

EL MODELO DE *Ishikawa* PARA LA COLISIÓN GENERALIZADA

Ing. Aníbal O. García.

RESUMEN

En otros trabajos contemporáneos al presente hemos desarrollado la integración de algunos conceptos de la dinámica de la colisión (velocidad equivalente de barrera, restitución y principios conservativos), al análisis de la colisión alineada excéntrica¹ y la colisión oblicua de masas puntuales².

El presente trabajo pretende ser una fase superadora de esas simplificaciones. Las colisiones en el mundo real se producen en general entre vehículos que no responden de manera acabada a la imagen de masa puntual, ni están alineadas en la manera ideal que simplifica su tratamiento. La realidad es una combinación de ambas configuraciones; oblicuidad de las direcciones principales, y excentricidad debida a las dimensiones finitas del vehículo.

Muchos autores clásicos han realizado desarrollos integrales pero ninguno de ellos llegó a poder sintetizar la generalización de la geometría de colisión con los conceptos más avanzados del fenómeno, como, a nuestro entender, lo hiciera el investigador japonés *Hirotsu Ishikawa*³ de manera teórica y experimental, y que es objeto de un análisis detallado en este trabajo.

En el texto que sigue las referencias numéricas remiten a conceptos y criterios ya explicitados en nuestro libro editado en 2011⁴. Esta ampliación ha sido incluida en la sección 6 de la segunda edición del mismo.

¹ *Aníbal O. García* – EL ANÁLISIS DE LA COLISIÓN ALINEADA EXCÉNTRICA en www.perarg.com.ar

² *Aníbal O. García* – LA COLISIÓN OBLICUA en www.perarg.com.ar

³ *Hirotsu Ishikawa* – IMPACT MODEL FOR ACCIDENT RECONSTRUCTION – NORMAL AND TANGENTIAL RESTITUTION COEFFICIENTS (SAE 930654), e IMPACT CENTER AND RESTITUTION COEFFICIENTS FOR ACCIDENT RECONSTRUCTION (SAE 940564)

⁴ *Aníbal O. García* – ACCIDENTES DE TRÁNSITO – Investigación y Reconstrucción, Ed. Nueva Librería, Buenos Aires 2011 (ISBN 978-987-1104-55-0).

1.- EL MODELO GENERAL DE COLISION EN EL PLANO

El primer problema que se presenta al considerar cuerpos de dimensiones finitas (en lugar de masas puntuales), es definir el centro de momentos o centro de impacto. Es en ese punto en que se localiza en centro del sistema de coordenadas de impulsos y rotaciones en la colisión.

Usualmente se lo considera fijo en el centro de la superficie de deformación residual, y así lo seguiremos considerando. Sin embargo, el análisis detallado de la dinámica de colisión, prueba que la ubicación del centro de rotación, varía durante el desarrollo de la deformación en torno al centro de la superficie de máxima deformación dinámica, la que se alcanza entre los 60 y 80 milisegundos de iniciado el contacto.

El segundo tema a resolver es la disipación de energía cinética en la dirección tangencial. Esta está relacionada con la variación de cantidad de movimiento, y ambas se deben a la acción de la fuerza de fricción entre ambos cuerpos, debidas a un coeficiente μ_r . No está muy claro el valor de este coeficiente para distintas condiciones de colisión. Algunas pistas se obtienen en la determinación del coeficiente r de *Weaver* y *Brach* (4.2), incluyendo distintas formas de variación del fenómeno de fricción entre los vehículos.

Tanto la disipación de energía como la variación de impulso dan cuenta de que las componentes tangenciales de las velocidades iniciales v_{1t} y v_{2t} son distintas. De lo contrario no existiría rozamiento entre los rodados en la colisión. Por ello es una cuestión clave discernir en el análisis de colisiones, la existencia de deformaciones longitudinales y transversales⁵. En aquellos casos en que la deformación transversal es relativamente pequeña, de algunos pocos centímetros, el trabajo de deformación en ese sentido resulta en general despreciable en las consideraciones de disipación de energía, y puede aplicarse con aceptable precisión el modelo de masas.

Por el contrario, cuando estas deformaciones son significativas, y es necesario conocer las fuerzas aplicadas transversalmente, su momento y el impulso angular que deriva en la rotación post impacto, el desarrollo teórico y experimental de *Ishikawa* aporta un criterio de análisis más adecuado a esa complejidad.

La idea central de este modelo combina elementos del análisis de *Weaver* y *Brach*, superpuesto con el modelo de colisión excéntrica; ambos han sido analizados en extenso en la bibliografía citada en el comienzo. Con ellos se integra el sistema de coordenadas $[n;t]$, los coeficientes de restitución normal y tangencial, y el coeficiente de fricción entre los vehículos, con el significado dado a estos términos en el modelo de *Weaver* y *Brach*. Adicionalmente *Ishikawa* define un Índice de Impulso Generalizado r_0 (*Generalized Impulse Ratio* - GIR, en inglés), obtenido como el cociente entre los impulsos angular y normal para una condición ideal límite de plasticidad absoluta.

La forma matricial sintetiza seis ecuaciones básicas. Las cuatro primeras ecuaciones pueden ser físicamente concebidas como ecuaciones de equilibrio de vectores, equilibrio que expresa los principios conservativos. Las otras dos ecuaciones son relaciones de restitución

Las ecuaciones de impulso lineal adoptan como centro de momentos el centro de impacto. De esta manera los momentos de los vectores impulso lineal o cantidad de movimiento son nulos. Se obtienen así dos ecuaciones del equilibrio de vectores cantidad de movimiento en las direcciones $[n;t]$, y dos ecuaciones del equilibrio de vectores momento (*impulso angular del vehiculo* en la dirección normal z), una para cada uno de los vehículos. Además se escriben dos ecuaciones que expresan la relación de restitución en la dirección de n y en la dirección de t . Al lector interesado

⁵ Cuando el texto alude a las direcciones longitudinales o tangenciales, y a las normales o transversales, remite a la descomposición según la proposición de *Weaver* y *Brach*.

recomendamos ver el planteo y deducción completa de este modelo en los trabajos citados en la bibliografía.

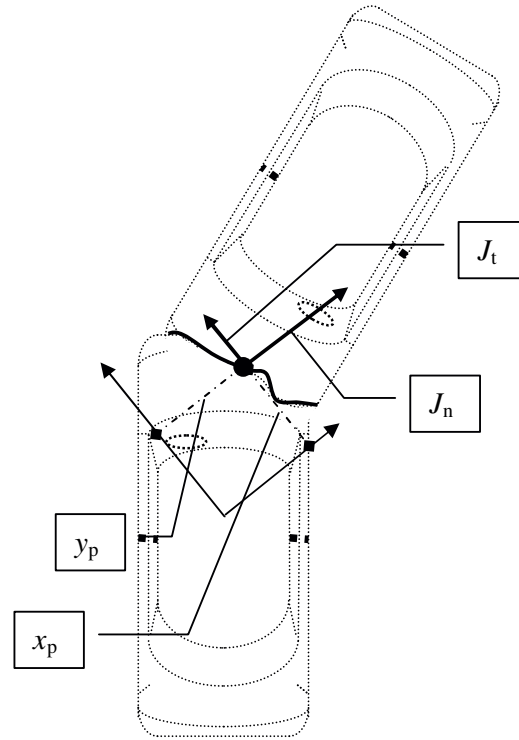


Fig. I – Colisión oblicua generalizada

Para definir las direcciones de impulso lineal J_t y J_n , cuyo punto de aplicación es el centro de colisión, es necesario superponer a ambos vehículos en la posición de máxima deformación. Se define así la dirección de los ejes $[n;t]$ en el centro de masa de cada uno de ellos. Respecto del centro de masa de cada vehículo, el centro de colisión tiene las coordenadas x_p en la dirección de t , e y_p en la de n . Como se puede apreciar, x_p e y_p son las componentes ortogonales del radio R de rotación instantánea post impacto.

Un aporte singular de *Ishikawa* es el modo de determinación de las coordenadas x_p e y_p . Tomando como referencia la terna $[x;y]$ en el centro de masa del automóvil, la recta que define la superficie deformada media es $Ax + By + C = 0$. Con este recurso se puede establecer analíticamente el centro de impacto mediante las ecuaciones siguientes:

$$x_p = \frac{Bm \cdot i^2 \omega - CJ_x}{AJ_x + BJ_y}; \quad y_p = \frac{-Am \cdot i^2 \omega - CJ_y}{AJ_x + BJ_y}$$

donde ω es la velocidad angular post impacto y $J_x; J_y$ el impulso en el sistema de coordenadas adoptado, según el esquema de la figura II.

Con estos valores se determinan los coeficientes de reducción de masa puntual respecto de los ejes $[n;t]$ siguientes:

$$G_{1n} = \frac{i_1^2}{i_1^2 + x_{p1}^2}; \quad G_{2n} = \frac{i_2^2}{i_2^2 + x_{p2}^2}; \quad G_{1t} = \frac{i_1^2}{i_1^2 + y_{p1}^2}; \quad G_{2t} = \frac{i_2^2}{i_2^2 + y_{p2}^2};$$

de donde surgen las siguientes ecuaciones de *masas de colisión reducidas* respecto de los ejes n (M_n) y t (M_t):

$$M_n = \frac{G_{1n}m_1 \cdot G_{2n}m_2}{G_{1n}m_1 + G_{2n}m_2}; \quad M_t = \frac{G_{1t}m_1 \cdot G_{2t}m_2}{G_{1t}m_1 + G_{2t}m_2};$$

cuyas unidades son Kg.

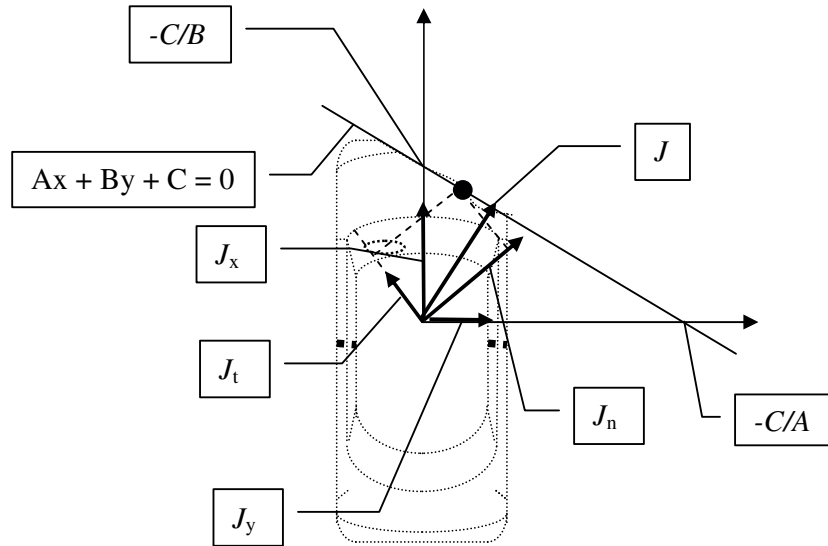


Fig II – Composición de impulsos y centro de colisión

Ishikawa también define un coeficiente m_0 de la siguiente manera:

$$m_0 = \frac{x_{p1} \cdot y_{p1}}{m_1 \cdot i_1^2} + \frac{x_{p2} \cdot y_{p2}}{m_2 \cdot i_2^2}$$

cuyas unidades son Kg^{-1} . ¿Qué significa este término? Realmente no existe una definición física del mismo. Su origen es el resultado de las operaciones algebraicas antes citadas y, como se verá más adelante, aparece siempre dentro de un producto $[M_n \cdot M_t \cdot m_0]$. Desde este punto de vista se puede asignar a este término una función de moderación.

Por otra parte, el valor del término m_0 depende entre otros, del producto $[x_p \cdot y_p]$ en cada uno de los automóviles; un valor pequeño de alguno de ellos tiende a anular el término. En tanto el producto $[x_p \cdot y_p]$ refleja una *doble excentricidad*; se puede asumir entonces que la minimización de uno de los brazos de excentricidad, tiene a anular la incidencia de la doble excentricidad. En el límite, el caso se reduce a una colisión excéntrica alineada. Por ello se nos ocurre asignar al término el carácter de factor *moderador del área de excentricidad*. Para tomar una idea de la incidencia de este factor, analícese las simplificaciones que se producirían en las ecuaciones de impulso que se escriben a continuación para el caso en que $m_0 \approx 0$.

Siguiendo el criterio empleado en el trabajo de colisión oblicua de masas puntuales, llamamos velocidad relativa *normal* a la diferencia $v_{rn} = v_{1n} - v_{2n}$. Esta es conocida también como velocidad relativa de deformación (*relative deformation speed – RDS*). Tenemos también la velocidad relativa *tangencial*, producto de la diferencia $v_{rt} = v_{1t} - v_{2t}$, que representa la velocidad relativa

de deslizamiento (*relative sliding speed* – RSS). Si adoptamos como centro de momentos al centro de colisión, de manera de anular el momento angular, las ecuaciones de impulso deducidas de la matriz de *Ishikawa*, resultarán:

$$J_n = \frac{1}{1 - M_n M_t m_0^2} \cdot [M_n \cdot v_{rm} \cdot (1 + e_n) + M_n M_t m_0 \cdot v_{rt} \cdot (1 + e_t)] =$$

$$= \frac{-1}{1 - M_n M_t m_0^2} \cdot \left[M_n \cdot v'_{rm} \cdot \left(1 + \frac{1}{e_n}\right) + M_n M_t m_0 \cdot v'_{rt} \cdot \left(1 + \frac{1}{e_t}\right) \right]$$

$$J_t = \frac{1}{1 - M_n M_t m_0^2} \cdot [M_n M_t m_0 \cdot v_{rm} \cdot (1 + e_n) + M_t \cdot v_{rt} \cdot (1 + e_t)] =$$

$$= \frac{-1}{1 - M_n M_t m_0^2} \cdot \left[M_n M_t m_0 \cdot v'_{rm} \cdot \left(1 + \frac{1}{e_n}\right) + M_t \cdot v'_{rt} \cdot \left(1 + \frac{1}{e_t}\right) \right]$$

Haciendo $e_n = e_t = 0$ en estas ecuaciones de impulso se obtienen los valores de impulso singulares J_{t0} y J_{n0} . El cociente entre ambos es el *Índice de Impulso Generalizado* r_0 , cuyo valor resultará:

$$r_0 = \frac{J_{t0}}{J_{n0}} = \frac{M_n M_t m_0 \cdot v_{rm} + M_t \cdot v_{rt}}{M_n \cdot v_{rm} + M_n M_t m_0 \cdot v_{rt}},$$

valor coincidente con el coeficiente de fricción cuando $e_n = e_t$. La energía disipada como trabajo mecánico total –deformación y fricción-, se escribe como:

$$L_d = \frac{1}{2 \cdot (1 - M_n M_t m_0^2)} [M_n \cdot v_{rm}^2 \cdot (1 - e_n^2) + M_t \cdot v_{rt}^2 \cdot (1 - e_t^2)] + \frac{M_n M_t m_0}{1 - M_n M_t m_0^2} \cdot v_{rm} \cdot v_{rt} \cdot (1 - e_n e_t)$$

que cuando $e_n = e_t = 0$ se transforma en la energía disponible E_d

En la colisión colineal, la expresión que relaciona a ambos términos $\frac{L_d}{E_d} = 1 - e^2$, puede

$$\text{reescribirse como } e = \sqrt{\frac{E_d - L_d}{E_d}} = \sqrt{\frac{E_r}{E_d}}$$

La diferencia entre energía disponible y trabajo de deformación es la energía recuperada E_r en la fase final de la colisión: entre t_c y T (sección 5). Depende de la elasticidad de la masa no deformada en el final de la colisión y de la finitud de las dimensiones de los vehículos. Ambas en conjunto pueden causar el rebote o la laxitud en el final del contacto, que se manifiesta como roce entre los vehículos durante el contacto, y en impulso angular y rotación hacia la finalización del mismo.

El choque resulta entonces caracterizado por la combinación de los coeficientes de restitución normal y tangencial, y de la energía recuperada.

Las características estructurales y la configuración de la posición relativa entre los automóviles en el impacto, determinan cuando hay rebote, cuando hay deslizamiento debido a la rotación del antagonista, y en que magnitud se manifiestan esos movimientos.

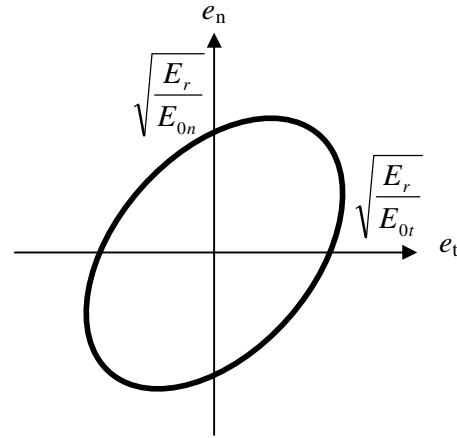
Trasladando el concepto de restitución y energía recuperada de la colisión colineal a una forma generalizada como la que se analiza, se puede escribir el coeficiente de restitución normal como:

$e_n = \frac{1}{v_m} \cdot \sqrt{\frac{2E_r}{M_n}}$, cuyo desarrollo conduce a una ecuación general de energía y restitución del tipo:

$$\frac{e_n^2}{E_r/E_{0n}} + \frac{e_t^2}{E_r/E_{0t}} + 2e_n e_t \cdot \frac{\sqrt{M_n M_t m_0^2}}{E_r/\sqrt{E_{0n} E_{0t}}} = 1$$

Esta es la ecuación de una elipse en un sistema de coordenadas $[e_n ; e_t]$ cuyos valores singulares son $\pm \sqrt{\frac{E_r}{E_{0n}}}$ en el eje e_n y $\pm \sqrt{\frac{E_r}{E_{0t}}}$ en el eje e_t . Los valores específicos de energía de referencia son:

$$E_{0n} = \frac{M_n \cdot v_m^2}{2 \cdot (1 - M_n M_t m_0^2)} \quad \text{y} \quad E_{0t} = \frac{M_t \cdot v_{rt}^2}{2 \cdot (1 - M_n M_t m_0^2)}$$



En base a esta ecuación general se pueden individualizar los coeficientes de la colisión como:

$$e_n = \frac{M_t \cdot v_{rt} (1 + e_t) \cdot (1 - \mu m_n m_0)}{M_n \cdot v_m (\mu - M_t m_0)} - 1 \quad e_t = \frac{M_n \cdot v_m (1 + e_n) \cdot (\mu - M_n m_0)}{M_t \cdot v_{rt} (1 - \mu \cdot M_n m_0)} - 1$$

$$\mu = \frac{J_t}{J_n} = \frac{M_n M_t m_0 \cdot v_m (1 + e_n) + M_t \cdot v_{rt} (1 + e_t)}{M_n \cdot v_m (1 + e_n) + M_n M_t m_0 \cdot v_{rt} (1 + e_t)}$$

El desarrollo expuesto es la base de un plan experimental que en el año 1994 incluyó 45 ensayos de colisión entre dos automóviles de dimensiones y masas semejantes. Del total de ensayos, 32 de ellos fueron tangenciales (fronto-laterales), y los 13 restantes oblicuo-frontales, todos con diversos ángulos.

En el trabajo citado al inicio se exhiben fotografías y esquemas de los resultados de las colisiones, curvas de índices característicos, y las tablas que se reproducen en este texto, adaptando la simbología a la aquí empleada. En las tablas se informa ángulo de incidencia δ , incluido en la codificación de ensayo, masas, velocidades pre y post impacto, velocidades relativas normal y tangencial, coeficientes de restitución, de fricción e índice generalizado de impulso.

Los valores determinados por mediciones directas y/o cálculos derivados constituyen un arsenal de referencia muy denso y útil para orientar al investigador en el análisis de casos reales. Bien pueden ser una primera aproximación para elaborar un modelo de análisis, o bien una referencia para validar los resultados del cálculo.

2.- CONCLUSIONES ACERCA DE LA COLISIÓN.

La densidad de información obrante en el trabajo de *Ishikawa* excede los alcances de este texto, por lo que se recomienda al lector interesado acudir a la fuente original para completar y consolidar los conceptos y valores desarrollados. Las que siguen, resumen algunas de las conclusiones que bien expresan los *bordes* del problema de la colisión de automóviles en el plano.

1.- La **ubicación del centro de colisión** es próxima al centro de la superficie de contacto en el momento de máxima deformación. Esa ubicación varía durante la colisión, pero los desplazamientos pueden ser insignificantes cuando el índice de impulso generalizado r_0 es menor a 0,5. En este rango, el centro final de impacto se superpone con el de máxima deformación a los 60-80 ms de iniciado el contacto; en un solo caso de los 45 ensayos, la coincidencia se encontró con la posición alcanzada al final de la colisión (120 ms) Esta regularidad no se cumple en choques de baja velocidad, y ello es explicable por la influencia de las fuerzas exteriores, debidas a la interacción de las ruedas con el pavimento.

La ecuación basada en la recta que proyecta la superficie deformada es una muy buena representación analítica de la posición media del centro de colisión. En el trabajo original de *Ishikawa* se representan los desplazamientos de ese punto para distintas configuraciones y relaciones de velocidad y masa.

2.- La **duración de la colisión** se encuentra siempre en el rango de 100 a 150 ms. La máxima desaceleración coincide con la máxima deformación, en el lapso de 60 a 80 ms de iniciado el contacto. Hasta ese momento el desplazamiento angular es muy pequeño, entre 1 y 5°.

3.- El **coeficiente de restitución normal** e_n en colisiones laterales oscila en un rango de -0,3 a 0,5 en 28 de los 32 ensayos. Las excepciones fueron dos ensayos de doble excentricidad (*corner-to-corner*), y otros dos de alta velocidad con golpe de refilón (*high speed – side swipe*). Un coeficiente en negativo es indicación de que el vehículo colisionador continúa penetrando en la zona inicialmente ocupada por el antagonista, después de finalizado el contacto, por el efecto de rotación (figura III).

En impactos frontales la variación de e_n se encuentra entre 0 y 0,15 para velocidades de impacto mayores de 40 Km/h. Cuando la velocidad es de 5,5 m/s (20 Km/h) en choque laterales la variación es de -0,5 a 0,5, salvo casos especiales de *corner-to-corner* y *high speed – side swipe*. En general, y de un modo conservador, el valor de restitución normal e_n se encuentra entre dos

funciones del tipo $\frac{0,5}{v_m} < e_n < \frac{3}{v_m}$.

4.- El **coeficiente de restitución tangencial** e_t se encuentra también en un rango $\frac{0,5}{v_{rt}} < e_t < \frac{3}{v_{rt}}$

en los casos de colisiones fronto-laterales para diversos ángulos, donde se verifica un valor de e_n positivo. Una ecuación posible en colisiones laterales es:

$$e_t = 0,0396 \cdot r_0^2 - 0,4501 \cdot r_0 + 0,3066.$$

Estos valores regulares no se cumplen en colisiones frontales con ángulos distintos de 180°, donde la dispersión es absoluta.

5.- El **coeficiente de fricción** μ ente vehículos, para colisiones laterales, se aproxima bien a la ecuación:

$$\mu = -0,207 \cdot r_0^2 + 0,971 \cdot r_0 + 0,046.$$

En colisiones frontales se cumple muy aproximadamente $\mu = r_0$.

Todas las consideraciones precedentes fueron derivadas de los resultados de 26 ensayos -13 laterales y 13 frontales-, en los que la energía recuperada E_r estuvo en el orden de 0,1 a 4,5 KJ, con masas reducidas en la dirección normal de 200 a 500 Kg. Las velocidades normales de rebote se encontraron entre 0,5 y 3 m/s, de donde derivan las condiciones conservativas de las ecuaciones. Estas consideraciones son inaplicables en las configuraciones especiales tipificadas como *corner-to-corner* y *high speed – side swipe*.

3.- EXCEPCIONES AL MODELO GENERAL DE COLISIÓN EN EL PLANO

La figura III muestra dos casos típicos de colisión oblicua y excéntrica. En la configuración de la izquierda, la excentricidad es para el colisionado. Para el colisionante, el choque es plenamente frontal y colineal, siempre que la velocidad del primero sea moderada a nula. En ese caso, en el segundo vehículo habrá rebote. Pero si la velocidad del primero es muy grande, y por fricción produce la rotación del segundo, éste experimentará el impulso excéntrico en el frente, en la dirección lateral, que inducirá una rotación (en el sentido de las agujas del reloj en el dibujo). Esta condición particular se denomina *golpe de refilón a alta velocidad* con muy alta rotación final (*high speed – side swipe* en la literatura inglesa).

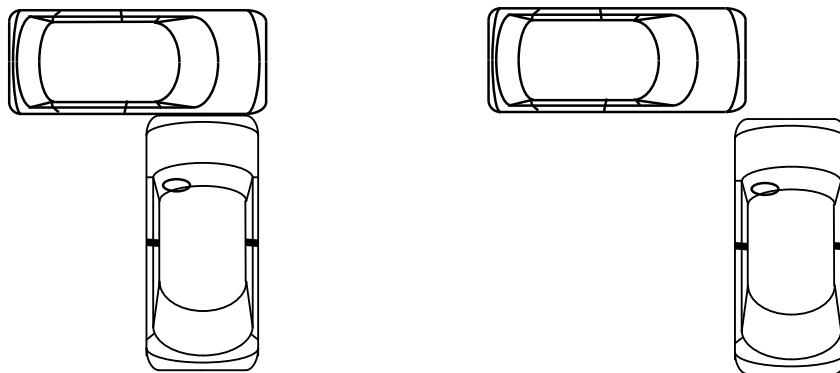


Fig III – Configuración sideswipe y corner-to-corner

En la figura de la derecha hay una doble excentricidad (configuración *corner-to-corner*). Como consecuencia de esta doble excentricidad, se producirá un giro en el colisionado tal, que el colisionante continuará penetrando (idealmente) en el área (anteriormente) ocupado por el colisionado, cuando ya no exista contacto. En este caso el coeficiente de restitución tangencial adquiere un valor negativo.

Tabla 1 - Resultados de 32 ensayos de colisión laterales [*Ishikawa 94*].

Código S indica lateralidad, las 2 o 3 cifras el ángulo en grados, Tx el número de ensayo

| Nº | Test Nº | m_1 | m_2 | v_1 | v_2 | v_m | v_{rt} | v'_m | v'_{rt} | e_n | e_t | μ | r_0 |
|----|---------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | | Kg | | m/s | | | | | | | | | |
| 1 | S75T1 | 1081 | 1041 | 14,19 | 13,83 | 13,36 | -10,61 | -0,55 | 2,30 | 0,04 | 0,22 | 0,59 | 0,522 |
| 2 | S90T1 | 1004 | 1049 | 13,64 | 7,03 | -13,6 | 7,03 | 2,31 | 0,24 | 0,17 | -0,03 | 0,49 | 0,538 |
| 3 | S90T2 | 951 | 974 | 13,75 | 0 | -13,62 | -1,91 | -1,63 | 1,00 | 0,12 | 0,52 | 0,09 | 0,165 |
| 4 | S90T3 | 991 | 1004 | 13,50 | 13,56 | -18,47 | 4,99 | 1,90 | -0,01 | 0,10 | 0,00 | 0,18 | 0,197 |
| 5 | S90T4 | 1350 | 1350 | 14,92 | 14,92 | -14,9 | -14,9 | 0,11 | 0,05 | 0,01 | 0,00 | 0,62 | 0,623 |
| 6 | S90T5 | 1271 | 1270 | 15,47 | 15,31 | -15,5 | -15,3 | 0,39 | 0,67 | 0,03 | 0,04 | 0,5 | 0,492 |
| 7 | S90T6 | 1231 | 1073 | 15,58 | 15,67 | -15,6 | -15,7 | 0,86 | 0,68 | 0,06 | 0,04 | 0,52 | 0,528 |
| 8 | S90T7 | 1073 | 1207 | 15,56 | 15,56 | -15,56 | -15,56 | 0,34 | 1,52 | 0,02 | 0,1 | 0,58 | 0,529 |
| 9 | S90T8 | 1073 | 1073 | 15,56 | 15,56 | -15,56 | -15,56 | 0,03 | 0,83 | 0,00 | 0,05 | 0,59 | 0,554 |
| 10 | S90T9 | 1796 | 1801 | 11,44 | 11,83 | -11,44 | -11,84 | 2,02 | -1,29 | 0,18 | -0,11 | 0,36 | 0,525 |
| 11 | S90T10 | 1041 | 626 | 11,11 | 11,11 | -11,1 | -11,1 | 1,86 | 1,41 | 0,17 | 0,13 | 0,9 | 0,932 |
| 12 | S90T12 | 1077 | 1116 | 5,58 | 17,36 | -5,58 | 17,36 | 1,12 | 9,77 | 0,20 | -0,56 | 0,68 | 1,968 |
| 13 | S90T12 | 1073 | 1070 | 11,31 | 11,22 | -11,3 | -11,2 | 1,35 | 1,74 | 0,12 | 0,16 | 0,63 | 0,608 |
| 14 | S90T13 | 1268 | 566 | 11,22 | 11,25 | -11,2 | -11,3 | 5,72 | -1,15 | 0,51 | -0,10 | 0,41 | 0,883 |
| 15 | S90T14 | 1058 | 1105 | 8,50 | 16,72 | -8,5 | 16,7 | 0,52 | 2,42 | 0,06 | -0,14 | 0,85 | 1,705 |
| 16 | S90T15 | 1069 | 1072 | 8,47 | 5,56 | -8,47 | -5,56 | 2,58 | -1,48 | 0,32 | -0,27 | 0,14 | 0,655 |
| 17 | S90T16 | 901 | 1108 | 16,83 | 7,75 | -16,8 | -7,75 | 3,21 | 2,09 | 0,19 | 0,27 | 0,23 | 0,211 |
| 18 | S90T17 | 1093 | 1158 | 4,94 | 14,39 | -4,94 | 14,39 | 0,14 | 0,93 | 0,03 | -0,06 | 1,07 | 1,129 |
| 19 | S90T18 | 1095 | 1086 | 5,14 | 17,00 | -5,14 | 17 | 1,02 | 13,25 | 0,20 | -0,78 | 0,33 | 4,317 |
| 20 | S90T19 | 1076 | 1068 | 5,50 | 17,17 | -5,5 | 17,17 | 0,42 | 5,61 | 0,08 | -0,33 | 1,06 | 1,543 |
| 21 | S90T20 | 1113 | 1109 | 13,81 | 4,53 | -13,81 | -4,53 | 1,83 | 0,04 | 0,13 | 0,01 | 0,10 | 0,120 |
| 22 | S120T1 | 1159 | 1158 | 31,53 | 0,00 | -27,33 | -15,78 | -3,08 | 3,33 | -0,11 | 0,21 | 0,67 | 0,465 |
| 23 | S120T2 | 952 | 975 | 11,64 | 11,39 | -9,86 | 17,08 | 0,01 | -0,27 | 0,00 | 0,02 | 1,02 | 1,004 |
| 24 | S120T3 | 1728 | 1737 | 17,17 | 11,81 | -14,87 | -20,38 | 3,08 | -0,2 | 0,21 | -0,04 | 0,84 | 0,988 |
| 25 | S135T1 | 1406 | 983 | 16,81 | 8,47 | -11,88 | -20,35 | 1,02 | 4,04 | 0,09 | 0,20 | 1,17 | 1,100 |
| 26 | S135T2 | 1102 | 1075 | 11,61 | 11,61 | -8,21 | -19,82 | 0,27 | -4,63 | 0,03 | -0,23 | 1,40 | 1,721 |
| 27 | S135T3 | 1075 | 1055 | 11,44 | 11,11 | -8,09 | 19,49 | -2,60 | 16,42 | -0,32 | -0,84 | 0,84 | 3,861 |
| 28 | S135T4 | 1054 | 1076 | 8,44 | 8,44 | -5,97 | 14,41 | 2,31 | 3,43 | 0,39 | -0,24 | 1,08 | 1,646 |
| 29 | S135T5 | 1044 | 1049 | 8,64 | 17,31 | -6,11 | 23,41 | -0,06 | 18,36 | -0,01 | -0,78 | 0,85 | 2,474 |
| 30 | S150T1 | 1057 | 1031 | 11,92 | 11,94 | -5,96 | 22,2 | 1,92 | 12,04 | 0,32 | -0,54 | 1,35 | 2,509 |
| 31 | S150T2 | 1053 | 1077 | 11,97 | 5,33 | -5,99 | 15,73 | 2,00 | 7,07 | 0,33 | -0,45 | 1,01 | 1,763 |
| 32 | S150T3 | 965 | 1052 | 11,89 | 23,75 | -5,94 | 34,1 | -1,05 | 29,16 | -0,18 | -0,86 | 1,13 | 3,092 |

Tabla 2 - Resultados de 13 ensayos de colisión frontales [*Ishikawa 94*].

Código F indica FRONTAL, las 2 o 3 cifras el ángulo en grados, Tx el número de ensayo

| Nº | Test Nº | m_1 | m_2 | v_1 | v_2 | v_{rn} | v_{rt} | v'_{rn} | v'_{rt} | e_n | e_t | μ | r_0 |
|----|------------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | | Kg | | m/s | | | | | | | | | |
| 33 | F120T1 | 954 | 940 | 13,69 | 0,00 | -13,6 | -1,7 | 0,36 | 1,64 | 0,03 | 0,97 | 0,05 | 0,111 |
| 34 | F120T2 | 1024 | 936 | 13,75 | 13,69 | -23,17 | 5,32 | 2,15 | -0,61 | 0,09 | 0,11 | 0,18 | 0,175 |
| 35 | F120T3 | 956 | 986 | 6,64 | 13,58 | -13,43 | 11,76 | 1,58 | 2,44 | 0,12 | -0,21 | 0,48 | 0,594 |
| 36 | F120T4 | 964 | 980 | 6,72 | 13,72 | -18 | -1,2 | 1,84 | -0,84 | 0,10 | -0,70 | 0,07 | 0,096 |
| 37 | F135T1 | 974 | 981 | 13,86 | 13,78 | -23,35 | 3,31 | 2,22 | 1,45 | 0,09 | -0,44 | 0,04 | 0,074 |
| 38 | F150T1 | 950 | 988 | 13,58 | 0,00 | -11,76 | -6,79 | 0,49 | 1,13 | 0,04 | 0,17 | 0,52 | 0,496 |
| 39 | F150T2 | 956 | 998 | 13,53 | 0,00 | -13,07 | 3,5 | 1,35 | -1,66 | 0,10 | 0,48 | 0,01 | 0,030 |
| 40 | F150T3 | 1045 | 1031 | 13,89 | 13,89 | -25 | -9,4 | 3,83 | 1,06 | 0,15 | 0,11 | 0,21 | 0,213 |
| 41 | F150T4 | 936 | 1018 | 13,97 | 13,83 | -25,95 | 6,92 | 0,80 | 3,10 | 0,03 | -0,45 | 0,16 | 0,223 |
| 42 | F150T5 | 1010 | 958 | 13,56 | 6,92 | 19,34 | 3,34 | -0,05 | 1,23 | 0,00 | -0,37 | 0,15 | 0,180 |
| 43 | F150T6 | 983 | 980 | 6,83 | 13,58 | -16,20 | 11,37 | 0,26 | 1,61 | 0,02 | -0,14 | 0,42 | 0,464 |
| 44 | F165T1 | 985 | 1008 | 13,83 | 13,69 | -27,00 | 3,60 | 1,81 | 2,99 | 0,07 | -0,83 | 0,03 | 0,080 |
| 45 | F180T1 | 1040 | 1035 | 15,56 | 15,56 | -28,42 | 12,66 | 0,37 | -4,07 | 0,01 | 0,32 | 0,38 | 0,332 |