ENERGÍA DISPONIBLE Y *RESTITUCION* DURANTE LA COLISIÓN

Ing Aníbal O. García – agarcia@perarg.com.ar
Ingeniero Mecánico – UBA. Consultor en Investigación de Siniestros

INTRODUCCIÓN

En este breve ensayo pretendemos llamar la atención del investigador dedicado a la reconstrucción analítica de siniestros viales, acerca de dos conceptos que unidos, pueden ser de gran utilidad para disipar situaciones de incertidumbre respecto de los rastros y de las constantes técnicas empleadas en el proceso de análisis.
El primer concepto es el de energía disponible en la colisión. Este quantum de energía representa la máxima cantidad de energía cinética que puede ser disipada durante la colisión, como consecuencia de la deformación elastoplástica de los vehículos que la protagonizan. Esta cantidad está asociada a la diferencia entre la energía total del sistema (o suma de las cantidades de energía de cada uno de los vehículos al iniciar el contacto) y la energía cinética del centro de masa del sistema. Demostraremos que en un sistema conservativo, la colisión por trabajo de deformación, no puede absorber una cantidad de energía mayor que esa diferencia.
El segundo concepto está asociado al fenómeno de la restitución. Como se sabe esta es una característica determinante de la naturaleza elastoplástica de la colisión. En particular demostraremos que el valor del coeficiente, remite a la fracción de la energía puesta en juego –energía disponible- que es restituida al sistema, como efecto de una reacción elástica parcial de las estructuras deformadas.
Es sabido que el coeficiente de restitución está asociado con las velocidades relativas entre los vehículos al inicio y finalización de la colisión; es decir que el valor del coeficiente es un cociente entre diferencias de velocidades; un número adimensional relacionado con la cinemática de la colisión. En este ensayo nos adentraremos en el concepto, para tratar de entender que esta relación cinemática es el efecto; y que la causa del fenómeno está relacionada con la naturaleza de los materiales y de las estructuras que contactan, y sobre las que se ejercen fuerzas durante el contacto. Es decir que la causa de la restitución es un fenómeno de carácter estructural que determina cuanto de la energía disponible resultará disipada, y cuanto de ella será restituida al sistema, formando parte de la energía cinética del sistema que emerge de la colisión.
Ambos conceptos nos permiten introducirnos en la faz tecnológica del problema. Demostraremos, o intentaremos al menos demostrar que hay un único coeficiente de restitución para cada colisión y dos caminos para su estimación. Uno es de origen cinemático, derivado de la relación de velocidades relativas mencionada. El segundo tiene en cuenta las variaciones de energía. Ambas vías pueden ser utilizadas para establecer los parámetros más probables de la mecánica de una colisión.
Para facilitar la comprensión de esta utilización tecnológica, desarrollaremos de manera simplificada el análisis de un caso de choque entre dos vehículos de masa disímiles, en el que estos conceptos adquieren una importancia significativa para dilucidar el caso de manera objetiva, prescindiendo de las consideraciones arbitrarias que suelen sustituir el desconocimiento de la tecnología relacionada a los fenómenos de la colisión vial.

EL CONCEPTO DE ENERGÍA DISPONIBLE

Dado que el fenómeno de la restitución, objeto último de nuestro análisis, se refleja en la dirección normal a la colisión (las relaciones en la dirección tangencial de contacto no son de *restitución pura*), circunscribimos nuestras consideraciones al caso de un choque colineal. Como se recordará un choque colineal se define como el caso particular donde los vectores velocidad e impulso, en el instante previo al impacto, yacen –o bien se encuentran alineados- sobre la recta que une los centros de masa de cada uno de los cuerpos.

Consideramos la colisión como un sistema de dos o más cuerpos, cada uno representados por partículas; masa concentrada en el centro de masa de cada uno de ellos. En cada momento, cada punto ocupa un lugar en el espacio, definiendo un *centro de masa del sistema de cuerpos*, -punto inmaterial identificado como G_s-,cuyas coordenadas respecto de una terna fija estarán determinadas por ecuaciones del tipo.

$$X_{Gs} = [m_1\, x_1 + m_2\, x_2 + \ldots. + m_n\, x_n +] / [m_1 + m_2 + \ldots.. + m_n]$$

Como los cuerpos se están moviendo, las coordenadas de X_{Gs} varían con el tiempo, por lo que puede expresarse un movimiento del centro de masa $X_{Gs}(t)$, y una velocidad instantánea en cada caso, expresada por la derivada de X_{Gs} respecto del tiempo. Si existe velocidad de un sistema, cuya masa es obviamente la suma de las masas, puede aventurarse la existencia de una energía cinética del centro de masa del sistema, expresada en la ecuación

$$E_{Cs} = ½\ m_S\, \boldsymbol{v}_{Cs}^2$$

Es interesante recordar que existe además una *energía del sistema* E_S -suma de las energías cinéticas de cada uno de los cuerpos-. Nuestro postulado central a demostrar es que:

$$E_{Cs} = \text{cte} < E_S$$

Para ello podemos concebir al sistema en colisión como un sistema aislado, sobre el que no se ejercen fuerzas exteriores, y en el que la masa del sistema no varía. Dado que el Impulso del sistema es constante, también lo será la velocidad del centro de masa $\boldsymbol{v}_{Cs}$ y consecuentemente, *en un sistema aislado la energía del centro de masa será constante*.

Una consecuencia de esta constancia de la energía cinética del centro de masa es que, en ausencia de fuerzas exteriores, el sistema podrá perder energía cinética (a expensas de realizar trabajo mecánico) hasta *el límite* de alcanzar el *valor mínimo* de la energía del centro de masa. En otras palabras: *en un sistema aislado de varios cuerpos en movimiento, la energía cinética del centro de masa es la mínima energía a la que puede reducirse la energía del sistema*.

En el caso del choque colineal el centro de masa del sistema y su vector velocidad se encuentran sobre la recta en la que yacen los vectores velocidad de pre y post-impacto. La velocidad v_{Cs}, puede ser despejada de la ecuación de conservación del Impulso Lineal como:

$$v_{Cs} = \frac{[m_1\ v_1] + [m_2\ v_2]}{m_1 + m_2}$$

El choque colineal se desarrolla en la dirección de un único eje, lo que simplifica todas las consideraciones de modelización matemática de los procesos involucrados. La simpleza del modelo permite comprender más fácilmente los fenómenos físicos implícitos en la colisión, especialmente el proceso de transferencia de energía de un móvil a otro, la pérdida de energía total del sistema y su conversión en trabajo mecánico de deformación, asociado con la deformación residual.

La validez del postulado es inmediata. En una colisión la mayor disipación de energía como trabajo mecánico de deformación, se produce para el caso ideal de plasticidad pura. En esta condición los cuerpos continúan el movimiento unidos entre sí, conformando un único cuerpo de masa $m_1 + m_2$ a una velocidad v_{Cs}. La energía post impacto del sistema será coincidente con la definida como energía cinética del centro de masa.

El sistema ha disipado el máximo de energía posible en la colisión. Nos queda por decir que el valor de restitución en este caso ideal es $e = 0$.

ENERGIA, TRABAJO DE DEFORMACIÓN Y RESTITUCIÓN

El coeficiente de restitución e define el grado de elasticidad en el impacto. Un valor nulo indica una colisión perfectamente plástica, y un valor 1 una colisión perfectamente elástica. Ambos valores son extremos ideales y para cualquiera de los casos que involucran choques donde intervienen automóviles, biciclos, cuerpos humanos, muros, postes y árboles, los valores reales se encuentran dentro de ese rango; más próximos a 0 que a 1.

El efecto del grado de *elasticidad – anelasticidad* de un choque se refleja en las velocidades relativas post impacto. De allí que en el caso general de un choque de dos vehículos a velocidades v_1 y v_2, (*velocidad relativa* $v = [v_1 - v_2]$) que se separan a velocidades v'_1 y v'_2 respectivamente, el valor del coeficiente de restitución del choque está determinado por la relación:

$$e = -(v'_1 - v'_2)/(v_1 - v_2)$$

En este sistema existe una energía pre-impacto E y una energía post-impacto E', suma de las energías de los móviles al inicio y al final de la colisión respectivamente. La diferencia entre ellas debe ser atribuida al trabajo mecánico de deformación L_D. Esta cantidad es también considerada como la *energía cinética disipada* durante en la colisión. Si bien *energía* y *trabajo* son conceptos físicos distintos y relacionados, matemáticamente son cantidades equivalentes, y comparten las mismas unidades (Joule en el sistema MKS). Esa relación y equivalencia puede expresarse:

$$E - E' = L_D$$

$$\tfrac{1}{2} m_1 v_1^2 + \tfrac{1}{2} m_2 v_2^2 = \tfrac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \tfrac{1}{2} m_2 v_2'^2 + L_D$$

Se puede demostrar que existe una relación entre trabajo de deformación, energía cinética disponible y coeficiente de restitución, expresada de la manera siguiente:

$$\boxed{L_D / (E - E_C) = (1 - e^2)}$$

La demostración de esta relación es compleja, pero se puede simplificar si se considera el caso particular de energía del centro de masa nula. Esta condición se cumple entre otros casos en los ensayos de choque de vehículos contra barreras rígidas. La velocidad de la barrera previa y posterior al impacto es nula ($v_2 = v_2' = 0$). Y como la masa de la barrera solidaria a la Tierra resulta de magnitud infinita respecto de la masa del automóvil, la velocidad del centro de masa resulta nula

$$v_{Cs} = [m_1 \ v_1] / [m_1 + m_2] = v_1 / [= 0$$

La expresión del coeficiente de restitución queda reducida a:

$$e = -(v' / v_1)$$

y la velocidad inicial de la colisión v_1 será al finalizar $v' = - e\, v_1$. Como la velocidad del centro de masa es nula, lo será la energía cinética del centro de masa del sistema. La energía cinética puesta en juego en la colisión será igual a la del vehículo al iniciar la colisión:

$$E = \tfrac{1}{2} m_1 v_1^2$$

y la energía al final de la colisión

$$E' = \tfrac{1}{2} \ m_1 v'^2 = \tfrac{1}{2} m_1 (e\, v_1)^2$$

operando se tendrá:

$$E - E' = L_D = \frac{1}{2}\, m_1\, v_1^2 - \frac{1}{2}\, m_1\, (e\, v_1)^2$$

$$L_D = \frac{1}{2}\, m_1\, v_1^2\, (1 - e^2) = E\, (1 - e^2)$$

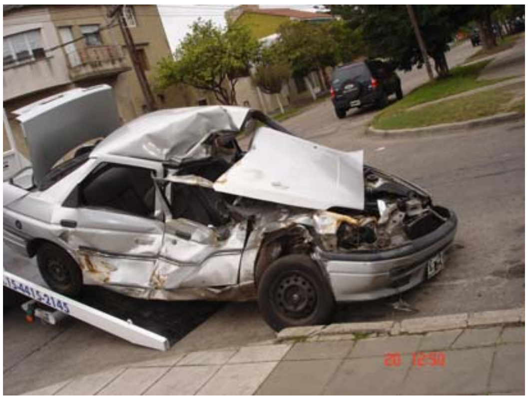
$$\boxed{L_D / E = (1 - e^2)}$$

Que resulta la expresión equivalente a la anterior para el caso particular considerado.

ANÁLISIS DE UNA COLISIÓN (MASAS DISÍMILES)

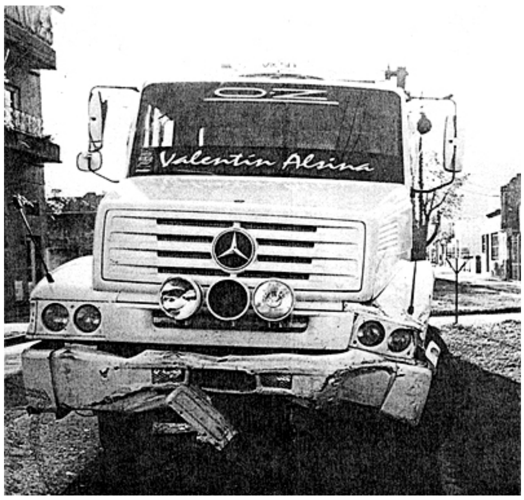
Analizaremos es una colisión en una intersección urbana, en la que intervinieron tres vehículos, a saber:

1. Automóvil Ford Orion GLX 1.8 modelo 1995 que circulaba en el sentido Oeste a Este. Este automóvil presentó huellas de un fuerte impacto sobre el lateral derecho, y de un impacto frontal angular en el sector delantero izquierdo.



El conductor falleció a consecuencia de las lesiones producidas en el impacto, siendo las más significativas relacionadas con el impacto en el lateral derecho: contusión occipital derecho; cortante dorso muñeca derecha; esquimosis cara interna tobillo derecho, fractura brazo derecho. Excoriaciones en: la región pectoral derecha, cresta ilíaca derecha, glúteo derecho, pierna derecha, cara lateral derecha del cuello, múltiples en brazo derecho y dorso mano izquierda (todas acusan contacto con superficie rugosa en dirección tangencial). El examen interno del tórax presenta: fractura de ambas parrillas costales, desgarros pulmonares con derrame de sangre líquida; desgarro ventricular, desgarro de hígado y de bazo; intestinos meteorizados; con derrame de sangre.

2. Camión Mercedes Benz LK 1218 modelo 1999 Tren 1S-1D, con un chasis con sobre estructura y equipamiento adaptado para el izaje y trasporte de volquetes. Este vehículo circulaba en sentido de Sur a Norte, con dos volquetes metálicos aparentemente vacíos. Los daños principales de este rodado fueron: rotura paragolpes delantero, faros rompenieblas, faros reglamentarios, abolladura guardabarro delantero izquierdo, desencuadre de capot, rotura de radiador y paleta del ventilador.

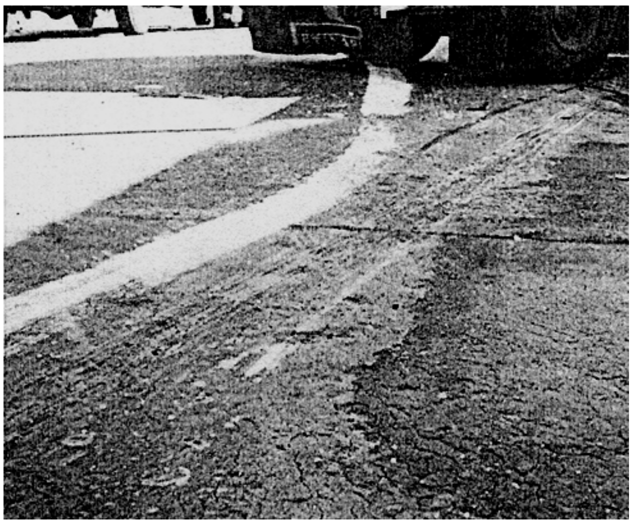


3. Automóvil Peugeot 406 dominio APC-358, el que se encontraba estacionado sobre la vereda Nor-Este, sin ocupantes en su interior. Este vehículo termina arrollando un pequeño árbol, y con el paragolpes delantero apoyado en una columna de palmera.

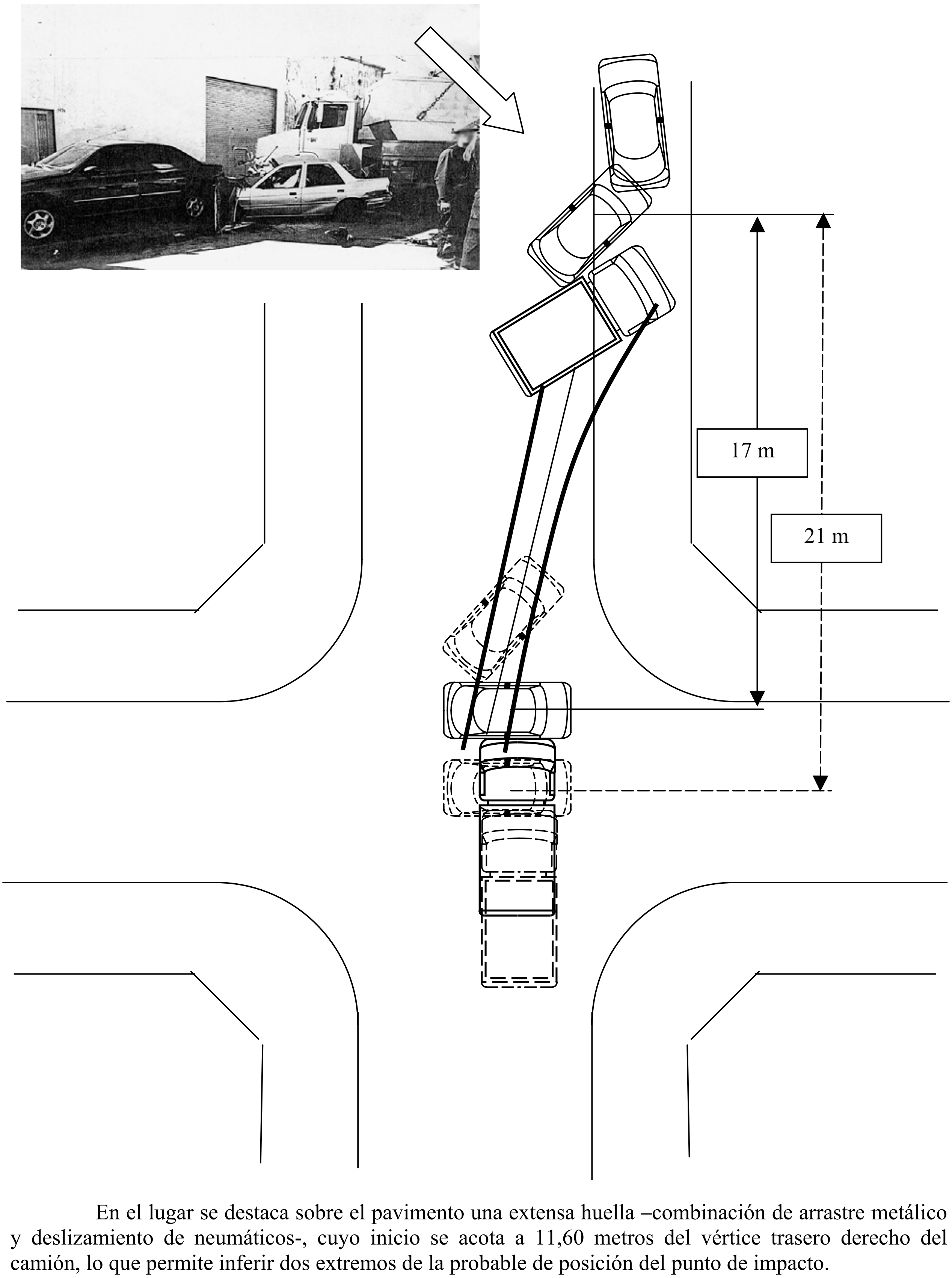
El reconocimiento del lugar del siniestro nos muestra una zona residencial de construcciones bajas, densidad de tránsito mediana, pavimento de hormigón en buen estado de aproximadamente 8,60 y 8 metros de ancho.

Los daños observados en los tres vehículos y las trayectorias pre impacto de los mismos nos permiten inferir la siguiente secuencia de ocurrencia de las sucesivas colisiones:

a. El camión (2) impactó en el lateral derecho del Ford Orion (1), desplazándolo de derecha a izquierda e imprimiéndole un leve giro en el sentido contrario de las agujas del reloj..
b. En el final de su desplazamiento el Ford Orion impacta con su parte frontal contra la parte inferior trasera izquierda del Peugeot 406 (3), que se encontraba estacionado en la vereda.
c. El camión (2) desarrolló un movimiento post impacto combinado de traslación, con un leve sesgo hacia su derecha, terminando su trayectoria sobre la vereda. A su vez, como producto del impacto, y *posiblemente* alguna maniobra tardía de esquive del conductor, el vehículo realizó un giro en el sentido de las agujas del reloj

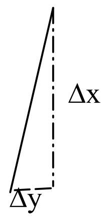


El siguiente croquis en escala 1:200 indica estos aspectos relevantes a los efectos del análisis de la posible mecánica del accidente



En el lugar se destaca sobre el pavimento una extensa huella –combinación de arrastre metálico y deslizamiento de neumáticos-, cuyo inicio se acota a 11,60 metros del vértice trasero derecho del camión, lo que permite inferir dos extremos de la probable de posición del punto de impacto.

El primero de ellos supone que Ford Orion circulaba pegado a la vereda Norte. Esta posición es indicativa de un recorrido post impacto de ambos vehículos de 17 metros en la dirección Sur a Norte. El otro extremo supone que el Ford Orion circulaba con el borde izquierdo en coincidencia con el eje central de la calle; la distancia referida en este caso es de 21 metros.



El esquema de desplazamiento post impacto de puntos fijos de los vehículos (próximos a los centros de masa respectivos) es el descripto en el esquema. El desplazamiento en el sentido del eje Y (Δy) es de 3 metros en ambas consideraciones. En el sentido del eje X (Δx) varía entre 17 y 21metros. El ángulo respecto al eje principal de la arteria (X) varía entre 8º y 10º.

EL MODELO MATEMÁTICO DEL SINIESTRO

Del croquis relevado se puede estimar un alto grado de alineación de los centros de masa de los vehículos con la dirección de movimiento del camión, lo que asimila el hecho a una colisión colineal. Para un ángulo tan pequeño, se puede asimilar el desplazamiento en la dirección oblicua de post impacto al rango de 17 a 21 metros. Analizaremos el caso con esta simplificación, dejando para una discusión posterior la validez de esta simplificación.

El Ford Orion, cuya masa con un ocupante se estima en m_1= 1.100 kg (1,1 T), se desplaza con posterioridad al impacto en forma predominantemente lateral; se asume un coeficiente de fricción medio $\boldsymbol{u}_1$ = 0,75. En su fase final impacta contra la parte baja del sector trasero de un Peugeot 406 estacionado sobre la vereda al que desplaza unos 6 metros y lo hace chocar contra una columna de palmera creosotada. La energía residual para generar este segundo impacto se estima en un valor conservador de 30 kJ. Esa energía implica una velocidad final del Orion de por lo menos 7,4 m/s. Con todos estos valores, la velocidad post impacto del Orion estará determinada por la ecuación

$$v'_1 = (2\, \boldsymbol{u}_1\, g\, \Delta x + v_1^2)^{1/2} = (\, 2 \times 0{,}75 \times 9{,}81\ \ \Delta x + 7{,}4^2)^{1/2}$$

$$v'_1 = (\, 14{,}7\, \Delta x + 7{,}4^2)^{1/2} \qquad [1]$$

El desplazamiento post impacto del camión es una combinación de deslizamiento por ruedas bloqueadas, desplazamiento lateral parcial y rodadura. En estas condiciones el coeficiente de fricción no está determinado, y prudentemente se estima variable entre $0{,}3 < \boldsymbol{u}_2 < 0{,}6$. La velocidad post impacto del camión se estima de la ecuación

$$v'_2 = (2\, \boldsymbol{u}_2\, g\, \Delta x\,)^{1/2} = \ 4{,}43\, (\boldsymbol{u}_2\, \Delta x)^{1/2} \qquad [2]$$

Con ambos valores de velocidad post impacto, podemos determinar el valor de la energía cinética post impacto de la ecuación:

$$E' = ½\, (m_1\, v'^2_1 + m_2\, v'^2_2) \qquad [3]$$

La magnitud de la masa del camión, considerando el sobrechasis, la estructura de elevación de volquetes y dos volquetes, debería estar, de manera segura en un rango entre 8 y 12 toneladas.

La deformación lateral del Ford Orion, por encima de la estructura interior, y la diferencia notable de rigidez entre este sector de la carrocería y la defensa frontal del camión, hace imposible estimar la energía disipada en el impacto, como trabajo mecánico de deformación *L*, por cualquiera de los modelos estáticos. Por ello imputamos un amplio marco de variabilidad de este valor

$$70 \text{ kJ} < L < 130 \text{ kJ}. \qquad [4]$$

La energía de pre-impacto será la suma:

$$E = E' + L \qquad [5]$$

y la velocidad de impacto del camión (a quien corresponde toda la energía calculada como desarrollada en la dirección de X), la calculamos como:

$$v_2 = \ (2\, E\, /\, m_2)^{1/2} \qquad [6]$$

Las relaciones [1] a [6], conforman lo que hemos dado en llamar el *modelo matemático del siniestro*. Cada una de las ecuaciones responde a un fenómeno físico desarrollado en el suceso, con las simplificaciones e hipótesis planteadas en el inicio. Cada una de ella contiene una relación donde hay una o más *incógnitas*. Analizando las seis relaciones, observamos que existe dos incógnitas más que ecuaciones, y no existe ninguna razón ni método que permita resolver el sistema.

La única forma de poder aproximar algún resultado de los parámetros que nos interesan (esencialmente la velocidad pre-impacto del camión v_2), es imponer valores a ciertas incógnitas y transformarlas en *variables* o *parámetros* (para evitar la arbitrariedad de afirmar que una incógnita tiene a priori un valor determinado, lo que le quitaría rigurosidad a la investigación y seriedad a los resultados). En efecto si se impone una variación Δx (que sabemos que se encuentra entre 17 y 21 metros) de 0,5 en 0,5 metros, obtendremos nueve resultados de v'_1, variables entre 17,4 y 19,1 m/s.

De igual manera, combinando una doble variación, la de Δx ya indicada, a la que agregamos una variación del coeficiente $\boldsymbol{u}_2$ ente 0,3 y 0,6, tomado con una progresión de 0,05, obtendremos 63 resultados variables de v'_2 entre 10,0 y 15,7 m/s.

Si a todo ello imponemos la masa del camión en 10 toneladas (¡totalmente arbitrario según lo que sabemos a esta altura del análisis!) llegamos a un conjunto de 63 resultados variables para la energía post impacto del sistema, entre 668 y 1.436 kJ. E imponemos un valor de L variable dentro del rango indicado en [4], combinando en forma progresiva $\boldsymbol{u}_2$ y L (0,03-70 kJ; 0,035-80 kJ;…; esta forma de disponer los valores del parámetro L sólo intenta evitar que el conjunto de valores se dispare a la friolera de ¡¡¡441 conjuntos de valores!!!). Ahora sumando energía post impacto y trabajo de deformación, obtenemos la energía de impacto del camión, incluida en un conjunto de 63 valores variables entre 678 y 1.566 kJ. A este conjunto se corresponde otro, de las posibles velocidades de impacto del camión, que se pueden expresar como:

$$11{,}6 \text{ m/s} < v_2 < 17{,}7 \text{ m/s}$$

AMPLIANDO EL MODELO

La dispersión de resultados es demasiado amplia (más del 50 %); y depende de demasiadas imposiciones no verificables fácilmente, como para dar por terminado el análisis en este punto. Es imprescindible explorar otras alternativas de análisis.

A esta altura debemos recurrir a las relaciones del coeficiente de restitución e. Como se ha visto hay una expresión cinemática de e:

$$e = -(v'_1 - v'_2)/(v_1 - v_2) = -(v'_1 - v'_2) / v_2 \qquad [7]$$

y una relación con el trabajo de deformación y la energía disponible

$$L / (E - E_C) = (E - E') / (E - E_C) = (1 - e^2)$$

que operando se puede expresar como:

$$e = \{1 - [(E - E') / (E - E_C)]\}^{1/2} \qquad [8]$$

Podemos postular que para el caso bajo análisis existe un *único valor* de e y *dos maneras* de calcularlo, y suponer que para el conjunto de 63 valores calculados, hay 63 pares de valores de e calculados con las ecuaciones [7] y [8] en forma independiente. Dentro de nuestro postulado, cabe la hipótesis de hay un caso donde los resultados de ambas ecuaciones coinciden (dentro de una dispersión aceptable), y esa coincidencia establece *la condición más probable* de parámetros de ocurrencia del hecho, dentro del conjunto de 63 valores indicados.

Organizando el cálculo en una planilla de cálculo comercial, como las que se encuentran disponibles en el mercado, puede verificarse que efectivamente existe *una y solo una* condición donde todos los parámetros reflejados en las relaciones [1] a [6], volcados a las ecuaciones [7] y [8], dan como resultado una *dispersión de e* nula (o muy pequeña).

$$d = e_{[7]} - e_{[8]} \rightarrow 0 \qquad [9]$$

Hechos los cálculos ponemos en una tabla comparativa los resultados que satisfacen el *modelo matemático amplio*, constituido por las relaciones [1] a [9]. De esta manera se tiene:

masa del camión m_2 [Ton]	**8**	**10**	**12**
coeficiente de restitución e	0,290	0,200	0,204
dispersión d [%]	0,3	0,2	0,4
coef. de fricción del camión $\boldsymbol{u}_2$	0,5	0,6	0,6
trabajo de deformación L [kJ]	110	130	130
desplazamiento Δx [metros]	18,0	18,0	18,5
velocidad de impacto del camión v_2 [m/s]	**15,7**	**16,5**	**16,4**

Observemos que de las (63 x 3) soluciones posibles, nos hemos reducido a un conjunto de tres, que a su vez dependen de la masa del camión. En los tres casos las variables o *parámetros* a los que acudimos para encontrar soluciones a nuestro modelo ($\boldsymbol{u}_2$ - Δx - L) resultan bastante coincidentes, y por lo tanto los resultados (e, y sobre todo la velocidad v_2) también lo son. Podríamos cerrar nuestro análisis en este punto. O incluso podríamos arriesgar, con solo ver la tabla de resultados, que la masa del camión se encuentra entre 10 y 12 toneladas, probablemente más cerca del primer valor.

Podemos intentar una última verificación. En nuestro modelo original hemos *impuesto* para todos los casos un coeficiente de fricción lateral $\boldsymbol{u}_1$ en el desplazamiento del Ford Orion de 0,75. Ahora, con resultados estabilizados, podemos atrevernos a formularnos esta pregunta:

¿Cómo incide una variación de este valor -a menos- en la velocidad de impacto del camión?.

Para ello podemos analizar como varían los parámetros calculados, fijando el parámetro masa del camión m_2 = 10 T, para un rango $0,55 < \boldsymbol{u}_1 < 0,75$. Rehacemos los cálculos (la planilla que elaboramos anteriormente nos sirve a estos fines) y tenemos:

$\boldsymbol{u}_1$	$\boldsymbol{v}_1$‘	L	e	d %	$\boldsymbol{v}_2$
0,55	15,4 – 16,8	130	0,09	3,1	**16,3**
0,60	16,0 – 17,4	130	0,11	2,7	**16,3**
0,65	16,5 – 18,0	130	0,15	2,0	**16,4**
0,70	17,2 – 18,5	130	0,18	0,9	**16,5**
0,75	17,5 – 19,1	130	0,20	0,2	**16,5**

Y nuevamente los resultados son estables. La mejor combinación está el orden de $\boldsymbol{u}_1$ = 0,75, L = 130 kJ, e = 0,20 y $\boldsymbol{v}_2$ = 16,5 m/s. Podemos seguir nuestro análisis del siniestro con la certeza que la velocidad del camión al momento del impacto era superior a 55 km/h y muy probablemente de 60 km/h.

DISCUTIENDO (y DESCONFIANDO) DE LOS RESULTADOS

No hay sueño más peligroso que el que se hace sobre laureles. Resultados tan cerrados como los que acabamos de obtener, son una tentación para dejar de ver otros problemas asociados a la cuestión. En la parte final de este artículo nos plantearemos algunos interrogantes. Algunos los dejaremos sin respuesta para el disfrute del lector. Sobre otros volveremos en otra oportunidad, desde otros enfoques de la modelización física y matemática de los siniestros. Es decir que en lo que sigue, intentamos fijar la agenda de problemas a resolver, con distintos recursos y para distintos objetivos.

En primer lugar debería dilucidarse el por qué los valores de velocidad de impacto del camión son tan estables para variaciones tan importantes de la masa del mismo, o del coeficiente de fricción lateral del Ford Orión. De igual manera, por qué los valores de trabajo de deformación en el impacto no varían de manera significativa, e incluso llegar a determinar que error introduce el haber impuesto una energía de impacto final –entre el Ford Orión y el Peugeot estacionado- de 30 kJ. Un análisis a fondo de esta cuestión podría habilitar una serie de nociones útiles para el abordaje de otras colisiones con masas disímiles

En segundo lugar corresponde preguntarse si el choque, cuya apariencia es de naturaleza altamente plástica (ver las fotografías del lateral derecho del Ford Orión), se compadece con un coeficiente de restitución 0,20 o mayor aún. Un análisis de este aspecto puede darle mayor consistencia o mostrar las falencias del análisis realizado.

La tercera cuestión remite a la colinealidad del impacto, asumida como hipótesis inicial. La posición relativa en el impacto es consistente si la velocidad del Ford Orión al comenzar la colisión es nula o está próxima a ella. De lo contrario *uno de los vectores velocidad no se encuentra en la dirección de la recta que une a ambos centros de masa*, que es la definición de choque colineal.

Este punto nos lleva a la cuarta cuestión. *¿Cómo estimar la velocidad del Ford Orión al iniciarse el contacto?*. Un investigador con cierta formación y experiencia se vería tentado a componer vectorialmente los impulsos lineales de ambos vehículos. El procedimiento es muy sencillo como vemos a continuación.

El modelo, en su resultado más consistente, nos dice que la distancia recorrida por ambos vehículos en la dirección post impacto es de 18 m en el sentido de X y 3 metros en el sentido del eje Y. El ángulo de la dirección oblicua respecto del eje X tiene una tangente cuyo valor es (3/18). Como sabemos que el camión de masa 10 T tenía una velocidad de 16,5 m/s, el impulso en el sentido de Y, el impulso del Ford debería ser, por composición de vectores [10 T x 16,5 m/s x (3/18)] = 27,5 T m/s, que dividido por la masa del Ford Orión (1,1 T) nos devuelve como resultado una velocidad de éste de 25 m/s … ¡¡¡90 km/h!!!.

La magnitud de este valor nos debe inducir alguna inquietud. *¿Es aplicable la composición vectorial en este caso?* (arrastre por rozamiento entre la trompa del camión y el lateral del Ford Orión). *El ángulo de salida de la colisión ¿coincide con la recta que une los puntos de impacto y de reposo?. ¿Cómo considerar la incidencia en este cálculo de alguna maniobra previa de giro del camión?.* Hemos visto más de una vez estos cuestionamientos. Y también hemos presenciado soluciones “all uso nostro”, basadas en principios universales, expresados como “*a mi me parece*”, o bien “*según mi larga experiencia*”. Pero como no adherimos a esa escuela de pensamiento, suponemos que para un análisis de esta cuestión deberíamos recurrir a un *análisis dinámico de la colisión* (previo verificar la preeminencia de la colinealidad). Con algunos rangos de tiempo, fuerza y aceleración, que obtuviéramos de ese análisis, podríamos considerar movimientos combinados de rotación y traslación de los vehículos durante el período de duración de la colisión, y abordar esta faz del problema desde un punto de vista científico, y por ende objetivo.

Claro: son otros temas, ajenos a los conceptos de restitución y energía disponible en la colisión.

Buenos Aires, Marzo de 2006.--