

ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ABSORBIDA EN LA DEFORMACIÓN

Ing Aníbal O. García

agarcia@perarg.com.ar - www.perarg.com.ar

DEFORMACIÓN RESIDUAL Y ENERGÍA ABSORBIDA

Desde hace más de treinta años se utiliza en la investigación y reconstrucción de colisiones entre vehículos automotores, modelos matemáticos normalizados, que permiten estimar la fracción de energía cinética transformada en **trabajo mecánico de deformación** durante el impacto. Estos modelos procesan la deformación residual –medida en forma normalizada–, y coeficientes de rigidez característicos de los vehículos afectados, obtenidos experimentalmente y consistidos estadísticamente.

El modelo más empleado es el **CRASH3**[®] debido a la investigación y desarrollo de **Bryan McHenry**⁽¹⁾. Este modelo se utiliza en forma normalizada desde 1981, para reportar a la Administración Nacional de Seguridad de las Autopistas de los Estados Unidos (**NHTSA**) como indicadores de la severidad de impacto en los choques investigados.

Diversos análisis críticos realizados al programa **CRASH3**[®], amparados en las inconsistencias propias del sistema de medición de los coeficientes en los años '80, han derivado en modelos alternativos, entre los que merece destacarse el modelo desarrollado por el ingeniero rumano **Aloke Prasad**⁽²⁾ en el año 1993.

Ambos modelos toman como base la teoría desarrollada por **Kenneth Campbell**⁽³⁾ en 1974, en los que la base experimental la proporcionan ensayos de impacto contra una barrera de masa y rigidez infinitas (barrera rígida o simplemente **barrera**). La tesis central de Campbell propone que la energía absorbida es proporcional a la magnitud y forma del daño producido (la **deformación permanente o residual**) y las características de la relación fuerza-deformación del cuerpo ensayado o **rigidez de la estructura** del vehículo en la zona sometida a las fuerzas de impacto.

La hipótesis funcional de Campbell es la existencia de una relación lineal de la fuerza por unidad de ancho de la deformación, asumiendo que la fuerza actúa en forma perpendicular a la superficie deformada, lo que equivale asumir una rigidez uniforme en todo el ancho del vehículo. El límite de validez de esta hipótesis, son choques que involucran por lo menos un cuarto del ancho de la estructura. La fuerza por unidad de ancho estará definida por

$$f(D) = m/w_0 (b_0 b_1 + b_1^2 D)$$

donde:

$f(D)$ es fuerza por unidad de ancho de deformación

m la masa del vehículo

w_0 el ancho total del vehículo

b_0, b_1 coeficientes de rigidez, determinados experimentalmente.

Con este esquema de interpretación de los ensayos de impacto contra barrera, la energía cinética absorbida por deformación -para deformaciones irregulares-, se escriben forma de ecuación diferencial (que iguala esa energía con el trabajo realizado por la fuerza unitaria en un ancho infinitesimal dw en una penetración dD). Resulta:

$$dE_a = f(D) dw dD$$

La primera integración de esta ecuación diferencial, para una deformación D uniforme en cada ancho del vehículo resulta

$$dE_a = (m/w_0) [b_0 b_1 D + \frac{1}{2} b_1^2 D^2] dw + E_0$$

donde el último término E_0 es la constante de integración, que Campbell propone hacer equivalente a

$$E_0 = \frac{1}{2} m b_0^2$$

La segunda integración de la ecuación diferencial para el ancho total del vehículo w_0 define la *velocidad equivalente de barrera (EBS)*, velocidad a la cual la energía cinética del vehículo iguala a la energía absorbida en la deformación en el ancho parcial dw y profundidad D . Resulta:

$$(EBS)^2 = (1/w_0) \int [2 b_0 b_1 D + \frac{1}{2} b_1^2 D^2] dw + b_0^2$$

La teoría tiene aplicación restringida para valores de EBS superiores a 25 km/h, y deformaciones residuales mayores de 8 cm

EL MODELO CRASH3® (MCHENRY)

Al decir de su autor, CRASH es un programa cuyo ámbito de certidumbre es del orden de más o menos 12 %, basado en las postulaciones de Campbell, cuya utilidad es estimar la energía absorbida como trabajo de deformación permanente en un choque. La ecuación diferencial en un ancho dw , cuya penetración residual (o deformación permanente) es C_i la energía cinética de impacto es

$$dE_i = (A_i C_i + \frac{1}{2} B_i C_i^2 + G_i) dw$$

donde A_i , B_i y G_i son coeficientes empíricos obtenidos en los ensayos de impacto contra barrera. Comparando las ecuaciones de Campbell y de McHenry, se pueden establecer las relaciones

$$A_i = (m/w_0) b_0 b_1$$

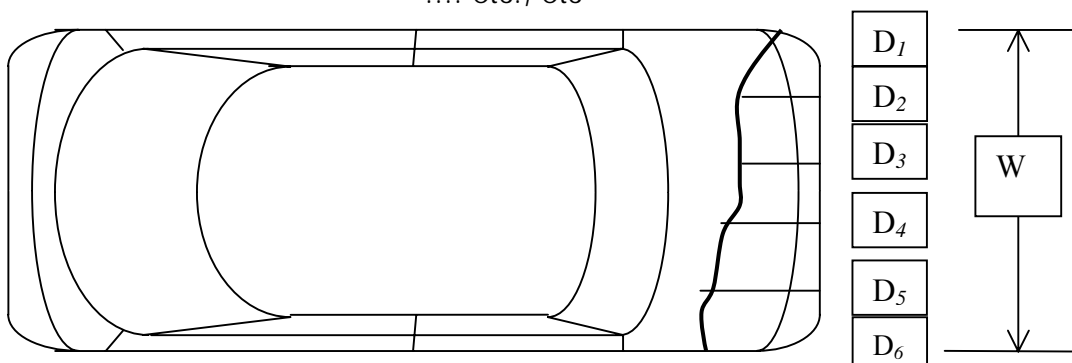
$$B_i = (m/w_0) b_1^2$$

La integración de la ecuación de energía se realiza en forma gráfica, dividiendo el ancho de la zona deformada en cinco zonas de igual ancho w_0 . La deformación media de cada zona será el promedio de la deformación en los extremos de la zona considerada. De tal manera que

$$C_1 = \frac{1}{2} (D_1 + D_2)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} (D_2 + D_3)$$

.... etc., etc



Procesando la integral en la forma discontinua propuesta, se llega a determinar un valor de deformación media C expresado por

$$C_i = 1/2 [D_1 + 2 (D_2 + \dots + D_5) + D_6]$$

De la que se deriva la expresión desarrollada de la energía cinética absorbida en el impacto en forma de trabajo de deformación como

$$E_a = (w_0) \{ [A/10] [D_1 + 2 (D_2 + \dots + D_5) + D_6] + \\ + [B/30] [D_1^2 + 2(D_2^2 + \dots + D_5^2) + D_6^2 + \\ + D_1 D_2 + \dots + D_5 D_6] + A^2/2B \}$$

Los parámetros A y B se obtiene como se ha dicho de ensayos de choque contra barrera, con la estructura trasera y delantera. En la bibliografía se encontrarán valores de los coeficientes para choque lateral. Sin embargo no hay ensayos confiables que permitan registrar confiablemente esos valores, los resultan estimados, y en palabras del propio McHenry, son meras *aproximaciones groseras*. De allí que la mejor recomendación sea prescindir del modelo para estimar energía de impacto a partir de la deformación lateral de un vehículo.

El valor de energía absorbida estimada de esta manera, supone un embestimiento frontal o trasero puramente colineal. Para choques oblicuos, McHenry propone un coeficiente de corrección representando por la expresión $(1 + \text{tg}^2 \alpha)$, en la que α representa el ángulo de impacto. Esta corrección ha sido muy discutida, dado que lo que está representando este coeficiente, es la fricción entre las superficies en contacto durante la colisión. Por razones tecnológicas, la fricción entre metales no debería superar el valor de 0,3, por lo que el ángulo α no debería superar los 29°. Se ha aceptado este valor como límite de aplicación del modelo, referido a la desviación respecto del eje principal, de la posición relativa de los vehículos

EL MODELO DE PRASAD

Basándose en distintas observaciones y críticas al modelo *CRASH3*®; principalmente la corrección propuesta por *Strother* en 1986 y un criterio de variabilidad de la función fuerza-deformación enunciados por *Navin*, en 1991 **Aloke K. PRASAD** reformuló el modelo de planteando un nuevo algoritmo de resolución de la ecuación de *CRASH3*®.

En el modelo de PRASAD, para una deformación del ancho parcial L [m], cuya profundidad medida en metros en n puntos equidistantes en el ancho $[D_1 \dots D_n]$, la energía cinética convertida en trabajo mecánico de deformación E_a en Joules [J], se determina con la siguiente expresión:

$$E_a = 1/2 [d_0^2 + d_0 d_1 k_1 + d_1^2 k_2] L$$

donde d_0 y d_1 son constantes del modelo, y k_1 y k_2 se calculan como:

$$k_1 = [1 / (n-1)] [D_1 + 2 (D_2 + \dots + D_{(n-1)}) + D_n]$$

$$k_2 = \{1 / [3 (n-1)]\} [D_1^2 + 2(D_2^2 + \dots + D_{(n-1)}^2) + D_n^2 + D_1 D_2 + \dots + D_{(n-1)} D_n]$$

Por lo demás, y en palabras del autor "el nuevo algoritmo usa un modelo lineal para $[2 E_a / w_0]^{0.5}$, lo cual es esencialmente el mismo modelo de Campbell usado en *CRASH3*". Y la relación entre los coeficientes de los modelos de McHenry y de Prasad es la siguiente

$$d_0 = A/B^{0.5} \qquad d_1 = B^{0.5}$$

EL VALOR DE LOS COEFICIENTES DE RIGIDEZ

En 1996 *Donald E. SIDDALL* y *Terry D. DAY* ⁽⁴⁾ publicaron un análisis de sistematización de los parámetros de rigidez para más de 2.000 ensayos acumulados en alrededor de 15 años, tipificando cinco categorías de automóviles de turismo, dos categorías de camionetas y dos categorías de utilitarios (Vans, furgones, etc). Una de las conclusiones que surge de la tipificación de estos autores, es que la rigidez tiende estadísticamente a uniformarse como una función de la masa y de las dimensiones de los vehículos.

Esto que en principio pareciera ser casual, obedece a que en el alto grado de competencia que se experimenta en la industria automotriz, los vehículos tienden a uniformarse en muchos aspectos, entre ellos el de la capacidad de absorber energía con deformación aparentemente plástica.

Debido a esta propiedad, es posible encuadrar a los vehículos por sus características geométricas con un cierto grado de precisión. De allí que se pueda procesar a cualquier vehículo como perteneciente a una banda indeterminada entre dos categorías continuas. En base a este principio opera la planilla de cálculo *TMDef04*.

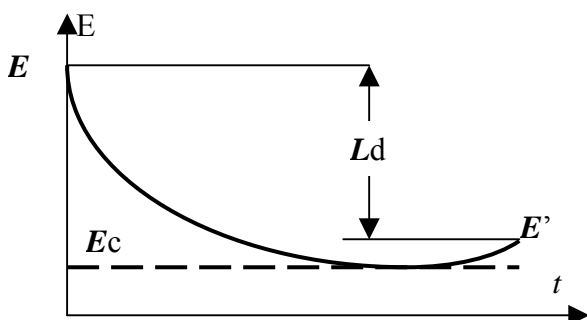
TMDef04 es una herramienta desarrollada por *GIP - baires* para la estimación de la energía cinética absorbida en un vehículo por deformación durante un choque, por aplicación simultánea de los modelos estáticos de *McHenry* y *Prasad*, empleando los coeficientes de rigidez estadísticos actualizados por *Siddall et al*. Pensada como herramienta auxiliar del investigador de siniestros viales, la única función de *TMDef04* es agilizar la ubicación del vehículo en estudio dentro de dos categorías de rigidez y calcular la energía atribuible a la deformación de los vehículos, con las restricciones indicadas en este artículo.

Ud Puede disponer gratuitamente de la planilla *TMDef04* y de un tutorial de guía escribiendo a:

agarcia@perarg.com.ar

ALGUNAS CONSIDERACIONES ACERCA DE LOS RESULTADOS

La aplicación de los modelos de deformación (*CRASH3* y *PRASAD*,) se inscriben dentro del proceso más amplio que es la colisión. Los resultados obtenidos con la aplicación de estos modelos no resuelven de por sí la cinemática de una choque, sino solo una parte del mismo: La energía cinética absorbida (o disipada del sistema) como trabajo mecánico de deformación. ampliaremos brevemente este concepto.



Antes de la colisión **el sistema** conformado por los dos vehículos en movimiento (al menos uno de ellos) posee una energía cinética total **E**. Finalizada la misma, esa energía ha disminuido a un valor menor **E'**, en general mayor que cero y siempre mayor o igual a la energía del *centro de masa* del sistema **Ec**. La diferencia entre **E** y **E'** es el trabajo mecánico de deformación realizado por las fuerzas puestas en juego durante la colisión **Ld**. La variación de la energía a lo largo del tiempo, durante la colisión se grafica a la izquierda.

Es decir que puede plantearse la siguiente relación aritmética

$$E - E' = Ld$$

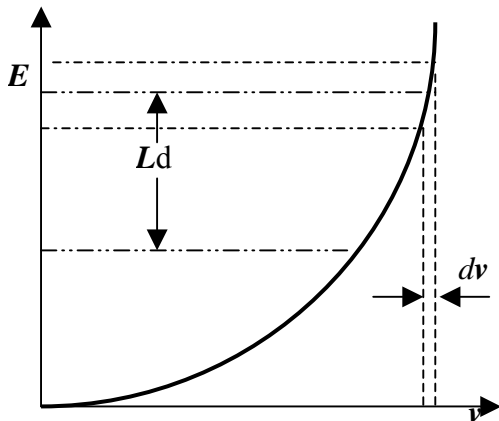
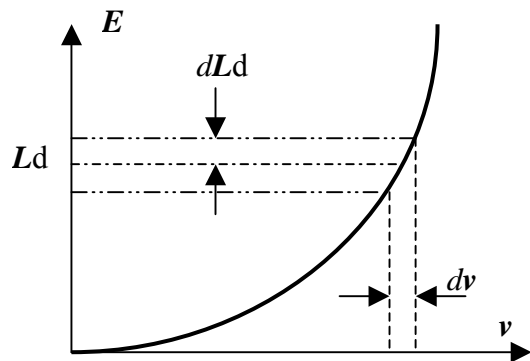
Pero como bien puede apreciarse del gráfico anterior el verdadero valor de la energía del sistema antes de la colisión dependerá además, de la energía del centro de masa. Y lo único que proveen los modelos analizados es el valor de Ld . Solo en casos muy particulares la energía del centro de masa es nula.

El otro problema a tener en cuenta, es acerca de la precisión de los resultados. Como ya se ha dicho, el propio **McHenry** atribuye a CRASH3 un error del 12 % (otros autores han encontrado dispersiones de hasta el 20 % en ensayos de choque entre vehículos y contra barrera). Estas afirmaciones llevan al concepto erróneo, difundido por algunos autores, de que el uso de estos modelos en la estimación de velocidad trasladan este orden de imprecisión, a los resultados cinemáticos. Trataremos como último tema, poner este problema en su verdadera dimensión.

Como se sabe la energía cinética es una función cuadrática de la velocidad

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

y por lo tanto su variación es una parábola de segundo grado del tipo graficada a la derecha. Si se tratara del caso particular que el centro de masa del sistema estuviera detenido, como en el caso de un choque contra barrera, para un error de +/- 10%, la incidencia en la velocidad será un 4,8 en más y un 5,2 % en menos. En números redondos, una imprecisión de un 20% en la estimación de energía redonda en un 10% de error en la estimación de velocidad.



Pero si el caso en estudio fuera de un choque, donde el valor del trabajo de deformación fuera igual a la energía del centro de masa, el mismo error de estimación de +/- 10% en el error de estimación en el valor del trabajo de deformación, el error de estimación de velocidad es menor al 5 % (entre valor mínimo y máximo).

Es decir que los valores son cada vez menos dispersos a mayor energía total de impacto, o lo que es lo mismo, cuando la velocidad del centro de masa del sistema en colisión es alta.

TMDef04 explota positivamente la respuesta de baja sensibilidad de la ecuación $E = f(v)$, para valores de trabajo de deformación (específico), superiores a 65 J/kg. La planilla de cálculo ofrece dos pares de valores para cada uno de los modelos (**McHenry** y **Prasad**) que offician de los límites extremos –mínimo y máximo- del entorno del "valor verdadero".

De esta manera se obtiene muy rápidamente un entorno de valores de trabajo mecánico de deformación, cuyo margen de error se puede determinar numéricamente. Es decir proporciona un valor acotado. Y un valor con error acotado es un margen de seguridad para las conclusiones finales de la investigación pericial.

CONCLUSIONES

Un investigador debe ser conciente de la herramienta que utiliza. Debe conocerla, saber de los principios y conceptos que están implícitos en su aplicación, del alcance y de los límites de validez de sus resultados. Cualquier herramienta de cálculo, empleada fuera de estos criterios, utilizada a ciegas, es fuente de errores indeterminados; se convierte en un arma peligrosa.

No existen *fórmulas mágicas* ni *recetas* infalibles. Un investigador debe ser conciente y responsable por su trabajo. Aún al disponer de herramientas de cálculo como *TMDef04*, debe estar alerta, y saber que no en todos los casos podrá ser aplicada con igual efectividad; e incluso que puede ser totalmente inútil en algunos casos (choques a baja velocidad, o deformaciones concentradas a consecuencia de choque contra postes, por ejemplo). E incluso de encontrarse dentro de un ámbito donde *TMDef04* puede proporcionar efectividad, el investigador deberá siempre aplicar los resultados al análisis integral del proceso físico complejo de la colisión.

El presente artículo introduce a los conceptos básicos del problema de la deformación residual en los automóviles que sufren colisiones de severidad importante. Asimismo proporciona algunos criterios básicos para el cálculo, entre ellos una herramienta auxiliar que puede servir de ayuda para encontrar con rapidez valores confiables. Pero es solo una breve introducción. Se recomienda profundizar el estudio del problema, a la par que se va ejercitando el uso de esta técnica.

La complejidad en la deducción de las ecuaciones fundamentales de Campbell y otros, y de los algoritmos de cálculo puede ser dejada de lado, lo mismo que el proceso laborioso del cálculo algebraico, si se afirman los conceptos.

Los modelos estáticos de estimación de energía absorbida por deformación, aún con sus imprecisiones y generalizaciones, proporcionan al investigador entrenado resultados fiables dentro de ciertos marcos y para determinadas aplicaciones. Y esos resultados suelen ser más precisos que otros procedimientos habitualmente empleados en la investigación y reconstrucción de siniestros viales.

Buenos Aires, Mayo de 2005.-----

BIBLIOGRAFÍA

⁽¹⁾ *Raymond R. McHenry - A COMPARISON OF RESULTS OBTAINED WITH DIFFERENT ANALYTICAL TECHNIQUES FOR RECONSTRUCTION OF HIGHWAY ACCIDENTS*
Paper SAE 750893

⁽²⁾ *Aloke K. Prasad.- CRASH3 DAMAGE ALGORITHM REFORMULATION FOR FRONT AND REAR COLLISIONS.- Paper SAE 900098*

⁽³⁾ *Kenneth L Campbell - ENERGY BASIS FOR COLLISION SEVERITY.- Paper SAE 740565*

⁽⁴⁾ *Donald E. SIDDALL and Terry D. DAY - UPDATING THE VEHICLE CLASS CATEGORIES —Paper SAE 960897*