ (-2t) \pm \left[(2t)^2 - \left(4 \cdot [t^2 + 8 \cdot V_{IIo} \cdot t / (g \cdot \mu_{\max})] \right) \right]^{0,5} \right\} / 2$$

lo que nos permite hallar la distancia a la que hubo de iniciarse el frenado parcial "DFP":

$$DFP = V_{IIo} \cdot T$$

Para determinar el punto sin solución de esta maniobra (PSS_{IIB}) habrá que sumar a "DFP" la distancia recorrida durante el "TRP", por lo tanto:

$$PSS_{IIB} = (V_{IIo} / 2) \cdot \left\{ (-2t) \pm \left[(2t)^2 - \left(4 \cdot [t^2 + 8V_{IIo} \cdot t / (g \cdot \mu_{\max})] \right) \right]^{0,5} \right\} + (TPR \cdot V_{IIo} / 2)$$

C) *Desviar lo suficiente su trayectoria.* Como ya hemos visto, el radio más pequeño con que se puede describir una curva plana es, en este caso:

$$R > V_{IIo}^2 / (\mu_I \cdot g)$$

y puede demostrarse que:

$$R - L_x = R \cdot \cos A$$

donde "L_x" tiene el mismo significado y valor que en la maniobra anteriormente considerada, lo que permite obtener:

$$A = \arccos [(R - L_x) / R]$$

Asimismo, se demuestra que:

$$D_d = R \cdot \operatorname{sen} A$$

que es la distancia mínima del "PDI" a la cual se debe iniciar la maniobra de desvío para pasar a una distancia " L_x " del obstáculo (en este caso rodado I).

Nuevamente el "PSS_{IIc}" se obtiene de agregar a la distancia " D_d " la recorrida durante el "TPR"; por lo tanto:

$$PSS_{IIc} = [V_{IIo}^2 / (\mu_I \cdot g)] \operatorname{sen} \{\operatorname{arc cos} [(R - L_x) / R]\} + V_{IIo} \cdot TPR$$

D) *Pasar por delante del móvil I.* Para pasar por delante del móvil I sin embestir ni ser embestido, el móvil II debió llegar a la zona del "PDI" en un lapso " T_p " antes de lo que lo hizo.

" T_p " debió ser la sumatoria de los siguientes dos tiempos:

a) El que le insumió a la trompa del móvil I recorrer la distancia que media entre la posición de su trompa en el instante del impacto y el costado izquierdo del móvil II (que llamamos " L_y "; es decir el lapso requerido para que el móvil I no llegase a penetrar en el área *barrida* por el móvil II); se calcula:

$$T_a = L_y / V_{II}$$

b) El que le habría insumido al móvil II atravesar totalmente el área que hubiese barrido el móvil I. Es decir la longitud conformada por la sumatoria entre la longitud del móvil II (L_{II}) y el ancho del móvil I (A_I). Dicho lapso es:

$$T_b = (L_{II} + A_I) / V_{IIo}$$

En tal caso, el adelanto necesario

$$T_p = T_a + T_b$$

había sido:

$$T_p = (L_y / V_{II}) + (L_{II} + A_I) / V_{IIo}$$

Este adelanto pudo ser logrado eventualmente no frenando, y si esta alternativa no era suficiente, mediante la aceleración desde una adecuada posición del "PDI".

Para verificar la primera alternativa comparamos el tiempo que le hubiese insumido al móvil II recorrer la distancia habida entre su "CAE" (comienzo de acción evasiva) y el "PDI" (punto de impacto) si su conductor no hubiese frenado. Tal tiempo " T_1 " habría sido:

$$T_1 = DCAE / V_{IIo}$$

Comparando los valores absolutos de " T_1 " con el de "TCAE" obtenido antes, resulta:

$$S_i TCAE - T_1 = T_p$$

por lo tanto, el punto sin solución para esta maniobra coincide con el "CAE", es decir:

$$DPSS_{IIc} = DCAE$$

Si TCAE - T_1 es mayor que T_p , ello implica que el PSS_{II} se encontraba por delante del CAE para esta alternativa de maniobra.

Si la diferencia TCAE - T_1 es menor a " T_p " (adelanto requerido para no chocar), esta alternativa (mantener la velocidad) no habría evitado el accidente, por lo que sería necesario analizar la alternativa de aceleración, es decir, determinar a

qué distancia se debió empezar a acelerar para llegar al "PDI" con un adelanto equivalente a "TP".

Seguidamente analizaremos la alternativa de acelerar en lugar de frenar.

Como viéramos, para llegar al "PDI" un lapso "TP" antes del instante en que ocurrió el impacto se debió comenzar la aceleración *reprise* un tiempo "T₂" antes, dado por:

$$T_2 = \left[(a \cdot T_p) \pm \left((a \cdot T_p)^2 - 4 \cdot [a + (\mu \cdot g)] \cdot [(2 \cdot V_{II_0} \cdot t) + (a \cdot T_p^2)] \right)^{0.5} \right] / (2 \cdot [a + (\mu \cdot g)])$$

lo cual nos permitiría hallar la distancia mínima a la que se debió iniciar la acelerada "DPSS_{II}D", reemplazando "T₂" en:

$$DPSS_{II}D = [V_{II_0}(T - T_p)] + [0.5 \cdot a(T - T_p)^2]$$

E) *Intentar modificar los parámetros cinemáticos del otro móvil.* La ejecución de esta maniobra (tocar bocina o *hacer luces*), insume T_e=0,5 segundos (aproximadamente); sin embargo, se debe dar tiempo a la percepción-reacción total (TPRT_i) por parte del otro conductor, más un lapso de por lo menos un segundo, para que sus parámetros cinemáticos (T_m) se modifiquen lo suficiente (en el caso de que perciba y acate), motivo por el cual esta maniobra se debe realizar en un lapso de:

$$TD = T_e + TPRT_i + T_m$$

antes de llegar al "PDI".

Si agregamos el "TRP" del conductor del móvil II, estaremos en el instante sin solución (ISSE) para esta maniobra:

$$ISS_{II} = T_e + TPRT_i + T_m + TPR_{II}$$

En función de lo expuesto, el "PSS_{II}" se encontrará a una distancia del "PDI" equivalente a:

$$DPSS_{II} = V_{II_0}(T_e + TPRT_i + T_m + TPR_{II})$$

En cuanto al *punto de posible percepción* (PPP_{II}) del conductor del rodado II, queda determinado en el terreno por la posición desde la cual una persona habilitada para conducir pudo percibir el riesgo.

El cruce de calles representa un *riesgo* para quien lo efectúa, y en este caso era percibible desde una distancia mínima de 150 metros.

Además, podemos decir que desde que un rodado comienza a ingresar a una bocacalle, se convierte en *peligro* para aquellos que tengan con él trayectorias concurrentes.

De ser necesario, se podría determinar el punto de posible percepción del peligro, aunque usualmente resulta más que suficiente, a los efectos jurídicos, determinar el "PPP" a partir del análisis del accidente, el cual siempre se encuentra referido al *riesgo*.

b) *Para el rodado I.*— En el caso de este móvil no existen evidencias de acción evasiva previa al accidente. Eventualmente podría haber declaraciones de su conductor sobre cuándo vio al otro protagonista, o si intentó o realizó alguna acción evasiva, en cuyo caso habría que evaluar su factibilidad y coherencia técnica con las evidencias registradas.

De todos modos, se pueden determinar, por procedimientos análogos a los utilizados para el rodado II, los diferentes puntos sin solución para las distintas maniobras que pudo haber intentado el conductor del móvil I, los que no repetiremos en este ejemplo.

Además, y salvo el caso en que aparezcan evidencias sobre una maniobra tal que haya provocado que un imminente embestidor se haya convertido en embestido, suele bastar con investigar las posibilidades de acción que tuvo el embistiente físico.

Llamamos embistiente físico a aquel protagonista directo activo portante de la fuerza de *acción* (derivada de su can-

tidad de movimiento) del inevitable par *acción-reacción* (primera ley de la dinámica).

Obviamente, embestido físico es aquel protagonista directo que por sufrir la *acción* ejerce la *reacción*, como la describiera Newton (idéntica en magnitud y dirección, pero de sentido contrario).

Como ejemplo de lo expuesto podemos mencionar que si un coche con velocidad "V" choca axialmente de frente con otro igual, detenido, los daños serán idénticos en ambos rodados.

Hacemos referencia a embistiente o embestido físico para no adjudicar responsabilidades a quien no le correspondan, ya que desde el punto de vista jurídico el embistiente físico puede no ser el culpable del hecho. Para el chofer de este rodado el punto de posible percepción (PPP₁) también se encontraba a una distancia mínima de 150 m del "PDI".

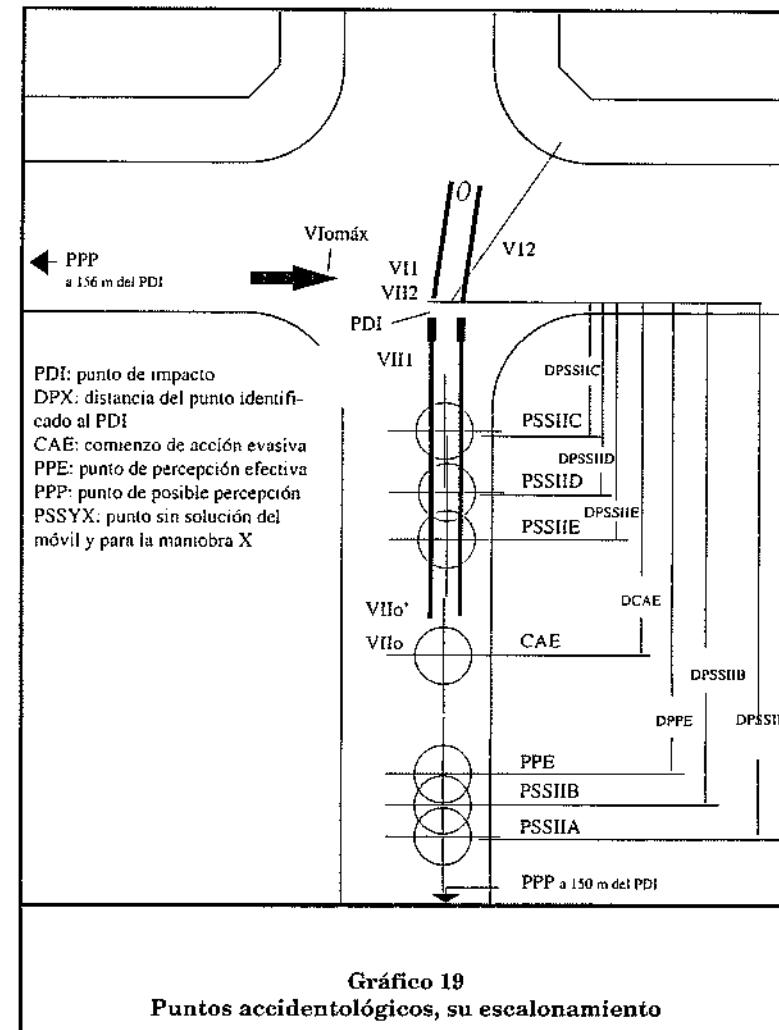
(ver gráfico 19, en p. 201)

19. EVITABILIDAD DEL ACCIDENTE

En cada caso deberá compararse el punto sin solución más cercano al punto de impacto, con el punto de posible percepción para el protagonista que se esté considerando.

Si existe algún punto sin solución más cercano al punto de impacto que el de posible percepción, es decir, si sobre la trayectoria de este protagonista el "PPP" precedió a alguno de sus posibles "PSS", estaremos en el caso de *accidente físicamente evitable* para ese protagonista.

En caso contrario (si ninguno de los dos posibles puntos sin solución es posterior al de posible percepción) nos encontraremos ante un *accidente físicamente inevitable* para este protagonista.



20. CAUSAS DEL ACCIDENTE

En el capítulo correspondiente hemos visto que las relaciones entre los puntos accidentológicos nos permitirán establecer si existieron demoras, errores o fallas en el comportamiento de alguno de los protagonistas y en cuál o cuáles fases ocurrieron.

Para tal evaluación se debe contar con los datos numéricos, de modo de poder compararlos, motivo por el cual no resulta posible efectuarla en este ejemplo genérico. De todos modos, en caso de poseerlos y siguiendo las explicaciones aportadas, ello resulta ser una tarea sencilla.

Asimismo, se podrían determinar las áreas teórica y real de posibles maniobras, a fin de compararlas con las realizadas. En el gráfico 12 se ha realizado este procedimiento tomando valores arbitrarios. Del mismo modo se podría evaluar el grado de perfección de una maniobra realizada por el protagonista correspondiente al móvil II, como se explicó en el capítulo pertinente.

CAPÍTULO IV DATOS ÚTILES

1. VISIBILIDAD

Lapso de recuperación de encandilamiento: 5 segundos.
Distancia de percepción de peatón con ropas oscuras, de noche, sobre fondo oscuro, iluminado con luces medias del rodado: con buen tiempo, 100 metros; con temporal de lluvia, 20 metros.

2. NIEBLA. ALCANCE DE VISIBILIDAD

	<i>Diurna</i>	<i>Nocturna</i>
Débil:	500 a 1000 m	50 a 100 m
Moderada:	200 a 500 m	20 a 50 m
Moderada a fuerte:	50 a 200 m	5 a 20 m
Muy fuerte:	0 a 50 m	0 a 5 m

3. FRENADO. VALORES DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN MEDIO (NEUMÁTICOS-PISO)

a) *Para automóviles*

PISO	SECO	HÚMEDO
Asfalto nuevo	0,85	0,60
Asfalto viejo	0,70	0,55
Asfalto resbaladizo	0,55	0,35
Concreto nuevo	0,85	0,55
Concreto viejo	0,70	0,55
Empedrado limpio	0,60	0,40
Ripio	0,65	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

b) *Para camiones.*— Salvo los casos de nieve o hielo, que se mantienen, se deben multiplicar los valores de la tabla para automóviles por 0,70.

c) *Para motocicletas.*— En estos casos el coeficiente de frenado varía de acuerdo con el tamaño del vehículo; asimismo, depende de si se frena sólo con la rueda trasera o con ambas ruedas.

PESO EN KG	COEFICIENTE PARA	COEFICIENTE PARA
	RUEDA TRASERA	AMBAS RUEDAS
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)

4. FRENADO CON MÁXIMA EFICIENCIA

$$\mu_{\text{máx}} = 1,1 \mu \text{ (seco)}$$

$$\mu_{\text{máx}} = 1,25 \mu \text{ (mojado)}$$

derrape: $\mu_l = 1,15 \mu$ para todas las condiciones

hidroplaneo: $\mu_h = 0,08$

5. DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA

Desde el comienzo de la frenada hasta la aparición de huellas nítidas:

para automóviles: entre el 15 y el 30% de la inicial

para camiones: despreciable, pues bloquean inmediatamente

6. LAPSO QUE INSUME LA APARICIÓN DE HUELLAS NÍTIDAS DESDE EL FRENADO

para automóviles: 0,5 segundos

para camiones: 0,1 segundos

7. COEFICIENTES FRICIONALES PARA VUELCO O CHOQUE

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: $\mu=0,60$

Moto deslizándose, caída de costado sobre asfalto seco:

$0,35 < \mu < 0,50$

Moto deslizándose, caída de costado sobre asfalto húmedo:

$0,30 < \mu < 0,40$

8. COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN PARA AUTOMÓVILES

$0,10 < K < 0,20$

9. DESLIZAMIENTO DE CUERPO HUMANO

valor general: $\mu=1,10$

sobre asfalto seco o húmedo: $\mu=0,80$

contra carrocería: $\mu=0,25$

10. TIEMPO DE PERCEPCIÓN Y REACCIÓN: DURACIÓN "STANDARD" DE LAS ETAPAS DEL TPR

percepción: 0,3 segundos

identificación: 0,3 segundos

evaluación: 0,5 segundos

decisión: 0,5-1 segundos

respuesta: 0,2 segundos

11. DURACIÓN DE LA RESPUESTA DE ELEMENTOS MECÁNICOS

0,5 segundos

12. DURACIÓN DE LOS DISTINTOS TIPOS DE REACCIÓN Y TIEMPO DE REACCIÓN TOTAL

Reacción refleja: TR: aprox. 0,1 seg; TRT: 0,60 seg

Reacción simple: TR: aprox. 0,5 seg; TRT: 1 seg

Reacción compleja: TR: aprox. 1 seg; TRT: 1,50 seg

Reacción discriminatoria: TR: más de dos segundos.

13. LAPSOS "STANDARD" QUE INSUMEN DISTINTAS ACTITUDES

Mirada espejo retrovisor interior: 0,9 segundos

Mirada espejo retrovisor lateral: 0,75 segundos

Mirada velocímetro: 0,8 segundos

Llevar el pie desde el acelerador al freno: 0,25 segundos

14. INTERVALO ENTRE MANIOBRAS EVASIVAS CONSECUTIVAS

0,5 segundos

15. DESVÍO LATERAL PERCEPTIBLE POR RODADO ENFRENTADO

30 centímetros

16. VELOCIDADES DE REFERENCIA

Peatón paso tranquilo: 0,7 m/seg
 Peatón paso vivo: 1 m/seg
 Peatón apurado: 1,3 m/seg
 Peatón corriendo: 2,5 m/seg
 Caballo al paso: 1 m/seg
 Caballo al trote: 2,1 m/seg
 Caballo al galope: 4,5 m/seg
 Galgo: 20 m/seg
 Ciclista despacio: 1 m/seg
 Ciclista paseo: 2 m/seg
 Ciclista rápido: 10 m/seg
 Brisa: 1 m/seg
 Viento moderado: 3 m/seg
 Tormenta: 15 m/seg
 Huracán: 30 m/seg

17. ÁNGULO CRÍTICO DE PROYECCIÓN (FÓRMULAS DE SEARLE)

COEFICIENTE DE FRICTION	ÁNGULO CRÍTICO DE PROYECCIÓN
0,3	33°
0,4	44°
0,5	53°
0,6	62°
0,7	70°
0,8	77°
0,9	84°

18. RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE EMBESTIMIENTO ("VE")
Y LA PROYECCIÓN DE PEATONES ("VP")

Para adultos embestidos por automóvil: $VP=0,64 VE$
 Para adultos embestidos por vehículo frontal: $VP=0,74 VE$
 Para niños embestidos por automóvil: $VP=0,72 VE$
 Para niños embestidos por vehículo frontal: $VP=0,83 VE$

BIBLIOGRAFÍA

- Ance, Luis, *Cálculo de velocidad en base a huellas de derrape*, inédito.
- Arias Paz, M., *Manual de automóviles*, Dossat, Madrid, 1956.
- *Motocicletas*, Dossat, Buenos Aires, 1951.
- Baker, J., *Traffic accident investigation manual*, The Traffic Institute Northwestern University, USA, 1976.
- Baker, J., y Fricke, L., *The traffic accident investigation manual*, Northwestern University Traffic Institute, USA, 1986.
- Dubbel, H., *Manual del constructor de máquinas*, Labor, Buenos Aires, 1950.
- Fricke, L.B., *Traffic accident reconstruction*, Northwestern University Traffic Institute, USA, 1986.
- Fries, Thomas; Smith, Jay, y Cronrath, Keith, *Stopping characteristics for motorcycles in accident situations*, SAE, USA, 1989 (890734).
- Hertig, R., *Mecánica teórica*, El Ateneo, Buenos Aires, 1970.
- Navin, Francis, *Hidroplanning and accidents reconstruction*, SAE, USA, 1995 (950138).
- Olson, Paul, *Driver perception response time*, SAE, USA, 1989 (890731).

- Orlowski, K.R.; Moffatt, E.A.; Bundorf, R.T., y Holcomb, M.P., *Reconstruction of rollover collisions*, SAE, USA, 1989 (890857).
- Reed, Walter S., y Tanner Keskin, A., *Vehicular deceleration and its relationship to friction*, SAE, USA, 1989 (890736).
- Reveley, Mary S.; Brown, Douglas R., y Guenther, Dennis A., *A comparison study of skid and yaw marks*, SAE, USA, 1989 (890635).
- Searle, John A., y Searle, Angela, *The trajectories of pedestrians, motorcycles, motorcyclists, etc. Following a road accident*, SAE, USA, 1983 (831622).
- Sens, M.; Chens, P.; Wiechel, J., y Guenther, D., *Perception-reaction time values for accident reconstruction*, SAE, USA, 1989 (890732).
- Siddall, Donald, y Day, Terry, *Up dating the vehicle class categories*, SAE, USA, 1996 (960897).
- Society of Automotive Engineers, *Accident reconstruction technologies*, PT-35, SAE, USA, 1990.
- *Crash avoidance*, SP-544, SAE, USA, 1983.
- *Stapp car crash conference*, SAE, USA, 1989.
- Warner, C.; Smith, G.C.; James, M.B., y Germane, G.J., *Fiction applications in accident reconstruction*, SAE, USA, 1983 (830612).

La presente edición consta de 1.000 ejemplares.

Impreso en Talleres Gráficos Miguel A. Bermejo,
11 de Septiembre 539, Haedo, Buenos Aires, Argentina,
en el mes de julio de 2003.

FOGLIA, P. J.

Signos de enfermedad en la escritura (grafopatología)

Origen del movimiento escritural. El cuerpo humano y su proyección gráfica. Escrituras saludables y patológicas. Las enfermedades en la escritura: presión, tensión, torsiones, brisados, congestión y empastamientos. Intoxicaciones: drogadependencia: barbitúricos, psicofármacos, tranquilizantes, "cannabis", cocaína, heroína, morfina, opio; alcoholismo: cirrosis hepática, "delirium tremens", obnubilación. SIDA. Enfermedades mentales: epilepsia, esquizofrenia, neurosis. Hipoacusia y sordera. Ocultamiento y temblores en la escritura: parkinsonismo, estado depresivo y segmentaciones. Afecciones cardíacas. Grafopatología.

MACHADO SCHIAFFINO, C. A.

Diccionario pericial

Cada voz (amén de su raíz, género y enfoques técnicos), está dada en español, alemán, francés, inglés e italiano, con subvoz que abarcan más de 50.000 acepciones y 30.000 voces diferentes. Posee aforismos, usos y prácticas latinos. Comprende —enunciativo— agropecuario: arte; balística; biogeográfica; contable; económico-financiera; energía nuclear; fotocinevideo; física; grabación; informática; ingeniería (electrónica, civil, química, óptica, mecánica, acústica, eléctrica, agrónoma, informática, metalúrgica, hidráulica, vial, nuclear, telecinética, telefónica, de minas); aeronavegación; medicina; química; psiquiatría.

MANERA, A. E.

Falsedades documentales por computadora

Alteraciones fraudulentas de firmas, textos y documentos. Creación de la imagen de su firma por computadora. Retoque. Levantamiento de firma superpuesta a textos de igual y distinto valor cromático. Elementos formales y estructurales de los grafismos. Sus modificaciones por computadora. Demostraciones periciales. Composición de un documento con texto, logotipos, sellos y firmas. Sellos. Investigaciones de impresiones de sellos mediante la utilización de una computadora. Reconstrucción computarizada de la impresión de un sello. Creación de un comprimido por limpiado electrónico y composición.

SEDEYN, MARIE-JEANNE

Investigación objetiva del manuscrito estándar
Medio. Instrumento. Disposición. Eje de las letras. La línea de base. Dimensiones y proporciones. Vinculación. Presión. Velocidad y ritmo. Densidad del texto. Morfología. Hábitos de escritura. Firma. Identificación (examen y comparación de escritos dudosos a mano). Imitación o disfraz. Traducción de *Juliá E. de la Peña*.

EDICIONES LA ROCCA S.R.L.

Talcahuano 467

Tel. 4382-8526 - Fax 4384-5774
(C1015 AAI) Buenos Aires - Argentina
e-mail: ed-larocca@sinectis.com.ar

