

Estimación de la velocidad de impacto en motocicletas a partir de la deformación permanente

Modelo de Wood ⁽¹⁾

Ingeniero Daniel François
Perito de la Suprema Corte de Justicia
de la Republica Oriental del Uruguay

ingdf@adinet.com.uy

El parque de motocicletas en Uruguay constituye un 52% del total de vehículos censado, la cantidad de motocicletas que circulan por las calles crece año a año; así como los siniestros en los cuales participan motociclistas, los que constituyen una gran mayoría de los casos que debe resolver un Perito Judicial.

Esta situación hace que en la reconstrucción de siniestros viales en los cuales intervienen motocicletas sea de especial importancia la determinación de sus velocidades.

Si bien existe un extenso trabajo realizado desde los primeros estudios de Campbell para el cálculo de la energía disipada en choques frontales de automóviles a partir de la deformación permanente se observa que no existe un trabajo sistemático de interpretación similar para el caso de impactos frontales de motocicletas.

Los primeros trabajos de Severy indicaron que las velocidades en choques frontales de motocicletas eran proporcionales al acortamiento de la distancia entre ejes. Estos primeros ensayos constituyeron la base para que otros investigadores confirmaran esta postulación.

Wood examina este tipo de colisiones y expone una técnica de cálculo de la energía específica y de la velocidad de colisión.

El presente trabajo brinda una reseña de las investigaciones realizadas desde los primeros trabajos de Severy sobre el tema y expone un método de cálculo de la determinación de la velocidad de impacto, basado en el trabajo realizado por Wood y asociados, para su uso en la reconstrucción de siniestros de motocicletas/scooters con autos, especificando sus límites de aplicación.

Antecedentes

Los primeros ensayos de choque frontales contra barrera y automóviles con motocicletas fueron realizados por Severy en los años 1970.

Se usaron Hondas CL 90, CB 350 y CB 750, el resultado hallado fue: *“que el acortamiento permanente de la distancia entre ejes de la motocicleta en la colisión varió linealmente con la velocidad y no parece estar afectado significativamente por las variaciones de tamaño de la motocicleta ni por la*

localización del impacto (en el automóvil)”

Esta fue la conclusión inicial que ha guiado desde esas fechas al resto de los investigadores en todos los estudios que se realizaron posteriormente.

En estudios mas recientes en el año 2002, Adamson y otros, ensayaron 17 motocicletas del modelo Kawasaki 1000 contra barrera y automóviles estacionados¹. Nuevamente se encontró una relación lineal entre el acortamiento de la distancia entre ejes y la velocidad.

⁽¹⁾ Versión revisada de la Ponencia presentada en el Congreso Argentino de Ingeniería Forense, Buenos Aires, 4 al 6 de Junio de 2014. Reproducido con autorización del autor

¹ SAE Paper 2002-01-055

Otros investigadores han expuestos sus resultados con ensayos mas recientes: Priester y Weyde², Kasanicky³ realizados entre el 2000 y 2005. Confirmando la premisa de Severy.

En 2009 Wood⁴ realizó un trabajo exhaustivo en base al análisis de ensayos publicados por otros autores; examinó el comportamiento del choque frontal de motocicletas y scooters y las causas fundamentales por las cuales la población de estos vehículos puede estudiarse a partir de una energía específica común a todos.

En base a los resultados expuestos por Wood y realizando ciertas simplificaciones se ha desarrollado el presente trabajo con el objetivo de estimar la velocidad de impacto de una motocicleta en un choque frontal contra un automóvil.

Los primeros ensayos se realizaron con motocicletas dotadas de ruedas de rayos, las motocicletas de hoy en día están dotadas en su mayoría de ruedas de radios, las cuales son más rígidas.

La rigidez del conjunto delantero y el chasis eran diferentes también, la configuración actual es más resistente.

A pesar de las diferencias la forma en que colapsa el conjunto delantero en el choque frontal es común a todas las motocicletas.

Severy describía este proceso de colapso de la siguiente forma:

“Cuando la rueda delantera contacta contra la parte opuesta metálica del automóvil se produce un aplastamiento inicial del neumático, acompañado de una deformación en la chapa del auto y de la horquilla de la motocicleta.

Esto se acompaña con la desaceleración completa del conjunto de la rueda delantera, generalmente sin una distorsión significativa de la rueda.

A continuación aumenta la deformación

en la chapa del automóvil y se deforma hacia atrás la horquilla y el conjunto de la suspensión delantera de la motocicleta. Simultáneamente la masa principal de la motocicleta (todas las partes que quedan por detrás de la rueda delantera y la suspensión) continúa hacia adelante con una moderada desaceleración, hasta que se produce el contacto de la parte delantera del motor con la parte posterior de la rueda delantera.

Para bajas velocidades de impacto esto constituye la fase final del colapso.

Para velocidades de impacto de 30 m.p.h. (48 km/h) y mayores con el lateral del automóvil la rueda delantera de la moto se deforma en forma permanente e incluso colapsa por completo en ciertos casos”.

Hay que observar que cuando los vehículos (automóviles) contra los cuales impacta la motocicleta se encuentran en movimiento, el conjunto delantero no se deforma de la misma manera que en los casos estáticos.

En estos casos de impacto contra vehículos en movimiento la parte posterior de la rueda delantera puede llegar a no contactar con el bloque del motor.

En este trabajo se asume que el conjunto delantero de la motocicleta se deforma en el choque pero no se rompe, esto significa que la rueda sea de rayos o de radios no se quiebra, así como la horquilla que la sujeta se deforma plásticamente hacia atrás sin romperse.

Esta deformación plástica de la horquilla puede ser asimétrica, los brazos de ésta pueden deformarse mas hacia atrás de un lado que del otro, esto se debe al contacto de la rueda con la carrocería del automóvil en movimiento.

² Berlín – Alemania desde el 2000 al 2005

³ Universidad de Zilina - Eslovaquia en 2003

⁴ Speed estimation from permanent deformation, Wood, Glynn y Walsh 2009

Motocicletas y scooters

Configuración del conjunto delantero

El chasis de la motocicleta es su cuerpo principal y donde se ubicará el motor y el conductor.

Esta compuesto por tubos o vigas y en su estructura general se distingue una zona de anclaje de la suspensión delantera denominada "pipa" de dirección y otro punto de anclaje de la suspensión trasera que se denomina el eje del basculante el cual se combina con un soporte del amortiguador trasero.

Existen varios tipos de chasis de motocicletas, los formados por tubos de sección circular y los que usan vigas de sección ancha.

Dentro de los tubulares se distinguen los de simple cuna con un solo tubo desde la pipa de dirección donde se fija el motor, y los de doble cuna en los cuales parten dos tubos desde la pipa.



Figura No. 2

En la figura No.2 se observa una motocicleta con un chasis tubular de acero de simple cuna.

El conjunto delantero está conformado por una pieza tubular denominada "pipa" que se fija al chasis.

Es en esta pieza donde se monta la columna de dirección del conjunto delantero.

La horquilla telescópica en sí comprende la rueda delantera con su eje

y dos botellas telescópicas a los lados en las que se ajustan un par de barras de acero cromado, estas se anclan a las "tijas" que se sitúan en la parte superior e inferior de la columna de dirección.

En el interior de las botellas telescópicas se montan resortes de un diámetro menor y un sistema de suspensión hidráulica mediante aceite. Este aceite sirve para la absorción de impactos verticales y como lubricante del conjunto.

El uso de la horquilla telescópica montada sobre una pipa de dirección es prácticamente universal en todas las motocicletas exceptuando ciertos scooters y pequeñas motos de tipo utilitario.

La horquilla en sí comprende la rueda delantera con su eje y dos botellas telescópicas en las que se ajustan un par de barras de acero cromado, estas se anclan a las "tijas" que se sitúan en la parte superior e inferior de la columna de dirección.

Este sistema de suspensión delantera es el más empleado en la manufactura de motocicletas y scooters y en términos de producción domina el mercado desde que se estableció en la década de 1950.

Esta es la configuración común de las motocicletas que encontramos en circulación actualmente.

Muchos de los modelos de motocicletas comercializadas hoy en día son de origen chino, con un chasis de tipo simple tubular de acero y un montaje en su conjunto delantero de horquilla con amortiguadores telescópicos.

Energía absorbida por la motocicleta en el impacto

Modelo de Wood

Wood establece que el conjunto delantero de una motocicleta se puede considerar como una viga en voladizo de sección circular empotrada en un extremo la cual se haya sometida a una fuerza de deformación en su otro extremo.

La viga está sometida a una deformación plástica permanente por la acción de esta fuerza.

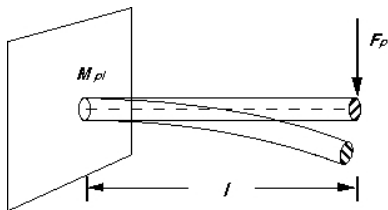


Figura 3

El momento en el empotramiento es:

$$M_{pl} = F_p \cdot l$$

Donde:

M_{pl} es el momento plástico en el empotramiento

l es la longitud de la viga

La tensión plástica es:

$$\sigma_{pl} = \frac{M_{pl}}{W_{pl}}$$

Donde:

M_{pl} es el momento plástico en el empotramiento

W_{pl} es el módulo plástico de la sección

Sustituyendo:

$$F_p = \frac{\sigma_{pl} \cdot W_{pl}}{l}$$

El módulo plástico para una sección circular está dado por la expresión¹:

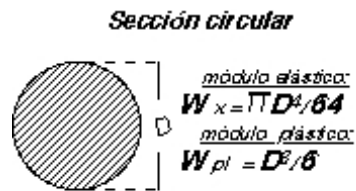


Figura 4

$$W_{pl} = \frac{D^3}{6}$$

Donde: W_{pl} es el módulo, plástico

D es el diámetro de la sección circular

Sustituyendo:

$$F_p = \frac{\sigma_{pl} \cdot D^3}{6 \cdot l}$$

La fuerza F_p que provoca una deformación plástica permanente es proporcional a la tensión plástica σ_{pl} y al diámetro de la barra al cubo D^3 .

Podemos considerar a $6l$ como una constante por lo tanto:

$$F_p \propto \sigma_{pl} \cdot D^3 \quad (1)$$

La fuerza es proporcional a la tensión plástica y al cubo del diámetro de la sección de la viga circular.

Por otro lado el modelo estudia la energía específica a la masa cuando consideramos un impacto plástico de una motocicleta contra una barrera infinitamente rígida.

$$\frac{1}{2} \cdot M_{mc} \cdot V_{ccs}^2 = F_p \cdot d_{wb}$$

Le energía cinética se transforma en trabajo de deformación

Donde:

M_{mc} masa de la motocicleta

V_{ccs} velocidad de colisión

F_p fuerza de impacto
 d_{wb} acortamiento de la distancia entre ejes de la motocicleta.

La energía específica absorbida en el impacto es la energía absorbida por unidad de masa, E_{ca}/M_{mc}

E_{ca} se define como la energía específica de la colisión.

$$E_{ca} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_{css}^2 \quad (2)$$

$$\frac{E}{M} = \frac{1}{2} \cdot V_{css}^2 = \frac{F_p}{M_{mc}} \cdot d_{wb}$$

Sustituyendo la relación (1) en (2)

$$\frac{E}{M} = \frac{1}{2} \cdot V_{css}^2 \propto \frac{\sigma_p \cdot D^3}{M_{mc}} \cdot d_{wb} \quad (3)$$

Las solicitaciones ocasionadas por las aceleraciones, frenadas, movimientos laterales, etc. a las cuales se ve sometido el conjunto delantero de la horquilla y rueda en las motocicletas y scooters, pueden ser consideradas como en general del mismo orden (a pesar de existir diferencias entre las diferentes categorías de vehículos).

Esto implica que la rigidez es similar, variando el momento de inercia del área del montaje de la horquilla.

Es decir que si una motocicleta es más grande, de mayor masa, tiene una rigidez de su conjunto delantero similar a la de una más pequeña de menor masa. Esto se logra aumentando el módulo resistente de la sección que compone la horquilla delantera.

$$M_{mc} \propto M_x \propto \pi \cdot D^4 / 64$$

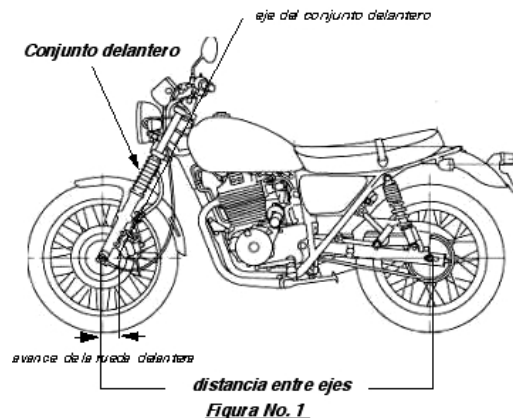
Se considera que la masa de la motocicleta es proporcional al módulo elástico M_x de la sección circular, obteniéndose entonces que *la masa es proporcional al diámetro a la cuarta para la sección circular.*

Si sustituimos en la expresión (3) obtenemos:

$$\frac{E}{M} = \frac{1}{2} \cdot V_{css}^2 \propto \frac{\sigma_p}{D} \cdot d_{wb}$$

Esto indica que en el modelo planteado la energía específica de colisión por unidad de masa E/M de la población general de scooters y motocicletas es función del material, de la configuración estructural de los vehículos y del acortamiento de la distancia entre ejes y puede considerarse en lo sustancial como independiente de la masa y el tamaño del vehículo.

Relaciones de tipo similar a la desarrollada pueden establecerse para tubos con secciones huecas donde la relación entre el espesor de la pared y el radio del tubo es baja.



En los ensayos de choque considerados se determinó la energía específica de cada vehículo en función del acortamiento de la distancia entre ejes.

- 1.-Manual de resistencia de materiales
 Pisarenko y otros
 Editorial Mir 1979
 Cálculo de estructuras por los estados límite
Módulo resistente plástico para sección circular

Análisis de los ensayos de choque contra barrera

Fórmula para estimar la velocidad

Varios autores publicaron desde los años 70 los resultados de los ensayos de choque frontal de motocicletas y scooters contra barrera:

Severy - 1970,
Adamson y otros – 2002,
Kasaniky y otros – 2003,
Priester y otros - 2003.

Del conjunto de estos ensayos se seleccionó solo los tests donde el conjunto delantero del vehículo se deformó en el choque, es decir que la rueda delantera y la horquilla no se rompieron.

Estos ensayos formaron un conjunto de 43 choques contra barrera donde 18 motocicletas y 25 scooters fueron testeados, el conjunto tenía 18 modelos diferentes de vehículos manufacturados al menos entre los años 1980 a 2003: Kawasaki 1000, Honda CB 400, Yamaha XS 400, Suzuki GSX 250, Piaggio NRG y Zip, Kymco DJ50, Peugeot Buxy, etc.

Los ensayos cubrieron un rango de velocidades desde los 16 km/h a los 71 km/h.

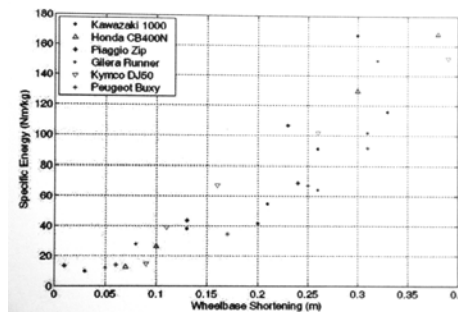
Para el desarrollo del modelo se seleccionó un conjunto de estos ensayos que incluía 2 modelos de motocicletas y 4 modelos de scooters, los cuales fueron ensayados entre 4 a 7 veces en el rango de velocidades indicado.

Los modelos elegidos fueron:

- 1.- Kawasaki 1000 (motocicleta)
- 2.- Honda CB 400N (motocicleta)
- 3.- Piaggio Zip (Scooter)
- 4.- Gilera Runner (Scooter)
- 5.- Kymco DJ 50 (Scooter)
- 6.- Peugeot Buxy (Scooter)

(Ver Anexo I)

Se representaron los resultados de todos estos ensayos en una gráfica de la energía específica como función del acortamiento de la distancia entre ejes, como se muestra en la siguiente:



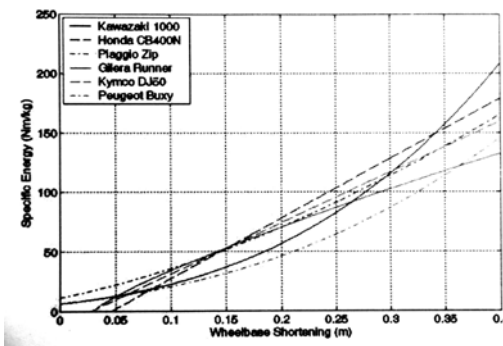
Hay que resaltar que los puntos de los ensayos de los dos modelos de motocicletas se encuentran contenidos entre los puntos de los ensayos de los scooters lo que indica la similitud entre las dos poblaciones consideradas.

Con los datos de estos ensayos se procedió a obtener la ecuación de la energía específica E_{mc}/M_{mc} en función del acortamiento de la distancia entre ejes d_{wb} para cada uno de los modelos. (Ver Anexo I)

Cada una de estas ecuaciones se sometió a un análisis estadístico para obtener la regresión correspondiente para cada uno de los modelos.

Las regresiones obtenidas tienen un alto coeficiente de determinación r^2 , lo que indica un muy buen ajuste con los ensayos.

Grafica de las regresiones para los 6 modelos considerados



Considerando solo las motocicletas se determinó la siguiente regresión:

$$E_{mc}/M_{mc} = 733.2 (d_{wb} + 0.1)^{1.98}$$

Y considerando solo los scooters se determinó:

$$E_{mc}/M_{mc} = 569.6 (d_{wb} + 0.1)^{1.81}$$

Se determinó también una regresión común para ambos tipos de vehículos:

$$E_{mc}/M_{mc} = 641.7 (d_{wb} + 0.1)^{1.89}$$

Estadísticamente se determinó que los valores dados por esta aproximación se ajustan bien a los valores obtenidos en los ensayos.

A partir de lo referido anteriormente elaboramos la siguiente gráfica obtenida para la energía específica E_{esp} en función del acortamiento de la distancia entre ejes d_{wb} de la motocicleta según la fórmula (a)

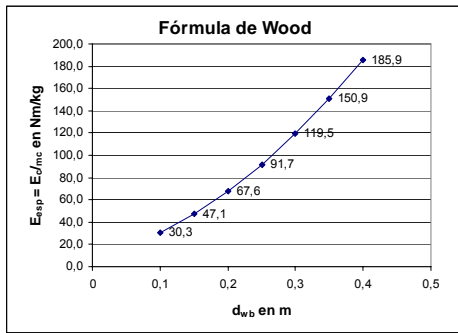


Gráfico No.1: Energía específica vs deformación

La energía específica está dada en N.m/kg y la deformación en m.

Para obtener la recta que vincula la deformación con la velocidad establecemos:

Energía específica:

$$E_{esp} = E_c / M_c$$

$$E_c = E_{esp} \cdot M_c$$

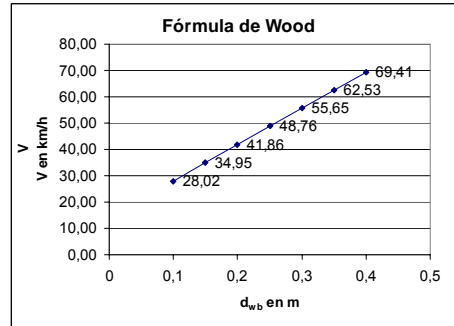
Energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2} M_c V^2$$

Igualando: $E_{esp} \cdot M_c = \frac{1}{2} M_c V^2$

$$V = (2 \cdot E_{esp})^{1/2}$$

A partir de los valores de la anterior gráfica construimos una nueva gráfica de la velocidad V en función de la deformación.



Gráfica No.2: velocidad de impacto vs deformación

Esta es la recta de ecuación:

$$V = 137.97 \cdot d_{wb} + 14.22 \quad (1)$$

Donde: V m/s
 d_{wb} m

Entre los valores calculados por la recta y los resultados obtenidos por la ecuación hay una diferencia máxima de un 5%, como puede observarse en la siguiente tabla:

Dwb	E/m	V en m/s	V en km/h	V recta	diferencia
0,1	30,3	7,8	28,02	28,02	0,00
0,15	47,1	9,7	34,95	34,92	0,03
0,2	67,6	11,6	41,86	41,81	0,04
0,25	91,7	13,5	48,76	48,71	0,05
0,3	119,5	15,5	55,65	55,61	0,04
0,35	150,9	17,4	62,53	62,51	0,02
0,4	185,9	19,3	69,41	69,41	0,00

Tabla No.2: comparación de la fórmula de Wood y la recta (1)

Por este método podemos evaluar a partir de la estimación de la deformación permanente del conjunto delantero de la motocicleta la velocidad de impacto.

Observaciones:

1.- El conjunto delantero de la motocicleta no debe haberse roto en el impacto debe haber sufrido una deformación plástica.

Observando el parque de motocicletas vemos que en su mayoría la deformación máxima posible del conjunto delantero está acotado en deformaciones menores a los 0.4 m, luego de estas distancias la rueda se apoya contra el bloque del motor.

2.- Con deformaciones de hasta 0.4 m las velocidades máximas son de unos 70 km/h.

Por nuestra experiencia con las motocicletas que circulan en nuestro país es posible que a esas velocidades el conjunto delantero ya se haya quebrado en el impacto, lo cual invalidaría el uso de este método.

3.- El cálculo debería incluir la energía absorbida por el automóvil en el choque, en el estudio de Wood se indica una fórmula derivada de los ensayos para valores mayores a los 6 cm. Para poder usarla deberíamos tener la medida de las deformaciones en el automóvil.

4.- Nuestra experiencia nos muestra que en los informes de siniestros realizados por la Policía Técnica difícilmente se miden las deformaciones en los vehículos, la mayoría de las veces accedemos a un conjunto de fotografías, las cuales nos permiten solo estimar aproximadamente las deformaciones, en especial la de la motocicleta.

5.- Es por esta razón que consideramos a éste un método aproximado que nos permite realizar una estimación de la velocidad de impacto de la motocicleta.

El método que planteamos en este trabajo es una herramienta más y esperamos que sea de ayuda al Ingeniero o Perito en la reconstrucción de siniestros de tránsito donde intervienen motocicletas.

Ingeniero Daniel François
Montevideo, 18 de abril de 2015

Anexo I
Modelos ensayados
Regresiones

1.- Kawasaki 1000 (7 ensayos)



Regresiones

$$\frac{E_{mc}}{m} = 1063.8 \cdot (d_{wb} + 0.21)^{3.3}$$

$$r^2 = 0.94$$

2.-Honda CB400N (4 ensayos)



$$\frac{E_{mc}}{m} = (506.5 \cdot d_{wb} - 23.54)$$

$$r^2 = 1.0$$

3.- Piaggio Zip (4 ensayos)



$$\frac{E_{mc}}{m} = 530.4 \cdot (d_{wb} + 0.1)^{1.68}$$

$$r^2 = 0.95$$

4.- Gilera Runner (5 ensayos)



$$\frac{E_{mc}}{m} = 299.2 \cdot (d_{wb} + 0.03)^{0.82}$$

$$r^2 = 0.95$$

5.- Kymco DJ 50 (5 ensayos)



$$\frac{E_{mc}}{m} = (429.3 \cdot d_{wb} - 12.0)$$

$$r^2 = 0.98$$

6.- Peugeot Buxy (4 ensayos)



$$\frac{E_{mc}}{m} = 614 \cdot (d_{wb} + 0.21)^{2.91}$$

$$r^2 = 0.992$$

Para el conjunto de las Motocicletas
(18 ensayos)

se determinó:

$$\frac{E_{mc}}{m} = 733.2 \cdot (d_{wb} + 0.1)^{1.98}$$

$$r^2=0.84$$

Para el conjunto de los scooters:
(25 ensayos)

se determinó:

$$\frac{E_{mc}}{m} = 569.6 \cdot (d_{wb} + 0.1)^{1.81}$$

$$r^2=0.84$$

Bibliografía

Motorcycle to car and scooter to car collisions. Speed estimation from permanent deformation.
Wood, Glynn and Walsh
Proceedings ImechE Vo.223, Part D, J.
Automotive Engineering 2009

Traffic Crash Reconstruction
Lynn B. Fricke
Northwestern University 2010