

MODELOS FÍSICOS PARA ACCIDENTOLOGÍA VIAL

RECONSTRUCCIÓN ANALÍTICA DE ACCIDENTES DE TRÁNSITO

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (Ed_1 + Ed_2) \cdot M_2}{M_1 \cdot (M_1 + M_2)}}$$

$$\Gamma = M \cdot g \cdot s \cdot \left(\frac{\mu + \phi}{2} \right)$$

$$V = \frac{2 \cdot M \cdot g \cdot \left[\left(\frac{t}{2} \right)^2 + hcg \right] - hcg \left[M \cdot \left(\frac{t}{2} \right)^2 + hcg^2 \right] + lo}{M \cdot \left(\frac{t}{2} \right)^2 + hcg^2 + lo}$$

$$Ed = \frac{w}{6} \cdot \left[1 + \tan^2 \phi \right] \cdot \left[c_1 + 2 \cdot c_2 + 2 \cdot c_3 + \phi^4 \right]$$

$$\frac{B}{3} \cdot \left[c_1^2 + 2 \cdot c_2^2 + 2 \cdot c_3^2 + \phi^4 + c_1 \cdot c_2 + c_2 \cdot c_3 + c_3 \cdot \phi^4 \right]$$

$$S(t) = V_i \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

$$V(t)$$

$$V = \frac{V_i - V_o}{g \cdot x}$$

Copiar este material sin autorización es un DELITO

Autor: Gustavo A. Enciso

ISBN 978-987-42-0556-8

ISBN:



9 789874 205568

Prólogo de M. Gisela Insaurralde

Copiar este material sin autorización es un DELITO

Enciso, Gustavo Adolfo

Modelos físicos para Accidentología Vial / Gustavo Adolfo Enciso. - 1a ed . - Resistencia : el autor, 2016.

400 p.

ISBN 978-987-42-0556-8

1. Criminalística. 2. Derecho Civil. 3. Derecho Fiscal. I. Título.

CDD 364

NOTAS DEL AUTOR

Los contenidos y figuras de este libro, han sido íntegramente elaborados y escrito por su autor: Gustavo A. Enciso. Todo el material es original, incluyendo los gráficos que contiene.

Las imágenes fotográficas de los casos que se presentan, son una gentileza del Ing. Ángel Montenegro.

*Su elaboración y distribución es posible mediante el aporte de **empresas privadas**¹ que subvencionan las tareas de investigación y capacitación dirigidas por el autor.*

El autor, deposita en usted la confianza de su empleo con responsabilidad profesional y respeto por los derechos del mismo.-

Queda prohibida la reproducción (copia) parcial o total de este libro, a excepción de ser utilizado como cita de otro trabajo en cuyo caso la reproducción no debe ser mayor a las 100 palabras.-

Queda prohibida cualquier modificación de los contenidos de este libro. Si desea realizar alguna corrección, hágalo poniéndose en contacto con el autor encisoga@gmail.com

¹ Doctos Consultora®
www.doctosconsultora.com

Copiar este material sin autorización es un DELITO

ÍNDICE

<i>Prólogo</i>	
<i>Introducción</i>	11
<i>Objetivo y finalidad del libro</i>	13
<i>Referencias de gráficos y ecuaciones</i>	15
<i>Metodología del libro</i>	17
<i>Lista de símbolos</i>	20
<i>Revisión de física y matemática aplicada a la reconstrucción analítica</i>	22
0.1 Teorema de Pitágoras	24
0.2 Trigonometría	26
0.3 Vectores	28
0.4 Análisis matemático	40
0.5 Cinemática	66
0.6 Dinámica	76
0.7 Energía y Trabajo	86
0.8 Cantidad de movimiento	91
<i>Metodologías de cálculos para reconstrucción de accidentes de tránsito – nivel 1</i>	97
<i>Modelo 1: Modelo trabajo simple por fricción</i>	98
<i>Modelo 2: fricción simple con pendiente</i>	108
<i>Modelo 3: Modelo de trabajo simple por desaceleración</i>	116
<i>Modelo 4: Modelo de trabajo simple con desaceleración y pendiente</i>	122
<i>Modelo 5: Modelo de velocidad simple por fricción</i>	131
<i>Modelo 6: Modelo de velocidad con fricción y factor de corrección</i>	139
<i>Modelo 7: Modelo de velocidad con fricción y pendiente</i>	139
<i>Modelo 8: Modelo de velocidad con desaceleración</i>	147
<i>Modelo 9: modelo velocidad M.R.U. + M.R.U.V.</i>	152
<i>Modelo 10: Sumatoria de velocidades</i>	157
<i>Modelo 11: Modelo simple de caída</i>	162
<i>Modelo 12: Modelo de Velocidad en derrape</i>	167
<i>Modelo 13: Radio de Curva</i>	171
<i>Modelo 14: Velocidad crítica en curva sin peralte</i>	174
<i>Modelo 15: Velocidad crítica en curva con peralte</i>	179

<i>Modelo 16: Velocidad simple de vuelco</i>	187
<i>Metodologías de cálculos para reconstrucción de accidentes de tránsito – nivel 2</i>	192
<i>Modelo 17: Modelo de roto-traslación</i>	193
<i>Modelo 18: Modelo de atropello por Searle</i>	198
<i>Modelo 19: Eficacia de Proyección por Searle</i>	210
<i>Modelo 20: Modelo de atropello por Happer</i>	214
<i>Modelo 21: Modelo empírico de hidroplaneo</i>	225
<i>Modelo 22: Modelo empírico para colisiones de motocicletas</i>	231
<i>Modelo 23: Momentum lineal – caso unidimensional / caso1</i>	237
<i>Modelo 24: Momentum lineal – caso unidimensional / caso2</i>	246
<i>Modelo 25: momentum lineal – caso bidimensional / caso1</i>	252
<i>Modelo 26: momentum lineal – caso bidimensional / caso 2</i>	260
<i>Modelo 27: modelo dinámico de velocidad mínima de vuelco</i>	267
<i>Modelo 28: modelo empírico de velocidad de vuelco</i>	276
<i>Metodologías de cálculos para reconstrucción de accidentes de tránsito – nivel 3</i>	282
<i>Introducción a los modelos de deformación para accidentología vial</i>	283
<i>Lista de símbolos utilizada en la bibliografía americana</i>	289
<i>¿Por qué se utilizan integrales para estudiar la energía de deformación?</i>	290
<i>Primeras referencias</i>	291
<i>Modelo de Campbell</i>	293
<i>Modelo de McHenry</i>	305
<i>EBS (equivalent barrier speed)</i>	320
<i>Coefficientes de Rigidez</i>	321
<i>Protocolos de medición de las deformaciones de un vehículo</i>	338
<i>Modelo de Prasad</i>	351
<i>Consideraciones finales de los modelos lineales de deformación</i>	357
<i>Comparación de una reconstrucción, considerando el modelo energético de deformación</i>	358
<i>Modelo de DELTA V para colisiones centradas</i>	367
<i>Modelo de DELTA V para colisiones excéntricas</i>	372
<i>Bibliografías de Referencia</i>	388

PRÓLOGO

He sido testigo de los años invertidos por el autor, en el estudio técnico científico de los hechos de tránsito, y me invade un enorme entusiasmo al tomar conocimiento de que podremos disponer de su obra, porque sé que en ella nos ha transmitido un gran porcentaje de su patrimonio cognitivo.

Agradezco al Lic. Gustavo Enciso, por el tiempo abocado a la redacción de este libro, tan necesario dentro del ámbito accidentológico, y por hacer públicos a través del mismo, aquellos temas inéditos que había presentado en distintos congresos internacionales.

En este ejemplar tendremos acceso a información técnica única y actualizada en materia de Reconstrucción Analítica de hechos de Tránsito, con un alto valor agregado ya que en cada línea ha detallado en forma práctica y didáctica, el mundo de la accidentología vial contemplado a través de las gafas de la física, la matemática y la estadística.

Esta obra contiene temas jamás desarrollados en otros libros de accidentología vial, que al mismo tiempo fueron confrontados con modelos conocidos por el común de los reconstructores, a los fines de brindarnos elementos de comparación y opciones de planteos físicos ante diferentes casuísticas.

En las primeras páginas vemos desarrollados los conocimientos matemáticos básicos, que son necesarios tener presentes, dado que a medida que nos introducimos en cada temática, precisaremos discernir sobre esos conceptos, para lograr el razonamiento lógico tendiente a un resultado.

Adentrándonos en la lectura de tan valioso aporte cognitivo, el autor se abocó al planteo, explicación y desarrollo o resolución de diferentes metodologías de cálculos aplicadas al ámbito de la reconstrucción analítica, dividiéndolas para nuestra mayor comprensión y seguimiento, en tres grandes grupos o Niveles.

En el primer Nivel hallamos los modelos físicos de trabajo, desaceleración y velocidad desarrollados en tramos curvos o rectos, cuyas superficies pueden ser planas o inclinadas.

En este capítulo se han planteado además, ejemplos de accidentes ocurridos en curvas, en los cuales el autor señala el método para calcular el radio, a partir de la mensura de la cuerda y la normal del arco. En continuidad, conociendo el radio de la

curva, es posible también considerar otra medida tomada en el sitio del hecho: el peralte y volcar estos dos datos en la ecuación a partir de la cual arribaremos al conocimiento de la velocidad máxima admitida por el trazado de esa curva. Conocer este valor de velocidad “Crítica” es importante, en aquellos casos de despiste o salidas de la curva, donde se ha comprobado que las fuerzas centrífugas superaron a las del rozamiento, debido a que ese rodado ingresó al trazado animado de una velocidad que superó la admitida por las características físicas del camino. El valor hallado constituirá la “velocidad mínima de despiste” de ese vehículo.

Por otro lado, en este mismo Nivel 1 de reconstrucción, se contempló la ecuación de caída de un vehículo hacia un barranco, donde conociendo también datos relevados en el lugar durante la etapa de investigación, dirigen al planteo físico propuesto por el autor, cuyo resultado es la velocidad “de salida” de la vía.

Otro aporte valiosísimo ya en el segundo nivel de este libro, es la posibilidad de conocer las distancias recorridas por los vehículos sometidos a vuelcos experimentales, desarrollados a velocidades y desaceleraciones controladas, lo que nos permiten a los reconstructores relacionar esos valores de rapidez, con la distancia de vuelco que hayamos verificado en el lugar de los hechos.

También sin pretender extenderme en la redacción y permitiéndoles avanzar con la lectura de tan apreciado aporte bibliográfico, en el Nivel 2 han quedado plasmados los conceptos y aplicaciones de fenómenos como la Rototraslación y Momentum lineal.

Ya avanzado el libro y arribando al Nivel 3, hallamos todo lo que necesitamos saber, sobre la estimación de la energía disipada como trabajo de deformación, un apartado completísimo que merecería ser una obra separada, dado que trata en forma integral el protocolo de levantamiento de la información indiciaria, los modelos aplicados a estos casos, las virtudes y limitaciones de cada uno, y hasta cómo obtener los coeficientes de rigidez específicos del o de los vehículos que nos toque peritar.

En este encuentro literario técnico, el autor ha logrado transmitir con versatilidad los contenidos duros de la física, la matemática y la estadística, aplicados al recorte de la realidad que a diario necesitamos investigar y reconstruir.

Un buen libro no solo se mide por sus palabras, sino por el efecto colectivo que generan los conocimientos aportados por las estas. Estoy convencida que Usted, al

igual que yo, al leer la última página, quedará invadido por un fuerte sentimiento de haber sido verdaderamente edificado en la materia.

M. Gisela Insaurrealde
ginsaurrealde@doctosconsultora.com

INTRODUCCIÓN

Luego de varios ensayos, culminé este libro buscando el mejor perfil de su utilidad para lo cual tuve que aceptar una serie de simplificaciones que supongo, mis colegas más duros sabrán entender.

Los tiempos en que vivimos son demasiados dinámicos para mi gusto. Hoy la enseñanza ha adquirido una ligereza tal, que los conceptos son transmitidos ya casi sin discutir sus fundamentaciones, por lo menos a un nivel aceptable.

El papel y el lápiz han desaparecido, las hojas con surcos de lápiz borrados son solo un recuerdo. Nuestros hijos estudian escribiendo sobre un ordenador; van desapareciendo los pizarrones y las tizas blancas, y casi no hay tiempo para cuestionar el conocimiento que se transfiere.

Todo es muy fugaz, de manera que las transmisiones de conocimientos se despliegan en modelos de altísima simplificación. Existen pocos espacios para las preguntas, y se va disfumando el cuestionamiento profundo del conocimiento. Éste, es impartido y aceptado o rechazado, sin discusiones serias, sin demostraciones de sus principios. En consecuencia, todo es parte de la necesidad inminente de saber “todo y ya”, sin perder tiempo en razonar, cuestionar y fundamentar.

Bajo este dinamismo feroz quedarán en el tiempo los que se resisten a las nuevas formas de educación y formación. Los que intentamos todavía entender todo con sus justificaciones y demostraciones, seremos sobrepasados por los que aprovechan el tiempo en utilizar el conocimiento sin cuestionar “lo que ya se sabe”.

No puedo decir que todo tiempo pasado fue mejor. Solo puedo afirmar que hoy no se estudia como ayer y que existe una inminente demanda de adquisición de un conocimiento práctico. En nuestros tiempos, tomar conocimiento sin capitalizarlo, sin aprovecharlo en algún valor, ya no tiene sentido y hasta podría decir que conocer solo por conocer, es un lujo para aquellos que no pueden resistirse a la curiosidad del “porque”.

Tal vez, mimetizando un poco con estos tiempos actuales escribí este libro, que fue pensado para toda persona que “necesite” entender cómo se analizan y se estudian los accidentes de tráfico, para poder utilizar ese conocimiento con fines preventivos, técnicos o jurídicos.

Nuestro trabajo, el de los peritos accidentólogos en reconstrucción de accidentes, tiene una estrecha relación con otras actividades de la sociedad. Como todos; lo que sabemos, esperamos sea de utilidad para otros; así como también nosotros utilizamos el saber de los demás.

Por último vale aclarar que este libro no es un manual, ni una enciclopedia. En él se han volcado una serie de casos analizados con sus fundamentaciones, tratando de alcanzar así un alto grado de practicidad sin dejar de lado completamente, una mirada de análisis a “lo que ya se sabe”.

OBJETIVO Y FINALIDAD DEL LIBRO

El libro se presenta con un sentido absolutamente práctico enfocado a la utilidad de los conceptos de la física clásica y estadística aplicados a la accidentología vial, en relación a los procesos de investigación y reconstrucción de colisiones vehiculares.

Vale la pena aclarar, que dicho proceso implica varias funciones que inician en la investigación de las evidencias en el lugar del sitio de la colisión, y llegan a la elaboración de un informe o resultados que son de interés para el ámbito judicial o laboral.

En este sentido, la intención del libro está direccionada hacia la etapa analítica, donde es necesaria la aplicación de conceptos físicos o estadísticos para inferir uno de los parámetros dinámicos que mayor interés se tiene en este ámbito: *la velocidad de los vehículos y cuerpos que colisionan*.

Los análisis de velocidad utilizados normalmente en la accidentología vial, para la investigación de accidentes o siniestros, son desarrollados mediante *modelos físicos* o *estadísticos* que facilitan un recorte del fenómeno con el propósito de valorar parámetros de interés.

Un modelo físico aplicado a la accidentología, es la representación de la realidad del fenómeno (accidente vial), en un lenguaje simplificado y operable (sistema de variables), que mediante un conjunto de teorías (física clásica), permite inferir valores de magnitudes físicas (velocidad, espacios, tiempos), que son de interés para la Administración de la Justicia o Políticas de Prevención.

Un modelo estadístico es una expresión simbólica en forma de igualdad o de ecuación que resulta de un diseño experimental donde se relacionan variables, y que se obtiene mediante una regresión o técnica estadística. El modelo explica matemáticamente, la dependencia que existe entre las variables con cierto grado (relativo) de precisión.

En razón de ello, el libro está escrito justamente, con el objetivo de analizar y entender estos *modelos físicos clásicos* o *estadísticos*, y conocer cómo son aplicados dentro de la investigación de accidentes o siniestros viales. Al proceso de construcción de un determinado modelo físico o estadístico, para poder inferir la magnitud física de velocidad de vehículos y cuerpos involucrados en un accidente vehicular, lo denominaremos: *reconstrucción analítica*.

Para lograr el objetivo del libro, éste presenta una serie de situaciones o *fenómenos* presentes en varios casos de accidentes o siniestros viales, los cuales son mostrados con una complejidad de estudio gradual, hasta alcanzar ejemplos de análisis de colisiones más complejas.

La presentación de casos no obedece al reconocimiento de que en la accidentología o las reconstrucciones de accidentes de tráfico, en lo que refiere al abordaje de su estudio, se acaba en una tipología de accidentes o en su casuística.

Nada más lejos de ello, esta forma de presentación obedece a la intención pragmática de ubicar al lector desde el inicio de las primeras páginas de este libro, ante los problemas que debe resolver el experto, desde las situaciones más sencillas a las más complejas.

Otro aspecto a considerar en la presentación de los casos, está relacionada con la precisión de las conclusiones que pueda emitir el experto. En muchos casos, se discutirá la discreción necesaria de los resultados, sus alcances y la adecuación de los mismos que resulta ante los cuestionamientos que son formulados oportunamente desde la Justicia.

REFERENCIAS DE GRÁFICOS Y ECUACIONES

En cuanto a la redacción del libro, el lector debe tener presente que la exposición de las situaciones/casos requiere en su discusión, la utilidad de gráficos y expresiones algebraicas. La lectura correcta de éstos, debe respetar las siguientes normas:

1) Cada gráfico es indicado por el número de una figura que responde a dos numeraciones. El primer número hace referencia al número del caso o capítulo, y el segundo número indica el orden de la Figura. Así, por ejemplo, la Figura 2.3 es la tercera figura expuesta en el capítulo dos.

2) Las ecuaciones también son indicadas con un número, de acuerdo a su aparición, pero no se utiliza el número que indica el capítulo. La numeración de las ecuaciones se corresponde con el modelo que desarrolla. Para cada modelo, se presentan las ecuaciones numeradas en forma consecutiva.

3) Todas las ecuaciones están escritas con letra Arial, y cuando alguna variable debe ser citada por un símbolo, se escribirá en cursiva y sin comilla.

4) Las variables vectoriales presentan en la parte superior un pequeño signo en forma de flecha; siempre que se encuentren en una ecuación. Cuando las mismas estén simbolizadas en un texto, su cualidad vectorial se indicará con letra en **negrita**.

Ejemplo:

$$\vec{F} = M \cdot \vec{a} \quad \text{ec. 1}$$

En la ecuación 1 de arriba, se escribió en forma simbólica: la variable vectorial fuerza, representada por la letra F , la cual es un vector igual al producto de la masa M por el vector aceleración a . Se denota su cualidad de vector con una pequeña

flecha superior. Sin embargo, cuando se necesite hacer referencia al vector fuerza dentro de la redacción de un texto, solo se indicará su condición de vector escribiéndola el singo ***F*** en negrita. Caso contrario se refiere al módulo o parte escalara de la variable. En este caso, la escritura de la ecuación se realizará del siguiente modo:

$$F = M \cdot a \quad \text{ec. 2}$$

La ecuación 2 solo expresa la cantidad escalar de la fuerza *F*, (note que ahora en el texto la letra *F* no fue escrita en negrita, porque solo se expresa su cantidad escalar o módulo).

METODOLOGÍA DEL LIBRO

Recordemos que el libro hace uso de diversos estudios de situaciones en accidentes viales, con el fin de introducir directamente al lector en una discusión pragmática de las metodologías de reconstrucción analítica de estos hechos. Para alcanzar este objetivo creo conveniente desarrollar cada caso, mediante el auxilio de una serie de tópicos que se repiten en cada análisis. Lo que se propone en cada uno de estos tópicos se detalla a continuación:

PLANTEAMIENTO

La situación o caso a analizar es presentada mediante un diagrama de modelización donde se indica además la consigna a resolver.

INFORMACIÓN

Es una combinación de los datos o variables que el modelo presenta en su análisis.

No se explica cómo conseguir los valores de dichas variables, porque no es objetivo de este libro desarrollar las técnicas de investigación de campo del accidente

Algunas de las variables son propiedades de diseño del vehículo, otras están relacionadas con características de la vía, o representan indicios de los accidentes que se determinan en la inspección de las evidencias del accidente vial.

DESARROLLO DEL MODELO FÍSICO o MODELO EMPIRICO.

Se intentará mostrar en este tópico, la modelación física o empírica que permitirá reconstruir analíticamente el accidente, esto es: *proceso de construcción de un determinado modelo físico para poder inferir la magnitud física de velocidad u otro parámetro físico.*

CONSIDERACIONES DEL MODELO

Los modelos son constructos teóricos que se formulan para analizar determinados fenómenos físicos y que se articulan mediante el desarrollo de principios, leyes y experiencias físicas.

Modelar físicamente un fenómeno, como por ejemplo los accidentes de tránsito, implica realizar un recorte del mismo, a un nivel de simplificación que permita su comprensión. Los modelos físicos y modelos empíricos solo representan la mejor manera de entender cómo funcionan y suceden las cosas que nos rodean.

Casi todo lo que sucede en una colisión entre vehículos, objetos y personas; puede ser estudiado bajo los principios, leyes y experiencias de la física; es decir que estos fenómenos pueden ser comprendidos mediante una teoría de esta materia.

Sin embargo y a pesar de los impresionantes alcances del conocimiento humano, algunos niveles de comprensión del fenómeno de los accidentes viales, todavía no pueden ser alcanzados.

Las razones o justificaciones son muchas, y no podría asegurar que las conozco a todas. Solo por citar alguna, señalaría la complejidad que genera la diversidad de materiales que componen un automóvil. Igual dificultad genera la representación física en un modelo de estudio de los peatones, ciclistas o motociclistas. Aunque estos objetos puedan describirse mediante ecuaciones, sus variables son tan elevadas que no resulta práctico especificarlas a un nivel de utilidad.

Es por eso que en el análisis físico de las colisiones entre vehículos, objetos y personas resulta necesario realizar ciertas simplificaciones o recortes más profundos del fenómeno, para alcanzar un nivel práctico y útil de su análisis. A estas simplificaciones la llamaremos *consideraciones del modelo*.

Cuando un caso es analizado bajo un determinado modelo físico o empírico, con sus consideraciones respectivas, se puede lograr un nivel de comprensión del hecho sin perjuicio de que los resultados alcanzados sean erróneos. En todos estos casos, los resultados alcanzados pueden ser aceptados siempre que también se acepten las consideraciones del caso. No obstante, esto dará lugar a una nueva discusión referida a la justificación de las consideraciones efectuadas para el análisis de la colisión o accidente que es estudiado.

Es frecuente encontrar estudios y análisis de accidentes viales, donde las simplificaciones y consideraciones que se realizan para alcanzar utilidad de determinados modelos físicos son innecesarios, y consecuentemente también será posible encontrar en estos análisis otros resultados con mayor solidez o fundamentados, debido a que los mismos surgen de modelos de mayor complejidad o con menor simplificación.

La necesidad de simplificar los modelos de estudios o realizar las consideraciones del caso, puede resultar de diferentes situaciones. La razón más frecuente en el caso de los estudios de investigación de accidentes de tránsito, resulta de la escasez de datos que imposibilitan el empleo de ecuaciones con mayor número de variables.

LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES

e: pendiente en valor decimal.	
α : ángulo de la pendiente en grados sexagesimales,	[°]
s: distancia de fricción en metros,	[m]
s': distancia de desaceleración en metros,	[m]
s ₁ : distancia de superficie 1 en metros,	[m]
s ₂ : distancia de superficie 2 en metros,	[m]
s ₃ : distancia de superficie 3 en metros,	[m]
μ : coeficiente de fricción.	
δ : factor de desaceleración.	
f: factor de corrección.	
θ : ángulo de rotación en radianes.	
c ₁ : medida deformación 1 en centímetros,	[cm]
c ₂ : medida deformación 2 en centímetros,	[cm]
c ₃ : medida deformación 3 en centímetros,	[cm]
c ₄ : medida deformación 4 en centímetros,	[cm]
c ₅ : medida deformación 5 en centímetros,	[cm]
c ₆ : medida deformación 6 en centímetros,	[cm]
c _{med} : deformación residual media,	[cm]
c _{max} : deformación residual máxima,	[cm]
w: ancho de deformación en centímetros,	[cm]
Ed: energía de deformación en Joule,	[J]
EBS: velocidad equivalente a impacto contra barrera en metros/segundo,	[m/s]
A: coeficiente de rigidez (McHenry).	
B: coeficiente de rigidez (McHenry).	
G: energía consumida sin deformación permanente (McHenry).	[J]
do: coeficiente de rigidez (Prasad).	[Nw ^{0.5}]
d1: coeficiente de rigidez (Prasad).	[Nw ^{0.5} /m]
hcg: altura centro de gravedad del vehículo en metros.	[m]
b: distancia entre ejes o batalla del vehículo en metros.	[1/s]
t: trocha del vehículo en metros.	[m]
lv: largo total del vehículo en metros.	[m]

h: altura de caída en metros.	[m]
g: aceleración de la gravedad en metros sobre segundos al cuadrado.	[m/s ²]
Ix: momento de inercia en kilogramos por metro al cuadrado.	[m ² .kg]
T: trabajo en Joule.	[J]
E: energía en Joule.	[J]
Tt: trabajo total en Joule.	[J]
Vf: velocidad final.	[m/s],
[km/hr]	
V1: velocidad en el punto 1.	[m/s],
[km/hr]	
Vo: velocidad inicial.	[m/s],
[km/hr]	
Vp: velocidad de proyección del peatón.	[m/s],
[km/hr]	
Vc: velocidad del vehículo que impacta a peatón.	[m/s],
[km/hr]	
Ep: eficiencia de proyección, sin unidades.	
p: presión en psi (libras por pulgadas cuadradas).	[psi]
a y L: ancho y Largo del parche de contacto en centímetros.	[cm]

REFERENCIAS DE BIBLIOGRAFÍA

1] Juan José Alba López, Jesus Monclús González, Alberto Iglesia Pulla.- “Manual básico de investigación y reconstrucción”.- Grupo de Seguridad Vial y Accidentes de Tráfico de la Universidad de Zaragoza.- Editorial PONS S.L- (España 2001).-

2]- Gary Cooper.- “Traffic Accident Investigation Manual” - NORTHWESTERN UNIVERSITY TRAFFIC INSTITUTE – (U.S.A 1986).-

3] Ivaldi, Daniel. “Interpretación y Relevamiento de Huellas de Cubiertas sobre Calzada – Su importancia en Peritajes Judiciales”.- Ing. Daniel Ivaldi, edición del autor.

4] Walter S. Reed, A. Taner Keskin. “Vehicular response to emergency braking”. SAE 870501.

5] Sears F., Zemansky M., Young H.- “Física Universitaria”.- Addison-Wesley Iberoamericana.- (U.S.A. 1988).-

5] Neptune, Flynn, Chavez, Underwood.- “Speed from skids: A modern approach”. SAE 950354.

7] Ernesto Martínez. “La Física Forense en el Aula”.- Centro Atómico Bariloche; CNEA Instituto Balseiro, U.N. Cuyo — 1999. <http://cabbat1.cnea.gov.ar/forense/index.php>

8] J. Stannard Baker. “Traffic Collision Investigation- Accident Investigation Manual” <http://server.traffic.northwestern.edu/cart/items.asp?id=1>

9]- Reed W., Keskin A.- “Vehicular Deceleration and Its Relationship to Friction”.- SAE 890736 (U.S.A. 1989).-

10] H. Sledge Jr., M Marshek. “Formulas for estimating vehicle critical speed from yaw marks”. SAE 971147.

11]- Enciso G.- “Una Introducción a los Modelos Energéticos en Accidentología”.- Instituto de Cs. Criminalísticas y Criminología – Universidad Nacional del Nordeste, (Arg. 2003).-

12] Campbell K.L.- “Energy as a Basic for Accident Severity a Preliminary Study”- The University of Wisconsin, PhD Thesis Engineering - Automotive - (U.S.A. June 1972).-

13] Gary Cooper.- “Work, Energy and Speed from Damage in Traffic Accident.- Topic 870 of the Traffic Accident Investigation Manual - NORTHWESTERN UNIVERSITY TRAFFIC INSTITUTE - (U.S.A 1986).-

14] Ernesto Martínez. “Momento de inercia de autos para uso práctico en reconstrucción de accidentes”. Centro Atómico Bariloche; CNEA Instituto Balseiro, U.N. Cuyo — Junio 1995.

15] Watts A., Atkinson D., Hennessy C.- “Low Speed Automobile Accidents” 2°Edition.- Lawyers & Judges Publishing Company, (U.S.A. 1999).-

16] Ernesto Martínez. “Accidentes viales: Una mitología del choque”.- Centro Atómico Bariloche; CNEA Instituto Balseiro, U.N. Cuyo — Noviembre de 2001. <http://cabbat1.cnea.gov.ar/forense/index.php>

- 17] *Data Reference Guide, Version 4 -Volume I: Vehicle Tests*"; (U.S.A. April 1997)
(Codes updated 8/15/97) U.S. Department of Transportation <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/nrd10/software>
- 18] M.R Jouvencel .- "Biocinémática del Accidente de Tráfico". Ed. Díaz de Santos.- España, Año 2000.
- 19] S.J. Asthon Mackay. - *Car Desing for Pedestrian Injury Minization* .- SAE 796057.
- 20] A. Harper y col.- *Comprehensive Analisis Method for Vehicle/Pedestrain Collisions*. SAE 2000-01-0846.
- 21] J. Eubenks.- *Pedestrian involved traffic collision reconstruction methodology*. SAE 921 591.
- 22] Juan Martín Hernández Mota.- "Los accidentes de tránsito – Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre".- Flores Editorial y Distribución – México 2010.-
- 23] John Daily.- "Fundamentals of Traffic Accidente Reconstruction".- IPTM (Institute of Police Technology and Management University of North Florida). USA (Florida) 1988.
- 24] A. Harper y col.- *Comprehensive Analisis Method for Vehicle/Pedestrain Collisions*. SAE 2000-01-0846.
- 25] Ferdinand Beer & Russell Jhonston.- "Mecánica Vectorial para Ingenieros", Quinta Edición; Editorial McGRAW-Hille.- 1990.
- 26] Pablo Luque rodriguez y Daniel Álvarez Mántaras.- "Investigación de Accidentes de Tránsito – Manual de Reconstrucción".- Editorial: Netbiblo S.L., ISBN 978-84-9745-173-4, España, 2007.-
- 27] Juan José Alba López, Jesus Monclús González, Alberto Iglesia Pulla.- "Introducción al análisis de deformaciones".- Grupo de Seguridad Vial y Accidentes de Tráfico de la Universidad de Zaragoza.- Editorial PONS S.L- (España 2001).-
- 28] Osvaldo Negrini Neto, Rodrigo Kleinübing.- "Dinâmica dos Acidentes de Trânsito, Análises, Reconstruções e Prevenção".- Editorial Milenium, Brasil 2012.-
- 29] Rudolf Limpert.- "Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis".- The Michie Company Law Publishers, Virginia USA 1994.-
- 30] Raymond M. Brach.- "Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods".- SAE International Publication.

SOBRE EL AUTOR, GUSTAVO A. ENCISO

encisoga@gmail.com



Gustavo Adolfo Enciso, es Licenciado en Ciencias Criminalísticas y Criminología, además de ser Accidentólogo; egresado en el año 1998/2000 del Instituto de Ciencias Criminalísticas de la Universidad Nacional del Nordeste.

Fue becario de Investigación por concurso de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la U.N.N.E. durante 1999-2001.

Es docente en las Cátedras de Física 1 y Física 2 en el Instituto de Ciencias Criminalística de la U.N.N.E. durante el período 2000-2004, 2018 - 2025.

Trabajó como Perito para los fueros civiles de las Provincias del Chaco, La Pampa y Santiago del Estero en Argentina, desde 2000 al 2007.

Desde el año 2007 hasta el año 2014 trabajó como Jefe de División, Perito en el Gabinete Científico del Poder Judicial de la Provincia del Chaco (Argentina).

Es miembro de la SocietyAutomobile Engineer SAE desde el año 2000

Autor de diversos trabajos de investigación científica, algunos de ellos publicados en la SAE www.sae.org (Society Automobile Engineers) y la Revista Colombiana de Física www.revcolfis.org

Es el responsable del diseño y dirección del primer software de cálculo analítico para reconstrucción R.A.C.T.T.© www.ractt.com

En la actualidad es el Director del Centro de Entrenamiento IRAT www.ceirat.com y docente en la Tecnicatura Superior de Seguridad Vial – Universidad Nacional Tecnológica, Facultad Regional Resistencia.

INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DE DEFORMACIÓN

Importancia de los modelos de deformación

La reconstrucción de las colisiones de vehículos es un capítulo de la Accidentología Vial que aprovecha la utilidad de principios físicos para poder inferir, a partir de evidencias, variables de la dinámica de los vehículos dentro del proceso de la colisión.

Todo esto, en el marco de la reconstrucción del hecho, algo indispensable para la valoración de los aspectos técnicos del suceso que incidieron en la producción del mismo.

La utilidad de los principios físicos para entender cómo se suceden las colisiones de vehículos automotores, ha sido desde el principio de esta disciplina; la accidentología vial, el camino más serio y que más beneficios ha aportado a la administración de la justicia y a las políticas de prevención.

Mediante el *modelo físico*, se ha logrado aislar el fenómeno de la colisión vehicular, para poder ser comprendida y estudiada metódicamente.

Sin embargo, y a pesar del gran desarrollo que ha tenido la física y la tecnología numérica en nuestros tiempos, la realidad cruda en el proceso de reconstrucción de una colisión, sigue develando una gran cantidad de problemas que, poco o suavemente pueden ser resueltos con la física.

Muchos científicos han desarrollados soberbios sistemas de modelaciones físicas que, desde la teoría, funcionarían para entender de mejor manera que sucede en una colisión de vehículos. Pero la debilidad del procedimiento de "alimentar" estos modelos, no permite que traspasen su condición de "teórico".

En efecto, la reconstrucción de las colisiones de vehículos, sigue presentando un reto tecnológico para poder adquirir la suficiente información aprovechable mediante la modelación física.

En las colisiones cotidianas, los "datos" no están escritos en el escenario del siniestro, ni se encuentran inscriptos en ningún reporte.

Los modelos físicos presentan variables que deben ser precisadas. Estos datos deben identificarse mediante alguna tecnología.

Ante esta necesidad, y evaluando los resultados de las colisiones en los escenarios de choques, no son muchas las evidencias que pueden adquirir la condición de dato físico que alimenta un modelo. Y las pocas que hay, deben ser bien aprovechadas.

Es aquí donde surge la necesidad de abordar una tecnología que permita estudiar esta evidencia tan persistente en las colisiones: *las deformaciones residuales*.

Lista de símbolos utilizada en la bibliografía americana:

c: medida de deformación residual. Corresponde la inicial de la palabra "crush" = daño o deformación.

w: ancho de deformación. Corresponde a la inicial de la palabra "width" = ancho.

W: peso en libras fuerza. Corresponde a la inicial de la palabra "Weigh" = peso.

Vo: velocidad posterior al impacto contra barrera rígida.

EBS: velocidad equivalente a barrera rígida.

EBS_e: velocidad equivalente a barrera rígida estándar.

EBS_c: velocidad equivalente a barrera rígida corregida.

M: masa en kilogramos.

Vi: velocidad de impacto en km/hr o m/s.

Sistemas de unidades:

Unidades de Fuerza

[*lb*]: libras.

[*N*]: Newton,

Unidades de longitud

[*in*]: pulgadas,

[*cm*]: centímetros,

[*m*]: metros.

Unidades combinadas de velocidad:

[*mph*]: millas por hora.

¿POR QUÉ SE UTILIZAN INTEGRALES PARA ESTUDIAR LA ENERGÍA DE DEFORMACIÓN?

Tal vez, una de las razones por la cuales, los conceptos deducidos de los modelos lineales de deformación no han sido fácilmente asimilados por los peritos y reconstructores en general, se debe a la utilización de herramientas de análisis matemático en una y dos variables para desarrollar la teoría de los modelos.

En este libro, se vuelve a utilizar estas herramientas que son necesarias para el desarrollo de la temática, pero con el mejor esfuerzo de expresar tales conceptos en forma amigable.

No obstante, al final de libro, el lector encontrará un capítulo especialmente dedicado al repaso de las funciones matemáticas, derivadas de funciones e integrales indefinidas y definidas.

Otros conceptos físicos son necesarios también repasar, tal como lo es el concepto de "energía".

La energía es una magnitud escalar que es frecuentemente analizada en las colisiones en virtud del principio de conservación de la energía, de manera de poder cuantificar la cantidad de energía que se transforma o disipa en un choque, a partir de distintos tipos de trabajos que realizan los vehículos y objetos involucrados en el proceso de la colisión.

Una de las formas de transformación de la energía de un vehículo que desarrolla una colisión, se centra en el trabajo de fricción.

Por nuestra parte, es interés de este libro analizar la transformación o cambio de energía cinética que desarrolla un vehículo, como trabajo de deformación de su estructura.

Por tal motivo, podemos plantear un concepto físico de partida:

$$\Delta E = T$$

Dónde:

ΔE , es la variación o disminución de la energía cinética que desarrolla el vehículo,

T , es el trabajo efectuado que provoca la variación de la energía.

En la preparatoria o secundaria, aprendimos que "el trabajo es igual a la fuerza aplicada multiplicada por la distancia"; expresado esto en una ecuación tendremos:

$$T = F \cdot c$$

El trabajo también es una magnitud escalar que resulta de multiplicar escalarmente dos vectores: *fuerza* y *desplazamiento*.

Esta expresión primitiva de trabajo es correcta si consideramos que la magnitud de la fuerza F , es una constante aplicada en la misma recta de acción que el desplazamiento c .

Sin embargo, si el módulo de la fuerza varía en función del tiempo o del desplazamiento, la expresión primitiva de trabajo y energía que aprendimos ya no es suficiente.

¿Qué fuerzas de la naturaleza actúan con intensidad variable?

La fuerza que comprime un resorte es un ejemplo de una magnitud variable, dado que la intensidad de dicha fuerza se incrementa proporcionalmente a medida que se comprime más el resorte.

Esto es conocido como la Ley de Hooke, cuya expresión viene dado de la siguiente manera:

$$F = k \cdot c$$

De dónde:

k , es la constante de elasticidad del resorte o muelle,

c , es el acortamiento del muelle.

Si la expresión de Hooke la graficamos como una función, tendríamos el siguiente gráfico de la Figura A.

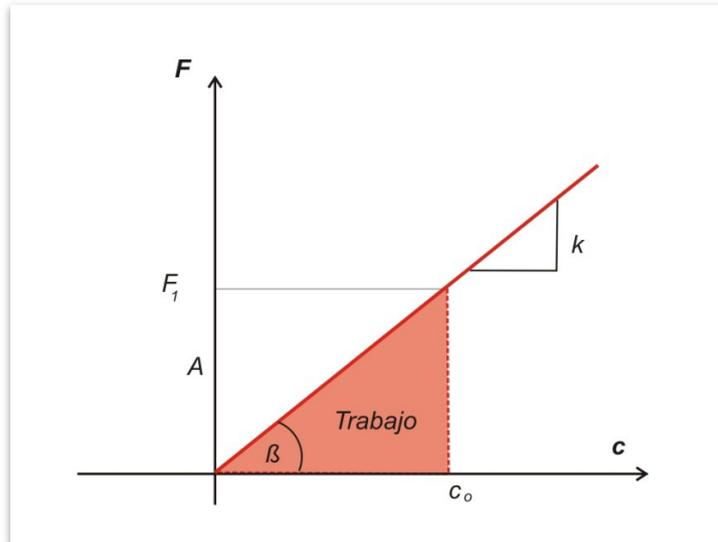


Figura A: ley de Hooke.

En la figura de arriba, la línea roja representa la ley de Hooke, la pendiente de dicha recta representa k , el módulo de elasticidad del muelle. La pendiente también es igual a la tangente trigonométrica del ángulo que conforma la recta con el eje de las abscisas (β).

El valor de la fuerza F_1 corresponde a la compresión del resorte para la distancia o desplazamiento c_0 , y el área comprendida debajo de la recta roja, representa el trabajo realizado por la fuerza del resorte F_1 para comprimirlo una distancia c_0 .

Matemáticamente podemos conocer dicha área calculando el área del triángulo:

$$\text{Trabajo} = \frac{c_0 \cdot F_1}{2}$$

Del mismo modo podemos aplicar la definición estricta de trabajo que se define como la integral definida de la función $F_{(s)}$

$$\text{Trabajo} = \int_0^{c_0} k \cdot c \, d$$

La solución de la integral de arriba es:

$$\text{Trabajo} = \frac{k}{2} (c_0)^2$$

De manera que el segundo miembro de esta última ecuación con la utilizada para calcular el área, debería ser la misma:

Al mismo tiempo sabemos que:

$$k = \text{tang}(\beta) = \frac{F_1}{c_0}$$

Por lo tanto:

$$\text{Trabajo} = \frac{F_1}{c_0} \cdot \frac{1}{2} \cdot (c_0)^2 = \frac{c_0 \cdot F_1}{2}$$

Simplificando:

$$\frac{F_1 \cdot c_0}{2} = \frac{c_0 \cdot F_1}{2}$$

Demostrando la igualdad buscada.

Al respecto, no todas las fuerzas de la naturaleza presentan la sencillez de la ley de Hooke, de manera que su trabajo pueda conocerse mediante aplicación de una ecuación simple de cálculo de superficie. De allí la necesidad de utilizar las integrales definidas, que constituyen las herramientas para encontrar el área debajo de las funciones de fuerza.

Por último, como la variación de energía es igual al trabajo realizado por la fuerza, podemos finalmente definir a dicha variación, de la siguiente manera:

$$\Delta E = \int_{c_0}^{c_1} F(s) \, ds$$

PRIMERAS REFERENCIAS

La revisión de unas de las bibliografías americanas más clásicas [1], como lo son los libros de *J. Stannard Baker* y *Lynn B. Frike* publicados por la Northwestern University; refieren los primeros estudios al inicio de la década de los setenta del siglo pasado, cuando investigadores como Emori y Mason & Whitcom, establecieron que existía una relación proporcional entre la velocidad de impacto de los vehículos que colisionaban contra barrera rígida y el valor de la profundidad de la deformación residual de estos.

$$v = 1.1 \cdot c$$

Dónde

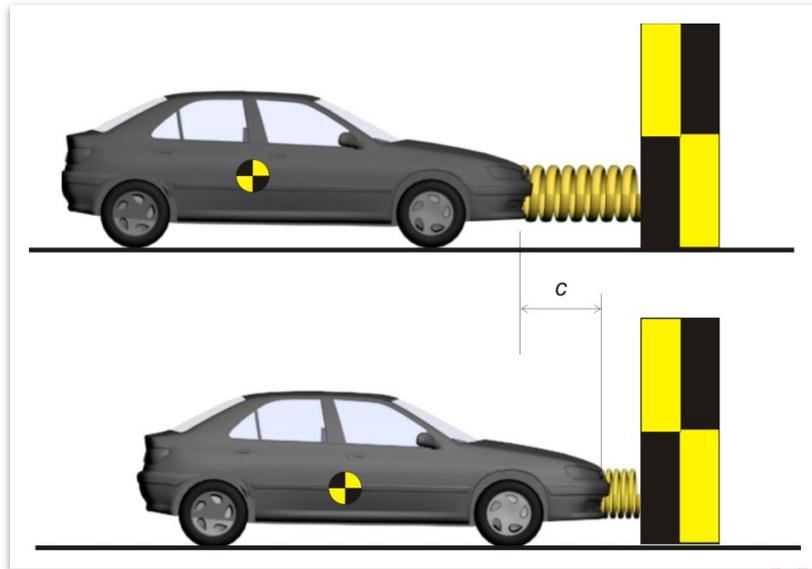
v: es la velocidad de impacto en millas por hora,

c: es la máxima penetración del daño en pulgadas.

Algunos de estos primeros ensayos se realizaron con vehículo modelo 56', y consideraban el fenómeno de la deformación relacionado con la compresión de un resorte. Por acción de una fuerza externa *F*, los muelles o resortes, se comprimen hasta un cierto punto en función de la intensidad de la fuerza y de la constante de elasticidad *k* del mismo.

Así como el resorte no cambia de masa durante la compresión, los automóviles tampoco varían su masa significativamente durante la deformación de su carrocería; por lo tanto podía pensarse al vehículo como un cuerpo de masa *M* sujeto a un resorte que es capaz de comprimirse un cierta distancia *c*.

Sin embargo, como los muelles tienen la capacidad de restituirse en su longitud, dado que primero se comprimen y luego se expanden; había que pensar en esta analogía solo para la primera parte del fenómeno.



Analogía de la deformación de un vehículo que colisiona con la compresión de un resorte.

Concepto de deformación residual:

Dependiendo de la severidad del impacto y diseño, los materiales que componen el vehículo bajo la acción de fuerzas externas pueden deformarse hasta cierta magnitud; sin embargo al cesar la acción de fuerza, dicha magnitud de deformación puede cambiar. La deformación residual es el valor de la cantidad de corrimiento o desplazamiento de los materiales del vehículo, como resultado de una colisión, cuando esta ha culminado.

1. MODELO DE CAMPBELL

En el año 1974, Kenneth L. Campbell [2]; presentó ante la comunidad de la Sociedad de Ingenieros Automotores (*SAE - Society of Automotive Engineers*), lo que puede ser considerado como el primer trabajo más influyente relacionado con el estudio de las deformaciones.

En resumen, Campbell había encontrado una relación empírica entre velocidad de impacto y deformación residual, y la utilidad de sus resultados no tenían un propósito pericial; más bien la intención de este autor, era la de proponer a partir de los resultados encontrados, un indicador de la severidad de la colisión.

K. Campbell, con el respaldo de la General Motors logró realizar una serie de ensayos de colisión controlada, lanzando vehículos a distintas velocidades que impactaban contra una barrera rígida. Utilizó para ello dos grupos de vehículos.

El primer grupo estaba compuesto por los siguientes automóviles:

Clasificados como *Standard Full Size* (coche de tamaño completo).

Chevrolet Impala,

Pointac Catalina,

Oldsmobile Delta 88,

Buick LeSabre,

Clasificados como *Intermediate* (intermedios).

Chevrolet Chevelle,

Chevrolet Monte Carlo,

Pointac LeMans,

Grand Prix,

Oldsmobile Cutlass,

Buick Centuri,

Clasificados como *Compact* (compactos). *Chevrolet Nova,*

Pointac Ventura,

Oldsmobile Omega,

Buick Apollo,

Todos estos vehículos ensayados eran modelos 71' y 72'.

El segundo grupo de vehículos ensayados estaba conformado por vehículos Chevrolet Vegas clasificados como sub-compactos, modelos del 71' al 74'.

Las colisiones contra barrera rígida se realizaron a distintas velocidades comprendidas entre 15 y 60 mph, equivalente a colisiones entre 24 y 97 km/hr.

Los resultados del primer grupo de vehículos ensayados se reproducen en la Figura 4.1.

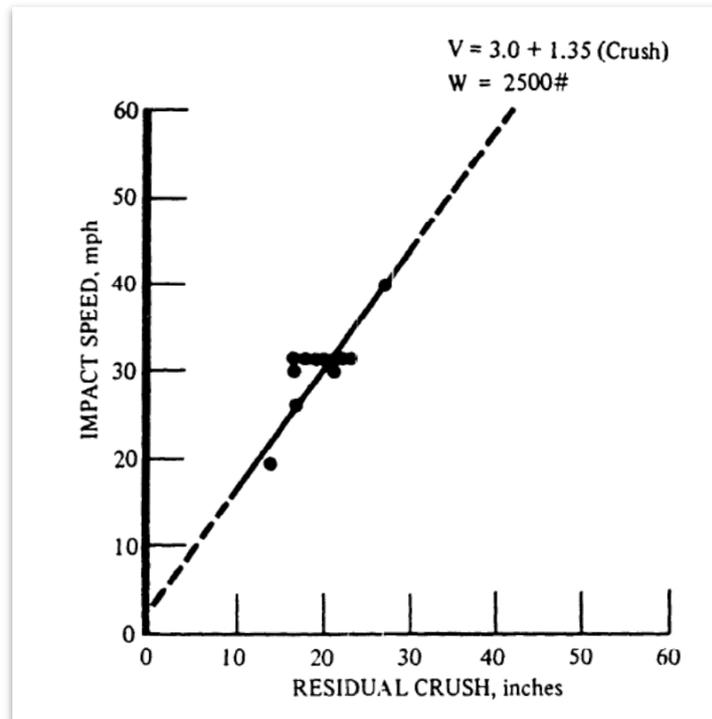


Figura 4.1¹: resultados del primer grupo de vehículos ensayados por K. Campbell [2].

¹Nota: la Figura 1-1 fue extraída de la publicación [1]. Todos los derechos intelectuales son del autor y es reproducida con la autorización de su editor, SAE Copyright Administrator

1.1 Interpretación de los resultados

La información mostrada en la Figura 4.1 contempla los resultados del grupo de vehículos ensayados. Cada punto representa la velocidad en mph y la deformación residual en pulgadas, del vehículo ensayado. Sobre el eje de las abscisas se muestra una escala de las deformaciones residuales c , y sobre el eje de las ordenadas la escala de la velocidad de impacto.

La línea oblicua trazada, representa la función lineal de la regresión que se obtiene mediante la disposición de los resultados.

Claramente se observa como el autor construyó mediante procedimiento estadístico denominado regresión lineal, la ecuación que mejor explica la dispersión de los resultados.

La regresión lineal, arroja una ecuación que se observa en la parte superior derecha de la Figura 4.1.

La intercepción de la línea de regresión con el eje de las ordenadas indica el valor de la velocidad de impacto sin deformación residual, señalando a qué velocidad teórica puede impactar el grupo de vehículos sin que se produzca daños permanentes. Este valor es representado por el coeficiente bo .

Además, la inclinación de la recta representa la pendiente de la misma y la misma es representada por el coeficiente $b1$, de manera que la función encontrada por Campbell puede ser escrita de la siguiente manera:

$$v = bo + b1 \cdot c \quad \text{Ec4.1}$$

Dónde:

v = es la velocidad de impacto en [mph],

bo = es el valor de la velocidad de impacto sin daño permanente en [mph].

$b1$ = es la pendiente de la función expresada en [mph/in],

c = es el valor de la deformación residual en pulgadas [in].

La Figura 4.2, muestra estos valores dentro de la gráfica.

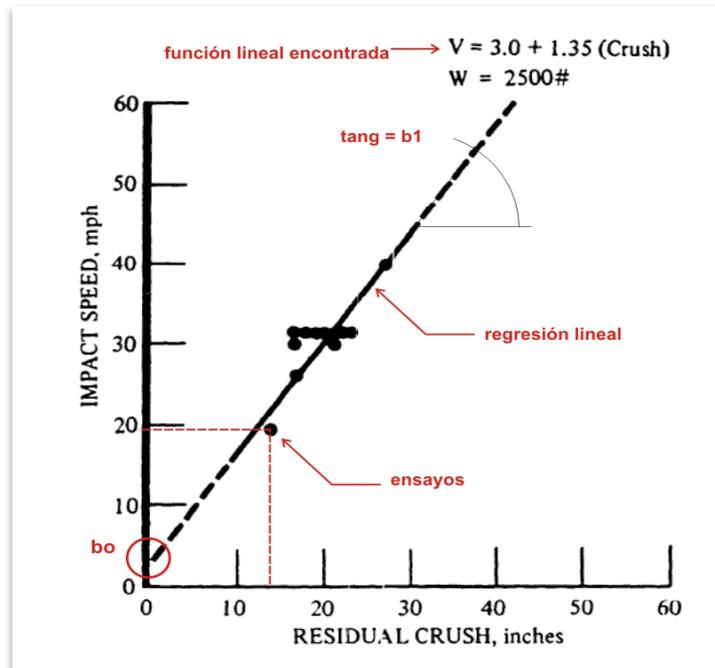


Figura 4.2

1.2 Desarrollo general del modelo

El trabajo de Campbell no termina solamente con la construcción de la ecuación 3.1. Dado que la deformación residual del vehículo podría tener distintas medidas de penetración, Campbell desarrolló el concepto de *fuerza por unidad de ancho de deformación* definiéndola de la siguiente manera:

$$\frac{F}{w} = a_0 + a_1 \cdot c \quad \text{Ec 3.2}$$

Dónde:

F/w : es la fuerza por unidad de ancho frontal de deformación y tiene unidades de [fuerza/long.].

a_0 : es la fuerza por unidad de ancho frontal de deformación sin daño permanente en unidades de [fuerza/long.].

a_1 : es la pendiente de la ecuación 4.25 en unidades de [fuerza/long.²].

c : es la medida de deformación en unidades de [long.].

K. Campbell relacionó los términos de la ecuación (1-2) con la ecuación (1-1), por medio de las siguientes igualdades:

$$a_0 = \frac{W \cdot b_0 \cdot b_1}{g \cdot w} \quad \text{Ec 3.3} \quad a_1 = \frac{W \cdot b_1^2}{g \cdot w} \quad \text{Ec 3.4}$$

Dónde:

W : es el peso del vehículo.

g : la aceleración de la gravedad.

w : el ancho del frente de deformación.

La energía disipada por unidad de ancho de deformación debe ser:

$$\frac{E}{w} = \int \frac{F}{w}(c) \, d \quad \text{Ec 3.5}$$

Reemplazando el integrando de la ecuación 4.5 por el segundo término de la ecuación 4.2 y resolviendo, tendremos:

$$\frac{E}{w} = \int (a_0 + a_1 \cdot c) \, d = a_0 \cdot c + \frac{a_1}{2} \cdot c^2 + \text{cte} \quad \text{Ec 3.6}$$

El término “cte” debe tener unidades de energía por unidad de ancho y analizando la expresión 4.6, la misma corresponde al valor de la energía disipadas por unidad de ancho cuando no hay deformación permanente. Por lo tanto, teniendo presente la ecuación 4.1, tendremos:

$$\frac{E}{w} = \int a_0 + a_1 \cdot c \, d = a_0 \cdot c + \frac{a_1}{2} \cdot c^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{M}{w} \cdot b_0^2 \quad \text{Ec 3.7}$$

Para una deformación del frente del vehículo con profundidad constante para cada ancho (misma penetración a lo ancho del daño), como se muestra en la Figura 4.3; la energía disipada debe ser:

$$E = a_0 \cdot c \cdot w + \frac{a_1}{2} \cdot c^2 \cdot w + \frac{1}{2} \cdot M \cdot b_0^2 \quad \text{Ec 3.8}$$



Figura 4.3: deformación con penetración constante en todo el frente del daño.

Esta energía debe ser igual a la variación de la energía cinética del vehículo, asumiendo que la velocidad después del impacto es igual a cero, lo que equivale a considerar que toda la energía se disipa en la deformación. Por lo tanto:

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot v_0^2 = a_0 \cdot c \cdot w + \frac{a_1}{2} \cdot c^2 \cdot w + \frac{1}{2} \cdot M \cdot b_0^2 \quad \text{Ec 3.9}$$

Reemplazando los valores de “a₀” y “a₁” según las expresiones 4.3 y 4.4, tendremos:

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot v_0^2 = \frac{W \cdot b_0 \cdot b_1}{g \cdot w} \cdot c \cdot w + \frac{W \cdot b_1^2}{g \cdot w} \cdot \frac{c^2 \cdot w}{2} + \frac{1}{2} \cdot M \cdot b_0^2 \quad \text{Ec 3.10}$$

La masa podemos volver a escribirla de la siguiente manera:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{W}{g} \cdot v_0^2 = \frac{W \cdot b_0 \cdot b_1}{g \cdot w} \cdot c \cdot w + \frac{W \cdot b_1^2}{g \cdot w} \cdot \frac{c^2 \cdot w}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{g} \cdot b_0^2 \quad \text{Ec 3.11}$$

Resolviendo y simplificando:

$$\frac{1}{2} \cdot v_0^2 = b_0 \cdot b_1 \cdot c + b_1^2 \cdot \frac{c^2}{2} + \frac{1}{2} \cdot b_0^2 \quad \text{Ec 3.12}$$

$$v_0^2 = 2b_0 \cdot b_1 \cdot c + b_1^2 \cdot c^2 + b_0^2 \quad \text{Ec 3.13}$$

Como el segundo término de la ecuación 4.13 es el desarrollo de un binomio cuadrado, podemos volver a escribir la misma expresión de la siguiente manera:

$$v_0^2 = (b_0 + b_1 \cdot c)^2 \quad \text{Ec 3.14}$$

Simplificando los exponentes:

$$v_0 = b_0 + b_1 \cdot c \quad \text{Ec 3.15}$$

La expresión 4.15 es la misma que la definida por K. Campbell en la ecuación 4.1.

Por lo tanto, la energía absorbida en una deformación uniforme como la ilustrada en la Figura 4.3, y considerando las ecuaciones 4.1, 4.3, 4.4 y 4.8, puede ser estimada de la siguiente manera:

$$E = M \cdot b_0 \cdot b_1 \cdot c + \frac{M}{2} \cdot b_1^2 \cdot c^2 + \frac{M}{2} \cdot b_0^2 \quad \text{Ec 4.16}$$

1.3 Concepto de perfil del daño (damage

profile)

En las colisiones reales y en algunos tipos de crash test, puede ocurrir de la penetración de la deformación en la estructura del vehículo, no sea la misma a lo ancho del daño. Esto puede ocurrir debido a que el ensayo se diseñó con solapamiento (distance off set), o el vehículo colisionó descentrado.

También puede ocurrir que el vehículo impacte contra un objeto de forma irregular, como ser un poste ancho, y la deformación copie la irregularidad del perfil.

Cuando la penetración varía con el ancho del daño, es necesario considerar dicha variación.

Se denomina perfil del daño, a la función $c(w)$ de la penetración c en relación al ancho w .

Algunos de los perfiles de daño más comunes se grafican en la Figura 4.4.

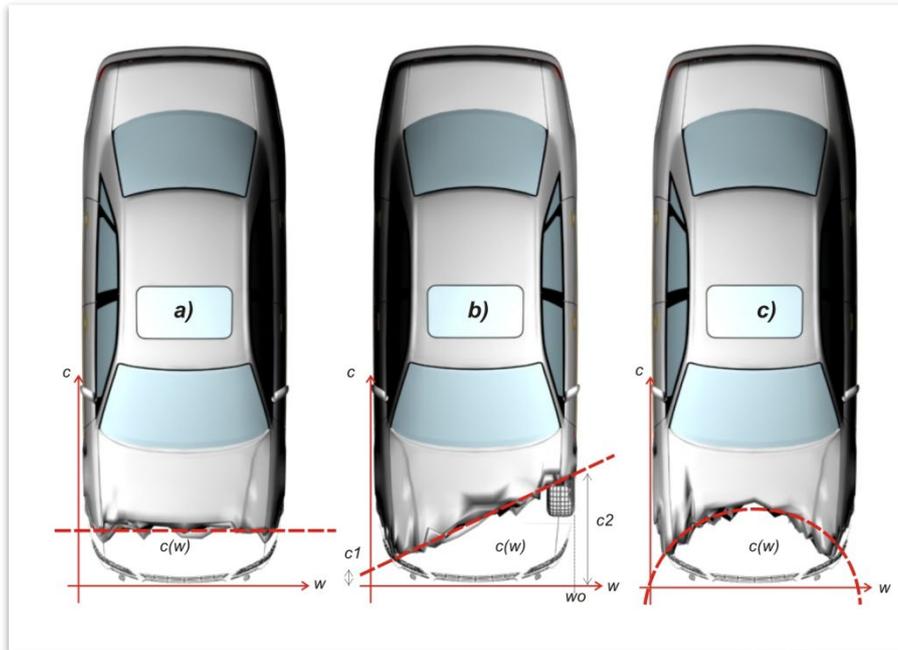


Figura 4.4: distintos perfiles de deformación.

Para el caso a), la función que relaciona la penetración o deformación con el ancho del daño $c(w)$, se corresponde con una constante.

Para el caso b) la función $c(w)$, responde a una ecuación lineal.

Para el caso c) la función $c(w)$, responde a una ecuación no lineal.

Es necesario tener presente que, cuando la deformación no es uniforme, la solución de la integración de la fuerza por unidad de ancho, será distinta.

1.4 Desarrollo del modelo para un perfil de daño no uniforme

Como ya se indicó, puede ocurrir que la profundidad de la deformación no sea la misma a lo largo del ancho del daño. Otra forma en que puede presentarse la deformación se ilustra en la Figura 4.4 b).

En dicho caso, la energía absorbida en la deformación debe ser computada considerando la variación de la profundidad a lo largo del ancho.

Para ello, es necesario construir una función $c(w)$

$$c(w) = c1 + \frac{(c1 - c2)}{wo} \cdot w \quad \text{Ec 4.17}$$

Dónde:

$c1$ y $c2$: son medidas de deformación,

wo : es el ancho total de la deformación.

La energía por unidad de ancho de deformación absorbida será:

$$\frac{E}{w} = \int_0^c \left(\frac{W \cdot b_0 \cdot b_1}{g \cdot w} + \frac{W \cdot b_1^2}{g \cdot w} \cdot c \right) d + \frac{1}{2} \cdot M \cdot b_0^2 \quad \text{Ec 4.18}$$

actuante a lo largo del todo el ancho del daño:

$$E = \int_0^{w_0} \int_0^{c(w)} \left(\frac{W \cdot b_0 \cdot b_1}{g \cdot w} + \frac{W \cdot b_1^2}{g \cdot w} \cdot c \right) d \cdot w + \frac{1}{2} \cdot M \cdot b_0^2 \quad \text{Ec 4.19}$$

en:

$$E = \frac{2}{M} \cdot \left[b_0^2 + b_0 \cdot b_1 \cdot (c_1 + c_2) + b_1^2 \cdot \frac{(c_1^2 + c_1 \cdot c_2 + c_2^2)}{3} \right] \quad \text{Ec 4.20}$$

doble integración de la ecuación 20, resultará de manera distinta.

[Nota: el desarrollo de las integrales dobles con otros perfiles de deformación, excede al propósito de este libro].

1.5 Hipótesis del modelo

Es necesario tener presente que el autor asumió ciertos supuestos que condicionan la utilidad del modelo, las cuales son consideradas como hipótesis cada vez que se aplica el modelo desarrollado. Estas consideraciones anunciadas por el autor son:

- La rigidez del vehículo es aproximadamente uniforme en toda la anchura de la superficie afectada.
- La fuerza F de deformación, actúa perpendicularmente a la superficie del vehículo.
- La medida de la deformación debe realizarse perpendicularmente a la superficie del vehículo sin deformar.
- Se consideran despreciables las fuerzas exteriores al sistema formado por los vehículos que colisionan, como fuerzas de rozamiento de los neumáticos bloqueados, etc., lo que se suele cumplir para colisiones a alta velocidad.
- La altura de la deformación es constante en todo el frente del daño.
- El modelo empírico valida resultados de colisiones entre 24 y 97km/hr.
- Solo puede ser aplicado a choques de media y alta velocidad.
- Las deformaciones residuales, como consecuencia de lo anterior, debe ser mayor a los 10 centímetros de profundidad.

1.6 El concepto del EBS (Equivalent Barrier Speed)

Todo vehículo que es sometido a un ensayo de colisión está definido por una masa M y una velocidad de ensayo a la cual es lanzada contra la barrera rígida, la cual llamaremos Vo' . Ésta, es la velocidad de la prueba (crash test) y Ed es la energía de deformación calculada con el método.

Se define al EBS (equivalent barrier speed), como la velocidad equivalente a la deformación calculada con el método, de manera que se cumpla la siguiente igualdad:

$$Ed = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (EBS)^2 \quad \text{Ec 4.21}$$

Nótese que Vo' no necesariamente debe ser igual al EBS , dado que todo vehículo en proceso de deformación por colisión desarrolla una etapa de elasticidad, mucho más significativa en choques a baja velocidad.

Considerando entonces las ecuaciones (4-16), (4-20) y (4-21), el EBS para deformaciones uniformes Figura 4, el EBS se computan de la siguiente manera:

$$EBS = \sqrt{bo^2 + 2 \cdot bo \cdot b1 \cdot c + b1^2 \cdot c^2} \quad \text{Ec 4.22}$$

Y en deformaciones variadas o perfil del daño irregular como la

indicada en la Figura 4.4.b es posible conocer el EBS mediante la siguiente expresión:

$$EBS = \sqrt{bo^2 + bo \cdot b1 \cdot (c1 + c2) + b1^2 \cdot \frac{(c1^2 + c1 \cdot c2 + c2^2)}{3}} \quad \text{Ec 4.23}$$

1.7 Resumen del modelo de K. Campbell

Lejos de un objetivo reconstruccionista, éste autor influenció dentro de la comunidad de la SAE con un trabajo netamente empírico presentando un primer estudio sólido de las deformaciones de los vehículos y la velocidad de impacto.

Aunque el objetivo de Campbell era la de construir un indicador de la severidad de los daños y la velocidad de impacto, su trabajo es considerado como la primer referencia del análisis de las deformaciones.

Si bien es cierto que, las ecuaciones resaltadas de este modelo no se emplean directamente en la actualidad, el desarrollo de K. Campbell resultó en la base de otras formulaciones posteriores marcando de esta manera la influencia de sus resultados en la construcción de otros modelos de deformación.

2. MODELO DE McHENRY

La influencia de este autor dentro de la historia americana del desarrollo de estudio de las deformaciones, es significativa, dado que las propuestas de McHenry si tuvieron desde su inicio, una visión más reconstruccionista, pero sin abandonar la finalidad estadística, dado que los estudios de este autor fueron apoyados por el gobierno americano con esta intención.

McHenry, es asociado inmediatamente como uno de los primeros estudiosos que "sistematizó" el proceso de reconstrucción analítica de las colisiones, mediante el desarrollo de dos de los programas informáticos más conocidos en el mundo de las reconstrucciones: el SMAC, modelo de simulación de colisiones de automóviles (*simulation model of automotive collisions*); y el CRASH, reconstructor Calspan de velocidades de accidentes en carreteras (*Calspan reconstruction of accident speeds on the highway*).

Calspan Corporation, es una de las empresas norteamericanas más antiguas dedicadas al desarrollo tecnológico de la seguridad en vehículos terrestres y desarrollo de la industria aeroespacial. McHenry fue funcionario de esta compañía y mediante convenios con la NHTSA, administración nacional de seguridad del tráfico de carreteras, desarrolló estos programas de computación con el objetivo de sistematizar la investigación y reconstrucción de colisiones, primero para fines estadísticos del gobierno, y luego aprovechado dentro de la comunidad de reconstructores independientes.

Para su cometido, y en particular para el desarrollo del CRASH, tuvo que crear un algoritmo que le permita cuantificar la energía disipada en la deformación y la variación de velocidad ΔV (delta V) desarrollada en la colisiones de vehículos.

En términos del mismo autor McHenry, éste a "modelado" el desarrollo de Campbell para llevarlo a una plataforma de cálculo (software).

2.1 Desarrollo general del modelo

McHenry propone en su algoritmo de CRASH, que la fuerza por unidad ancho F/w , desarrollada en la deformación de un vehículo que colisiona contra barrera, se define de la siguiente manera:

$$\frac{F}{w} = A + B \cdot c \quad \text{Ec 4.24}$$

Dónde:

F/w : es la fuerza ejercida en la deformación por unidad de ancho, en [lb/in],

c : es la magnitud de la penetración en [in],

A : es la máxima fuerza aplicada por unidad de ancho sin deformación permanente en [lb/in],

B : es el coeficiente de rigidez o resistencia del daño por unidad de ancho en [lb/in²].

La Figura 4.5, ilustra esta relación.

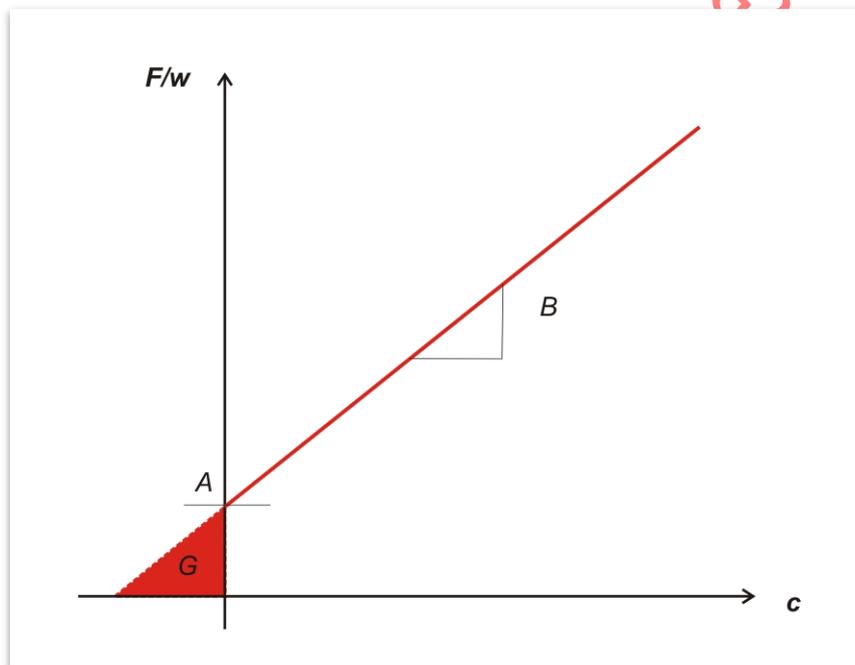


Figura 4.5: relación de fuerza por unidad de ancho de deformación y penetración.

El área que se encuentra por debajo de la línea de la función de la Figura 4.5, representa la energía disipada por unidad de ancho de deformación.

Donde el término G representa el área conformada por la región delimitada por A (fuerza por unidad de ancho sin deformación permanente), la abscisa y la pendiente de B . Por lo tanto, ésta área puede calcularse de la siguiente manera:

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} \quad \text{Ec 4.25}$$

Por lo tanto, el área total debajo de la recta, correspondiente a la energía de deformación por unidad de ancho, para una penetración c , puede ser estimada a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{E}{w} = \int_0^c (A + B \cdot c) \, d + G \quad \text{Ec 4.26}$$

Resolviendo:

$$\frac{E}{w} = A \cdot c + \frac{B}{2} \cdot c^2 + G \quad \text{Ec 4.27}$$

Si la penetración es la misma (uniforme) a lo ancho de todo el daño, y siendo w_0 el ancho total de la deformación, entonces la energía disipada puede ser estimada de la siguiente manera:

$$E = A \cdot c \cdot w_0 + \frac{B}{2} \cdot c^2 \cdot w_0 + G \cdot w_0$$

Por otro lado, si la penetración c no es uniforme a lo ancho del todo el daño, el vehículo presentará un perfil de daño no uniforme y es necesario definir la función de dicho perfil $c(w)$.

Una vez definida esta función $c(w)$, la energía consumida en la deformación puede ser estimada a partir de la siguiente expresión:

$$E = \int_0^{w_0} \int_0^{c(w)} (A + B \cdot c) \, d \, w + \int_0^{w_0} G \, w \quad \text{Ec 4.28}$$

manera de poder conocer los valores de A , B y G , a partir de los resultados de los ensayos de colisiones contra barrera rígida.

Esta relación se indica a continuación:

$$A = \frac{b_0 \cdot b_1 \cdot M}{w} \quad \text{Ec 4.29}$$

$$B = \frac{b_1^2 \cdot M}{w} \quad \text{Ec 4.30}$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} = \frac{b_0^2 \cdot M}{2 \cdot w} \quad \text{Ec 4.31}$$

Donde se deben considerar las siguientes unidades:

b_0 : en unidades de [in/seg],

b_1 : en unidades [1/seg],

M : masa de la unidad en unidades de [lb.seg²/in],

w : ancho de la deformación en [in],

A : en unidades de [lb/in],

B : en unidades de [lb/in²],

G : en unidades de [lb].

De esta manera e inicialmente, McHenry indicó los valores de sus coeficientes de rigidez a partir de los ensayo de Campbell.

Los mismos se indican a continuación tal cual como fueran publicados:

	Std. Wgt. (Lbs)	Width (In)	b_0 MPH	b_1 MPH/In	A Lb/Inch	B Lb/In ²	G Lb.
71-72 Std. Full Size	4500	79.2	6.85	0.88	274.6	35.27	1068.6
73-74 Std. Full Size	4500	79.2	7.5	0.90	307.5	36.89	1281.1
73-74 Intermediate	4000	76.8	7.5	0.90	281.8	33.82	1174.3
71-74 Compact	3400	71.4	3.0	1.35	154.6	69.57	171.78
71-74 Subcompact	2500	62.2	3.0	1.35	130.5	58.72	144.94

Table 1 Frontal Barrier Test Data (Based on Reference 9)

Figura 4.6: tabla publicada por McHenry [4], con los coeficientes A, B y G calculados a partir de los ensayos de Campbell [2].

*Nota: Todos los derechos intelectuales son del autor y es reproducida con la autorización de su editor, McHenry Software, Inc.

2.2 Desarrollo del modelo para un perfil de daño no uniforme

Sea una deformación con perfil irregular, como la indicada en la Figura 4.7, y considerando la ecuación 3.28; la fuerza por unidad de ancho F/w , no actúa de la misma manera en todo el ancho de la deformación w_0 .

En razón de ello es necesario considerar que la primera integración de la ecuación 4.28, solo permite conocer cuál ha sido la energía disipada en el trabajo de deformación para un ancho infinitesimal dw .

Como esta energía no es la misma en todo el ancho, resulta necesario realizar una segunda integración a lo largo del todo el ancho de la deformación w . Esto no resultaba necesario hacer cuando el daño era uniforme, dado que al considerarse que la energía deformada por unidad de ancho era la misma en todo el frente del daño, solo basta multiplicar el resultado de E/w por el valor del ancho completo de deformación w_0 .

En consecuencia, en todos los casos de daño irregular, se necesita conocer la forma en que la penetración o daño varía con el ancho de la deformación definiendo la función del perfil del daño $c(w)$.

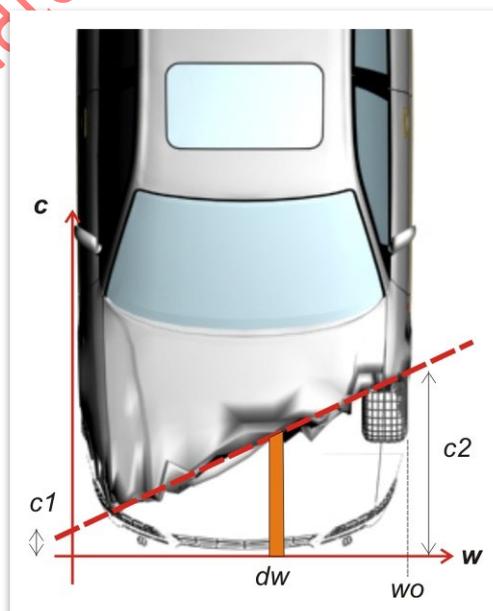


Figura 4.7: perfil del daño irregular.

Si se considera que el perfil del daño de la Figura 4.7, puede ser representado por una función lineal, donde resulta necesario conocer la ordenada al origen de dicha función y la pendiente.

La ordenada al origen es c_1 , y la pendiente de la recta puede ser conocida de la siguiente manera:

$$\frac{c_2 - c_1}{w_0} \quad \text{Ec 4.32}$$

La función del perfil del daño será:

$$c(w) = c_1 + \left(\frac{c_2 - c_1}{w_0}\right) \cdot w \quad \text{Ec 4.33}$$

Reemplazando la ecuación 4.33 en la 4.28, tendremos:

$$E = \int_0^{w_0} \int_0^{c_1 + \left(\frac{c_2 - c_1}{w_0}\right) \cdot w} (A + B \cdot c) \, d \, w + \int_0^{w_0} G \, w \quad \text{Ec 4.34}$$

Resolviendo la primera integración, resultará:

$$E = \int_0^{w_0} \left(A \cdot c + \frac{B}{2} \cdot c^2 \right)^{c_1 + \left(\frac{c_2 - c_1}{w_0}\right) \cdot w} \, w + \int_0^{w_0} G \, w \quad \text{Ec 4.35}$$

tendremos:

$$E = \int_0^{w_0} \left[A \cdot \left[c_1 + \left(\frac{c_2 - c_1}{w_0}\right) \cdot w \right] + \frac{B}{2} \cdot \left[c_1 + \left(\frac{c_2 - c_1}{w_0}\right) \cdot w \right]^2 \right] \, w + G \cdot w_0 \quad \text{Ec 4.36}$$

Reemplazando los extremos de integración, resolviendo término a término y simplificando, tendremos la expresión final:

$$E = \frac{A}{2} \cdot (c_1 + c_2) \cdot w_0 + \frac{B}{6} \cdot (c_1^2 + c_2^2 + c_1 \cdot c_2) \cdot w_0 + G \cdot w_0 \quad \text{Ec 4.37}$$

La expresión de la ecuación 4.37, resulta de aplicación para las colisiones con deformación no uniforme y perfil del daño que puede ser definido con dos medidas de penetración.

2.3 Colisiones en ángulo

Uno de los aspectos que considera los algoritmos de McHenry para sus plataformas de CRASH y SMAC, radica en la posibilidad de considerar que la fuerza deformadora generada en la colisión, no se ejerza en forma perpendicular al frente del vehículo.

En este caso la fuerza actuante F se considera sobre una recta de acción con cierta inclinación Θ como se ilustra en la Figura 4.4. En este caso, es necesario considerar la distancia adicional sobre la superficie del frente del vehículo, en el cual el daño se desplaza en forma simultánea cuando se produce la penetración.

Revisando el esquema de la Figura 4.8, el frente del daño a considerar debe ser dw en lugar de dw' , y la penetración que se debe considerar es dc en lugar de dc' .

Ahora bien, se puede plantear una relación trigonométrica entre estas variables, de manera que:

$$\cos(\theta) = \frac{dc'}{dc} \quad \text{Ec 4.38}$$

$$\cos(\theta) = \frac{dw'}{dw} \quad \text{Ec 4.39}$$

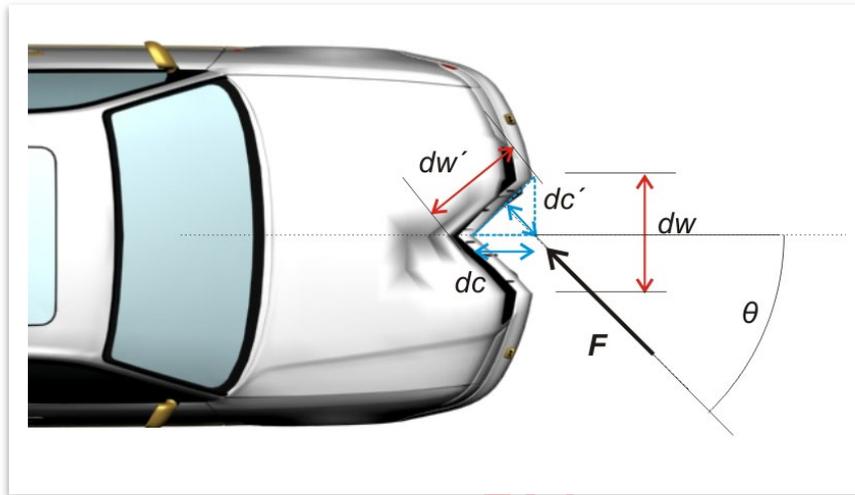


Figura 4.8: deformación por acción de fuerza no perpendicular al frente del vehículo.

Despejando:

$$dc = \frac{dc'}{\cos(\theta)} \quad \text{Ec 4.40}$$

$$dw = \frac{dw'}{\cos(\theta)} \quad \text{Ec 4.41}$$

Estas expresiones se pueden reemplazar en la ecuación 4.28, y tendremos que la energía de deformación será:

$$E = \int_0^{w_0} \int_0^{c(w)} (A + B \cdot c) \cdot \frac{1}{\cos(\theta) \cdot \cos(\theta)} d' w' + \int_0^{w_0} G w \quad \text{Ec 4.42}$$

$$E = \int_0^{w_0} \int_0^{c(w)} (A + B \cdot c) \cdot \frac{1}{\cos(\theta)^2} d' w' + \int_0^{w_0} G w \quad \text{Ec 4.43}$$

$$E = \frac{1}{\cos(\theta)^2} \cdot \int_0^{w_0} \int_0^{c(w)} (A + B \cdot c) d' w' + \int_0^{w_0} G w \quad \text{Ec 4.44}$$

Por identidad trigonométrica se puede

demostrar que:

$$\frac{1}{\cos(\theta)^2} = 1 + \tan(\theta)^2 \quad \text{Ec 4.45}$$

Por lo tanto, para corregir el cálculo de la energía de deformación, finalmente se tendrá la siguiente expresión:

$$E = (1 + \tan(\theta)^2) \cdot \int_0^{w_0} \int_0^{c(w)} (A + B \cdot c) \, d' \, w' + \int_0^{w_0} G \, w \quad \text{Ec 4.46}$$

Corrigiendo las ecuaciones 4.27 y 4.37 en consecuencia, tendremos:

Para deformaciones uniformes:

$$E = \left(A \cdot w \cdot c + \frac{B}{2} \cdot c^2 \cdot w + G \cdot w \right) \cdot (1 + \tan(\theta)^2) \quad \text{Ec 4.47}$$

Para deformaciones con perfil de daño del

tipo de la Figura 4.7: Ec 4.48

$$E = \left[\frac{A}{2} \cdot (c_1 + c_2) \cdot w + \frac{B}{6} \cdot (c_1^2 + c_2^2 + c_1 \cdot c_2) \cdot w + G \cdot w \right] \cdot (1 + \tan(\theta)^2)$$

Observaciones:

El término $[1 - \tan(\theta)^2]$, ha sido muy discutido dentro de la comunidad científica americana, pues dependiendo del valor del ángulo, puede aumentar en gran valor la energía estimada para una colisión frontal. Para un ángulo de 45 grados, el término de referencia es igual a 2 y duplica el valor de la energía disipada en el caso de una colisión frontal.

En teoría, el máximo valor del ángulo θ no puede superar los 29 grados, el cual es el equivalente al máximo valor de fricción entre metales.

2.4 Desarrollo estandarizado del modelo de McHenry para cualquier perfil de daño.

La ecuación 4.28, representa la expresión de partida o inicial planteada por McHenry para cuantificar la energía disipada a partir de la deformación residual.

Sin embargo, su solución depende, además, de la forma de la función del perfil del daño $c(w)$. Las expresiones 4.47 y 4.48 son, apenas, dos formas de resultados para dos tipos de perfiles de deformación.

Resulta claro entonces, que las ecuaciones que se obtengan de resolver la expresión 4.28, pueden presentarse de diversas formas.

En parte, para solucionar este problema, además de buscar una forma más práctica de resolver el algoritmo para el programa CRASH, McHenry plantea la posibilidad de estandarizar el cálculo aplicando siempre un algoritmo que se adapte a los todos los perfiles de daños posibles.

Para proponer dividir el frente del daño en 5 o 3 polígonos definiendo 6 o 4 medidas c_i respectivamente, de manera que el diferencial del ancho de deformación dw , ahora se reemplaza por un polígono de ancho w_i y lados c_i y c_{i+1} . Ver Figura 4.9.

De esta manera, las integrales de la ecuación 3.28 pueden resolverse parcialmente en función de las dimensiones de los polígonos que quedan delimitados en las 6 o 4 medidas de penetración.

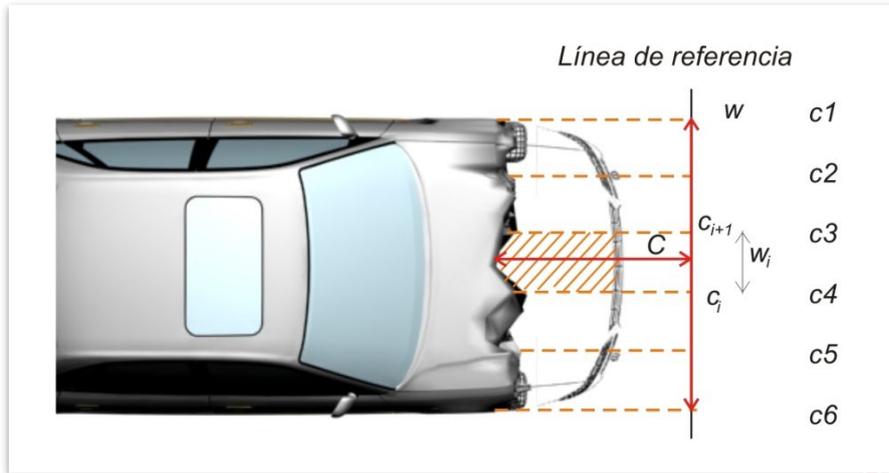


Figura 4.9: división estandarizada del daño en 5 polígonos.

Los lados de los polígonos definen además la penetración promedio del mismo, de la siguiente forma:

$$C = \frac{c_j + c_{j+1}}{2} \quad \text{Ec 4.49}$$

Seguidamente, se puede conocer el daño o penetración promedio total c , a partir de cada valor de penetración media de cada polígono:

$$c = \frac{\frac{c1 + c2}{2} + \frac{c2 + c3}{2} + \frac{c3 + c4}{2} + \frac{c4 + c5}{2} + \frac{c5 + c6}{2}}{5} \quad \text{Ec 4.50}$$

Resolviendo:

$$c = \frac{c1 + c2 + c2 + c3 + c3 + c4 + c4 + c5 + c5 + c6}{c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + 2 \cdot c4 + 2 \cdot c5 + c6} \quad \text{Ec 4.51}$$

$$c = \frac{c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + 2 \cdot c4 + 2 \cdot c5 + c6}{10} \quad \text{Ec 4.52}$$

Ahora es posible reemplazar la expresión 4.52 en la 4.28 y resolver solo la primera integral dado que la suma de las áreas de los polígonos dañados ya está incluido en la expresión 4.52:

$$E = \left[\int \left[A + B \cdot \left(\frac{c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + 2 \cdot c4 + 2 \cdot c5 + c6}{10} \right) \right] d \right] \cdot w + G \cdot w \quad \text{Ec 4.53}$$

Resolviendo la expresión anterior, tendremos:

$$E = \frac{A}{2} \cdot (c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + 2 \cdot c4 + 2 \cdot c5 + c6) \cdot w + \frac{B}{30} \cdot (c1^2 + 2 \cdot c2^2 + 2 \cdot c3^2 + 2 \cdot c4^2 + 2 \cdot c5^2 + c6^2 + c1 \cdot c2 + c2 \cdot c3 + c3 \cdot c4 + c4 \cdot c5 + c5 \cdot c6) \cdot w + G \cdot w$$

Ec 4.54

Re-ordenando los términos y considerando la posibilidad de una colisión en ángulo, tendremos:

$$E = \frac{w}{5} \left[5 \cdot G + \frac{A}{2} \cdot (c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + 2 \cdot c4 + 2 \cdot c5 + c6) + \frac{B}{6} \cdot (c1^2 + 2 \cdot c2^2 + 2 \cdot c3^2 + 2 \cdot c4^2 + 2 \cdot c5^2 + c6^2 + c1 \cdot c2 + c2 \cdot c3 + c3 \cdot c4 + c4 \cdot c5 + c5 \cdot c6) \right] \cdot [1 + \tan^2(\theta)]$$

Ec 4.55

Repitiendo el mismo concepto, pero para cuatro mediciones, la expresión final de estimación de energía disipada mediante la deformación residual será:

$$E = \frac{w}{6} \cdot \left[6 \cdot G + A \cdot (c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + c4) + \frac{B}{3} \cdot (c1^2 + 2 \cdot c2^2 + 2 \cdot c3^2 + c4^2 + c1 \cdot c2 + c2 \cdot c3 + c3 \cdot c4) \right] \cdot [1 + \tan^2(\theta)]$$

Ec 4.56

Y para dos medidas de deformación:

$$E = w \cdot \left[G + \frac{A}{2} \cdot (c1 + c2) + \frac{B}{6} \cdot (c1^2 + c2^2 + c1 \cdot c2) \right] \cdot [1 + \tan^2(\theta)] \quad \text{Ec 4.57}$$

Finalmente, las expresiones 4.54, 4.55 y 4.56 son los

algoritmos estandarizados para computar la energía disipada en la deformación residual, y su expresión ha sido aceptada dentro de la comunidad científica con sus respectivas consideraciones teóricas y prácticas.

Además, estas expresiones son las que se emplean en la totalidad de las aplicaciones informáticas de reconstrucción de colisiones.

De allí su enorme popularidad y aceptación dentro de las practicas periciales de reconstrucción.

A partir de las expresiones ecuaciones estandarizadas, el cómputo de la energía solo depende de las medidas tomadas en el vehículo deformado, y de los coeficientes de rigidez A y B, que más adelante describiremos.

2.5 Extrapolación del algoritmo de McHenry para colisiones laterales y traseras

En su propuesta inicial de McHenry para el programa CRASH, este autor propuso las ecuaciones 4.54, 4.55 y 4.56 para computar la energía disipada en la deformación a partir de las medidas del daño residual. Para ello, se apoyó en los ensayos experimentales de Campbell.

Sin embargo, este autor también definió las mismas ecuaciones con los mismos fundamentos para los casos de colisiones laterales y traseras, Figuras 4.10 y 4.11.

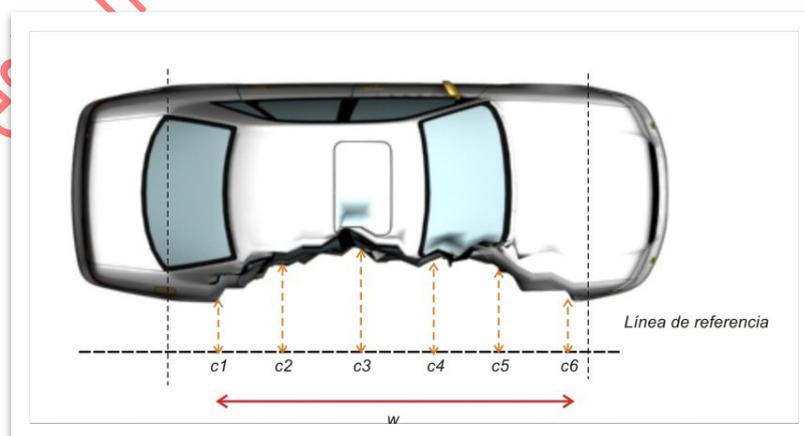


Figura 4.10: aplicación estandarizada para la energía de deformación en colisiones laterales.

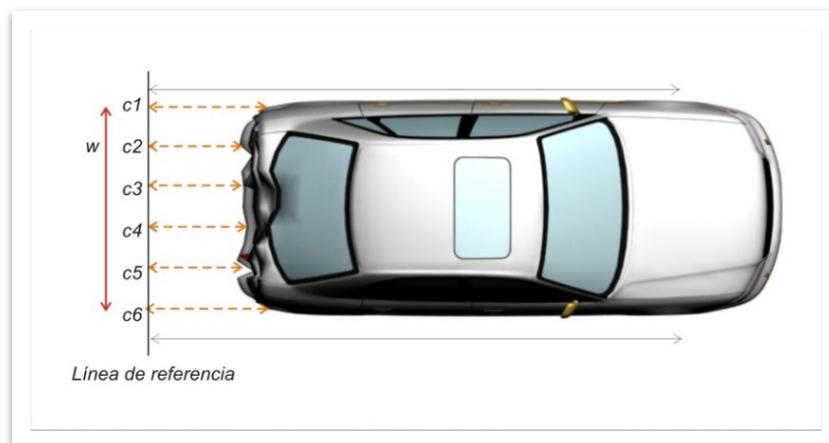


Figura 4.11: aplicación estandarizada para la energía de deformación en colisiones traseras.

No obstante, dichas aplicaciones en colisiones laterales y traseras, no fueron validadas empíricamente por ningún ensayo controlado, y en términos del mismo autor, dicha aplicación resulta en una "extrapolación del modelo verificado por Campbell".

En razón de ello, mucha ha sido la discusión dentro de la comunidad americana, para utilizar estos modelos en ese tipo de colisiones, desalentando su empleo siempre que existan alternativas metódicas para la reconstrucción de las colisiones.

2.6 Resumen y consideraciones sobre el modelo de McHenry

Los algoritmos de McHenry constituyen una sistematización del modelo empírico planteado inicialmente por Campbell. Su desarrollo, no puede ser para nada despreciado dado que McHenry contribuyó a la formalización y al pragmatismo del método.

Éste, sigue basándose en una relación **lineal** entre la fuerza deformante y la penetración o deformación residual del vehículo.

Bajo este supuesto, los modelos lineales siguen despreciando la propiedad elástica de los vehículos dado que estos no se comportan absolutamente en forma plástica en las colisiones contra barreras. De allí, surgirán las críticas más fuertes a estas proposiciones empíricas.

Paralelamente a ello, no se puede discutir la verdad empírica y la utilidad de los mismos, pues los resultados que aún se obtienen realizando una correcta extrapolación de los modelos, a las colisiones reales de nuestros días, se encuentran dentro de los valores reales. Según el mismo autor, CRASH permite encontrar resultados con un error en el orden de los 12%.

Sin embargo, el perito o reconstructor debe siempre considerar las limitaciones de los modelos lineales de deformación, ya indicadas en las hipótesis del modelo.

EBS (EQUIVALENT BARRIER SPEED)

Todo vehículo que es sometido a un ensayo de colisión está definido por una masa M y una velocidad de ensayo a la cual es lanzada contra la barrera rígida, la cual llamaremos Vo' . Ésta, es la velocidad de la prueba (crash test) y Ed es la energía de deformación calculada con el método.

Se define al *EBS* (equivalent barrier speed), como la velocidad equivalente a la deformación calculada con el método, de manera que se cumpla la siguiente igualdad:

$$Ed = \frac{1}{2} \cdot M \cdot EBS^2$$

Corrección de Masas:

Un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de trabajar con la expresión de Campbell y McHenry, radica en la necesidad de aplicar un factor de corrección de masas de los vehículos.

La energía cinética de un vehículo depende además de la velocidad a la que circule, de su masa total, es decir, de la suma de la masa del vehículo en vacío más aquellas otras masas variables que pueden estar presentes en él, tales como el combustible, pasajeros, etc. Por tanto, dos vehículos a la misma velocidad y que impacten contra una misma barrera, experimentarán mayor o menor nivel de deformaciones en función de la cantidad de masas respectivas al momento del impacto.

Para evitar este problema se introduce el factor de corrección de masas.

Por lo tanto el valor del EBS corregido será:

$$EBS = \sqrt{\frac{M}{M_r}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{E_d}{M}}$$

Dónde:

M: es la masa del vehículo considerada para el ensayo o, la masa teórica de la estimación en kilogramos.

M_r: es la masa real del vehículo siniestrado en kilogramos.

E_d: es la energía absorbida en la deformación en Joule.

3. COEFICIENTES DE RIGIDEZ

Los coeficientes de rigidez (*stiffness coefficient*), son en realidad constantes empíricas que expresan la idea de "dureza" del vehículo.

Para nada debe confundirse estos valores con otros conceptos similares empleados en el estudio de la resistencia de materiales.

La determinación de los coeficientes A, B y G, empleados en los algoritmos de McHenry, se basan en los resultados experimentales de las colisiones controladas denominadas *crash test*, donde a partir de dos o más ensayos realizados para un mismo tipo de vehículo a velocidades distantes, es factible determinar la pendiente y ordenada al origen de la recta de la función $v_{(c)}$ (Figura 4.1).

Estos ensayos deben referir colisiones controladas para vehículos de la misma clase o tipo, significando ello que deben existir una correspondencia entre sus propiedades de diseño (masa, batalla, disposición del motor, etc).

Además debe cumplirse que el tipo de colisión contra barrera tenga la misma configuración de laboratorio para ambas unidades, por ejemplo que todo el frente del vehículo abarque se comprometa en la colisión contra la barrera, de manera de asegurar que el ancho de la deformación es la misma para cada vehículo.

En este sentido, si se dispone de 2 o más ensayos con la misma configuración, para vehículos de la misma clase y a distinta velocidad de impacto, es factible construir los coeficientes de rigidez para dicho tipo de vehículo.

Si pudiéramos disponer de la información de 2 test, *test N° 1* y *N° 2*, realizados para vehículos de una misma línea de fabricación, que impactaron de la misma manera sobre una barrera rígida de masa infinita, a velocidades v_1 y v_2 , experimentando acortamientos c_1 y c_2 , respectivamente; podemos representar estos resultados en un diagrama como lo ilustra la Figura 4.12:

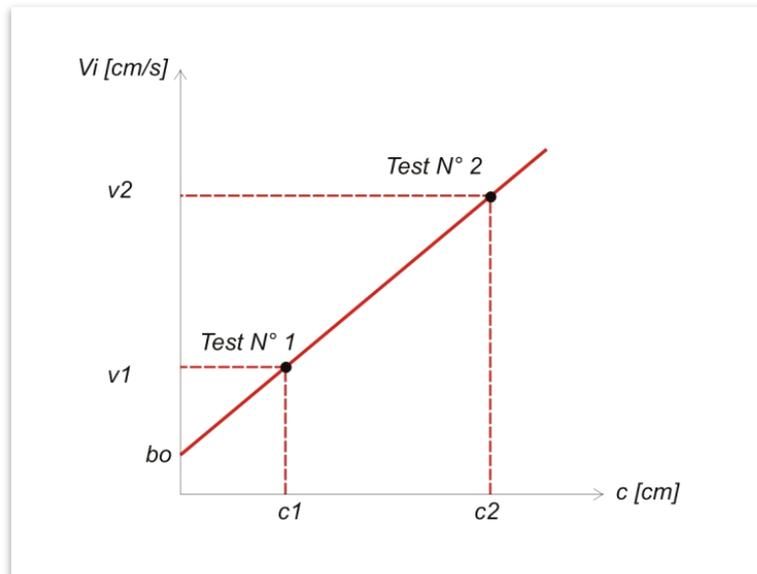


Figura 4.12: diagrama para los resultados de dos crash test.

Es posible conocer los valores de b_0 y b_1 partiendo de la siguiente expresión:

$$b_1 = \frac{v_1 - v_2}{c_1 - c_2} \quad \text{Ec 4.58}$$

$$b_0 = v_1 - \left(\frac{v_1 - v_2}{c_1 - c_2} \right) \cdot c_1 \quad \text{Ec 4.59}$$

Y una vez conocido los valores de b_0 y b_1 se puede conocer los coeficientes de rigidez mediante las ecuaciones 4.29, 4.30 y 4.31, siempre y cuando los vehículos ensayados tengan la misma masa M y el mismo ancho de deformación w .

$$A = \frac{b_0 \cdot b_1 \cdot M}{w} \quad \text{Ec 4.29}$$

$$B = \frac{b_1^2 \cdot M}{w} \quad \text{Ec 4.30}$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} = \frac{b_0^2 \cdot M}{2 \cdot w} \quad \text{Ec 4.31}$$

Surge ahora, la dificultad para los peritos y reconstructores de poder contar con información de los crash test, de determinado tipo de vehículos para poder calcular los coeficientes de rigidez.

Una solución parcial a este problema viene dado gracias a las publicaciones gratuitas de la Oficina de Administración de Seguridad del Tráfico de Carreteras de los Estados Unidos, NHSTA (National Highway Traffic Safety Administration). Esta oficina, entre otras funciones, está comprometida con la evaluación de tópicos de seguridad para todos los vehículos que se comercializan en los Estados Unidos. De allí que cuenta con complejos programas de evaluación de seguridad muchos de los cuales se realizan en forma estandarizada mediante colisiones controladas.

El sitio <http://www.nhtsa.gov/Research/Databases+and+Software> ofrece periódicamente publicaciones de resultados de ensayos controlados de seguridad de una gran cantidad de vehículos.

Aunque el fin de esta Oficina no es reconstruccionista, más bien su misión es administrar las pruebas de seguridad de los vehículos que se comercializan en ese país; la información ofrecida es tan completa, que sus resultados pueden ser empleados con fines reconstruccionistas y periciales.

El inconveniente principal de la información ofrecida en este sitio, está relacionada con las marcas comerciales de los vehículos ensayados, los cuales muchos de ellos no se comercializan en nuestro país.

No obstante, la revisión de su base de dato permitirá encontrar varios vehículos que transitan por América Latina.

3.1 Construcción de los coeficientes de rigidez por el método de McHenry

Las ecuaciones 4.58 y 4.59 para calcular coeficientes de rigidez, solo son útiles si se cumple la condición de igualdad de masa y ancho de deformación.

En la práctica, esto no suele suceder con frecuencia, dado que las masas de los vehículos, aún de la misma marca y serie, pueden diferir significativamente.

Por tal razón se han desarrollado otros métodos para calcular dichos coeficientes, uno de los cuales propuesto por McHenry es desarrollado a continuación.

El método parte del supuesto de considerar que, en todos los modelos de vehículos, la máxima velocidad que puede desarrollar una unidad que colisiona con su frente sin deformación permanente, equivale a 7 u 8 km/hr (1.95 a 2.3 m/s).

Ello implica que siempre se conocerá el valor de $b_0 = 2.12 \text{ m/s}$ (asumiendo un valor promedio).

Aceptada esta hipótesis, solo basta conocer el valor de la pendiente b_1 .

Para ello se parte de los resultados de un ensayo escogido para el vehículo que se investiga.

Supongamos que deseamos construir los coeficientes de rigidez para el Ford Fiesta.

Afortunadamente, en la base de datos de la NHSTA, existen varios ensayos sobre este tipo de vehículos.

En particular escogemos el ensayo N° 6996 (*), cuyos datos se sintetizan en la siguientes dos impresiones de pantalla. Figura 4.13 y 4.14.

Se puede observar que el resumen del ensayo muestra la siguiente información referida al vehículo:

Marca del Vehículo:	Ford Fiesta
Año del vehículo:	2011
Tipo de motor:	4 cilindros en transversal
Peso del vehículo:	1359 kg
Ancho del vehículo:	1683 mm
Velocidad de impacto:	56.5 km/hr
Ángulo de impacto:	0 grados.

(*) Donna Janovicz et al. "New Car Assessment Program - Report Final #6996"- NHSTA, October, 2012.-

Vehicle Database Query Results - Vehicle Detail Information

NOTE: Only data that has been reviewed and released from NHTSA/OCR's quality control process is available via this interface.

Vehicle No.:	1
Vehicle Make:	FORD
Vehicle Model:	FIESTA
Model Year:	2011
Engine Type:	4 CYLINDER TRANSVERSE FRONT
Engine Displacement (liters):	1.60
Vehicle Test Weight (Kgrams):	1359
Vehicle Length (mm):	4419
Vehicle Width (mm):	1683
NHTSA Number:	MB0214
Body Type:	FOUR DOOR SEDAN
Vehicle Identification No.:	3FADP4J8BM11431
Transmission Type:	AUTOMATIC - FRONT WHEEL DRIVE
Vehicle Center of Gravity Distance Behind Front Axle (mm):	1091
Steering Column Shear Capsule Separation:	UNKNOWN
Steering Column Collapse Mechanism:	UNKNOWN
Vehicle Modification Indicator:	PRODUCTION VEHICLE
Description of Vehicle Modification:	
Vehicle Speed (kph):	56.50

Figura 4.13: resumen de la información del crash test #6996

Vehicle Speed (kph):	56.50
Crabbed Angle (degrees):	0
Principal Direction of Force (degrees):	0
Bumper Engagement:	DIRECT ENGAGEMENT
Sill Engagement:	NOT APPLICABLE
A-Pillar Engagement:	NOT APPLICABLE
Vehicle Damage Index (Collision Deformation Classification):	12DEW6
Angle of Moving Test Cart (degrees):	0
Vehicle Orientation of Moving Cart (degrees):	0
Total Length of Indentation:	950
Distance between Center of Damaged area and C.G. Axis (mm):	0
Maximum Crush Distance:	612
Vehicle Commentary:	VEHICLE MODEL: FIESTA
Damage Profile Distances One:	550
Damage Profile Distances Two:	584
Damage Profile Distances Three:	601
Damage Profile Distances Four:	606
Damage Profile Distances Five:	592
Damage Profile Distances Six:	570
Pre-test - Total Length of Vehicle at Centerline:	4419
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Front of Engine:	3955
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Firewall:	3470
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Upper Leading Edge of Right Door:	3086
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Upper Leading Edge of Left Door:	3081
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Lower Leading Edge of Right Door:	3062
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Lower Leading Edge of Left Door:	3064
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Upper Trailing Edge of Right Door:	2019
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Upper Trailing Edge of Left Door:	2021
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Lower Trailing Edge of Right Door:	2031
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Lower Trailing Edge of Left Door:	2035
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Bottom of A Post of Right Side:	3063
Pre-test - Rear Surface of Vehicle to Bottom of A Post of Left Side:	3061

Figura 4.14: resumen de la información del crash test #6996

Las seis medidas de penetración desarrolladas por este vehículo en el ensayo de referencia, son ilustradas en la impresión de pantalla del reporte que puede ser descargado en forma gratuita desde:

<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/database.aspx/searchmedia2.aspx?database=v&tstno=6996&mediatype=r&tstno=6996>.

Figura 4.15

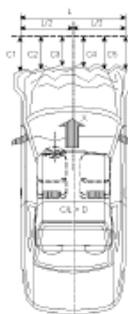
DATA SHEET NO. 13
ACCIDENT INVESTIGATION DIVISION DATA

Test Vehicle: 2011 Ford Fiesta S 4-Dr Sedan NHTSA No.: MB0214
Test Program: NCAP Frontal Barrier Impact Test Test Date: 8/18/2010

VEHICLE INFORMATION
VIN: 3FADP4AJ8BM111431 Wheelbase (mm): 2497
Vehicle Size Category: Sedan Test Weight (kg): 1358.5

ACCELEROMETER DATA
Accelerometer Locations: As per measurements on Page 15
Cal. Procedure/Interval: MGA procedure / 6 month
Integration Algorithm: Trapezoidal Linearity: > 99%
Impact Velocity (km/h): 56.5
Velocity Change (km/h): 60.6
Time of Separation (msec): 93.2

CRUSH PROFILE
Collision Deformation Classification: Frontal
Midpoint of Damage: Centerline
Damage Region Length (mm): 950
Impact Mode: Frontal



No.	Measurement Description	Units	Pre-Test	Post-Test	Difference
C1	Crush zone 1 at left side	mm	4290	3740	550
C2	Crush zone 2 at left side	mm	4341	3757	584
C3	Crush zone 3 at left side	mm	4362	3761	601
C4	Crush zone 4 at right side	mm	4362	3756	606
C5	Crush zone 5 at right side	mm	4341	3749	592
C6	Crush zone 6 at right side	mm	4290	3720	570
L	C1 TO C6	mm	950	972	-22

Figura 4.15: resultado de las seis medidas de penetración del ensayo.

El objetivo de este ensayo, es someter a este tipo de vehículos a una evaluación definida por una norma estándar de la NHSTA, denominada FMVSS 208, la cual busca cualificar algunas medidas de seguridad en el habitáculo del vehículo.

Sin embargo, la información de la configuración del ensayo, su velocidad de impacto, las deformaciones y otras informaciones emitidas en el reporte, pueden ser utilizados con fines reconstruccionistas y para estimar los coeficientes de rigidez de este vehículo.

A continuación se desarrolla el método de McHenry para estimación de los coeficientes de rigidez a partir de los datos de un crash test.



Figura 4.16: imagen del Ford Fiesta en desarrollo de la colisión controlada a 56.5 km/hr.

3.1.1 Desarrollo de método:

El método consiste en realizar una descomposición del algoritmo de McHenry planteado en la ecuación 4.55.

$$E = \frac{w}{5} \left[5 \cdot G + \frac{A}{2} \cdot (c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + 2 \cdot c4 + 2 \cdot c5 + c6) + \frac{B}{6} \cdot (c1^2 + 2 \cdot c2^2 + 2 \cdot c3^2 + 2 \cdot c4^2 + 2 \cdot c5^2 + c6^2 + c1 \cdot c2 + c2 \cdot c3 + c3 \cdot c4 + c4 \cdot c5 + c5 \cdot c6) \right] \cdot 1 + \tan^2(\theta)$$

Ec 4.55

Bajo la consideración que la colisión es lineal y que la fuerza de deformación actúa perpendicular al plano de deformación, entonces el último término de la ecuación 4.55, desaparece:

$$E = \frac{w}{5} \left[5 \cdot G + \frac{A}{2} \cdot (c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + 2 \cdot c4 + 2 \cdot c5 + c6) + \frac{B}{6} \cdot (c1^2 + 2 \cdot c2^2 + 2 \cdot c3^2 + 2 \cdot c4^2 + 2 \cdot c5^2 + c6^2 + c1 \cdot c2 + c2 \cdot c3 + c3 \cdot c4 + c4 \cdot c5 + c5 \cdot c6) \right]$$

Ec 4.60

A partir del cual se puede identificar los términos que contienen las medidas de deformación del uno al seis:

$$C = (c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + 2 \cdot c4 + 2 \cdot c5 + c6) \quad \text{Ec 4.61}$$

De donde, C y C' son los términos que agrupan las

$$C' = (c1^2 + 2 \cdot c2^2 + 2 \cdot c3^2 + 2 \cdot c4^2 + 2 \cdot c5^2 + c6^2 + c1 \cdot c2 + c2 \cdot c3 + c3 \cdot c4 + c4 \cdot c5 + c5 \cdot c6)$$

Ec 4.62

medidas de deformación y pueden ser reemplazados en la ecuación 3.60, igualando además toda la energía de deformación E, a la energía cinética de la velocidad de impacto Vi:

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot Vi^2 = \frac{w}{5} \cdot \left(5 \cdot G + \frac{A}{2} \cdot C + \frac{B}{6} \cdot C' \right) \quad \text{Ec 4.63}$$

ensayo del test.

Donde Vi es la velocidad de

Podrá notar el lector que los términos C, C', y Vi son datos que pueden obtenerse del ensayo seleccionado.

Reorganizando los términos y recordando que el coeficiente G , depende de A y B , tendremos:

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot Vi^2 = \frac{w}{5} \cdot \left[5 \cdot \left(\frac{A^2}{2 \cdot B} \right) + \frac{A}{2} \cdot C + \frac{B}{6} \cdot C' \right]$$

También Ec 4.64

recordamos que los coeficientes de

McHenry, son determinados a partir de las constantes b_0 y b_1 planteados originalmente por Campbell. Por consiguiente recordamos la igualdad indicadas en las ecuaciones 4.29, 4.30 y 4.31:

$$A = \frac{b_0 \cdot b_1 \cdot M}{w} \quad \text{Ec 4.29}$$

$$B = \frac{b_1^2 \cdot M}{w} \quad \text{Ec 4.30}$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} = \frac{b_0^2 \cdot M}{2 \cdot w} \quad \text{Ec 4.31}$$

Reemplazando estas expresiones en la ecuación 4.64, tendremos:

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot Vi^2 = \frac{w}{5} \cdot \left[5 \cdot \frac{\left(\frac{M \cdot b_0 \cdot b_1}{w} \right)^2}{2 \cdot \frac{M \cdot b_1^2}{w}} + \frac{\left(\frac{M \cdot b_0 \cdot b_1}{w} \right)^2}{2} \cdot C + \frac{\left(\frac{M \cdot b_1^2}{w} \right)}{6} \cdot C' \right] \quad \text{Ec 4.65}$$

De esta última expresión, los valores de M (masa), C y C' (medidas de deformación), y Vi (velocidad de impacto de la prueba), son extraídos del ensayo seleccionado; mientras que el valor de b_0 se asume bajo hipótesis del modelo con el valor de 2.12 m/s.

Por lo tanto, es posible reorganizar los términos de la ecuación 4.65 y despejar el término b_1 .

De esta manera, tendremos:

$$b_1 = \frac{-b_0 \cdot C + \sqrt{(b_0 \cdot C)^2 - 20 \cdot \frac{C'}{3} \cdot (b_0^2 - Vi^2)}}{2 \cdot \frac{C'}{3}}$$

Ec 4.66

Una vez obtenido el valor de b_1 , y sabiendo el valor de b_0 , se calculan los valores de los coeficientes de rigidez A , B y G con las ecuaciones 4.29, 4.30 y 4.31.

3.1.2 Aplicación del método:

A partir de los datos del reporte del ensayo #6996, es posible conocer el coeficiente de rigidez para el automóvil Ford Fiesta modelo 2011.

Los datos del ensayo están resumidos en las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15, los cuales se sintetizan a continuación:

Medidas de penetración:

$$c_1 := 550 \cdot \text{mm}$$

$$c_2 := 584 \cdot \text{mm}$$

$$c_3 := 601 \cdot \text{mm}$$

$$c_6 := 590 \cdot \text{mm}$$

Masa:

$$M := 1358.5 \cdot \text{kg}$$

Ancho de deformación:

$$w := 1683 \cdot \text{mm}$$

Valor asumido de "bo":

$$bo := 2.12 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de impacto del test #6996:

$$Vi := 56.5 \cdot \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

Términos C y C':

$$C := (c1 + 2 \cdot c2 + 2 \cdot c3 + 2c4 + 2 \cdot c5 + c6) \quad C = 4794 \cdot \text{mm}$$

$$C' := (c1^2 + 2 \cdot c2^2 + 2 \cdot c3^2 + 2c4^2 + 2 \cdot c5^2 + c6^2 + c1 \cdot c2 + c2 \cdot c3 + c3 \cdot c4 + c4 \cdot c5 + c5 \cdot c6)$$

$$C' = 3821246 \cdot \text{mm}^2$$

Cómputo de b1:

$$b1 := \frac{-bo \cdot C + \sqrt{(bo \cdot C)^2 - 20 \cdot \frac{C'}{3} \cdot (bo^2 - Vi^2)}}{2 \cdot \frac{C'}{3}}$$

$$b1 = 27.1 \frac{1}{\text{s}}$$

Cálculo de los coeficientes de rigidez:

$$A := \frac{M \cdot bo \cdot b1}{w}$$

$$A = 463.4 \cdot \frac{\text{N}}{\text{cm}}$$

$$B := \frac{M \cdot b1^2}{w}$$

$$B = 59.2 \cdot \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

$$G := \frac{A^2}{2 \cdot B}$$

$$G = 1813.9 \text{ N}$$

Los resultados remarcados, pueden ser utilizados por extrapolación del modelo a otros vehículos Ford Fiesta modelo 2011 que se comercializan en nuestro país bajo la consideración de las siguientes hipótesis:

- a) *La masa del vehículo a analizar puede ser corregido según la masa del vehículo ensayado.*
- b) *Los materiales utilizados para la construcción del vehículo ensayado, son los mismos que se utilizan en las terminales de fabricación de otros países que donde también se fabrican este tipo de vehículo.*

3.2 Coeficientes de rigidez estandarizados

El método de McHenry para calcular los coeficientes de rigidez, no fue el único desarrollado. Existen otros métodos planteados por otros autores que presentan el mismo grado de consideración teórica para conocer dichos coeficientes. El desarrollo de los mismos excede el alcance de este libro introductorio al tema.

Por otro lado, McHenry introdujo mejoras a sus algoritmos en base a críticas de otros investigadores, que reformularon los algoritmos planteados inicialmente por este investigador.

El problema principal del algoritmo de McHenry en su CRASH, radicaba en el hecho de que estaba utilizando valores obtenidos de ensayos con vehículos muy antiguos y con el motor ubicado en forma longitudinal. Por tal motivo, este autor reformula sus algoritmos con la misma base empírica y presenta en el año 1986 una nueva versión de su programa, denominado CRASH3.

En el desarrollo de este tópico, otros programas hicieron su aparición para ser empleados en los procesos de reconstrucción a medida que la NHSTA, solventaba más ensayos controlados de colisión.

Los resultados de estos ensayos empezaron a ser empleados directamente en el desarrollo y producción de los programas de reconstrucción, bajo el concepto de "*generic vehicle data*", los valores de los coeficientes de rigidez empezaron a ser agrupados en categorías y clases, dado que vehículos de un mismo segmento presentaban un comportamiento similar en cuanto a las deformaciones según informaban los resultados de los ensayos.

Por tal motivo, los datos genéricos de vehículos utilizados en los algoritmos de reconstrucción, representaban las condiciones de dureza para grupos de vehículos según sus propiedades de diseño tales como batalla, masa, tipo de vehículo, etc.

En el año 1996 Donald E. Siddall y Terry D. Day [SAE 960897], realizaron una recopilación de más de 2000 ensayos y presentaron diversas tablas que contenían información de vehículos agrupados en clases y categorías.

Las clases se dividen en: vehículos turismos, pick-up, multipropósitos, vans y mini-vans.

A su vez cada clase de vehículo se subdivide en categorías, según la distancia entre eje delantero y trasero (batalla), y peso del vehículo.

Las distintas tablas publicadas en la SAE, se reproducen a continuación en unidades del Sistema Internacional para su mejor utilidad en nuestra región:

Categoría de los vehículos de pasajeros (Turismos) por valores de batalla				
Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5

Batalla = 2,05 – 2,41 m	Batalla = 2,41 – 2,58 m	Batalla = 2,58 – 2,80 m	Batalla = 2,8 – 2,98 m	Batalla = o mayores a 2,98 m
-------------------------	-------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------------

Tabla 4.1: categorías de vehículos de pasajeros.

Vehículos de pasajeros (Turismos)											
		Categoría 1		Categoría 2		Categoría 3		Categoría 4		Categoría 5	
Frontal											
A [N/cm]		315,67	77,91*	323,44	41,58*	361,88	69,58*	377,22	62,75*	505,64	78,47*
B [N/cm ²]		49,72	10,55*	45,08	23,99*	48,24	14,71*	45,99	18,91*	78,22	20,16*
G [N]		1002,1		1160,3		1357,3		1547,1		1634,3	
Trasero											
A [N/cm]		302,09	47,88*	284,28	33,78*	332,08	60,75*	325,74	5,73*	512,07	191,17*
B [N/cm ²]		37,51	11,76*	34,09	17,51*	35,69	13,64*	32,41	1,12*	95,15	71,71*
G [N]		1216,4		1185,3		1544,9		1636,9		1636,9	
Lateral											
A [N/cm]		154,55	42,36*	175,13	29,63*	167,68	34,34*	239,92	n/a	239,92	n/a
B [N/cm ²]		41,2	21,23*	45,64	28,12*	53,61	7,18*	65,5	n/a	65,5	n/a
G [N]		289,8		336,00		262,23		439,40		439,40	

Tabla 4.2: coeficientes de rigidez frontal, lateral y trasero para turismos.

(*) Desviación estándar.

Copiar este material

Categoría de las Pick-Up por valores de batalla	
Categoría 1	Categoría 2
Batalla menor a 2,896 m	Batalla mayor a 2,896 m

Tabla 4.3: categorías de pick-up

Categoría de los Multi-propósitos por valores de batalla

Categoría 1	Categoría 2
Batalla menor a 2,642 m	Batalla mayor a 2,642 m

Tabla 4.4: categorías para vehículo multi-propósito.

Categoría de las Vans por valores de batalla	
Categoría 1	Categoría 2
Batalla menor a 2,931 m	Batalla mayor a 2,931 m

Tabla 4.5: categorías para vehículos tipo Vans.

	Pick ups – Multipropósitos – Vans – Mini Vans										
	Pick ups				Multipropósitos				Vans/Mini Vans		
	Categoría 1		Categoría 2		Categoría 1		Categoría 2		Categoría 1		Categoría 2
Frontal											
A [N/cm]	465,98 55,99*	384,58 55,38*	465,98 55,99*	384,58 55,38*	465,98 55,99*	384,58 55,38*	541,14 156,9*	628,27 70,91*			
B [N/cm²]	75,1 18,14*	47,22 13,34*	75,1 18,14*	47,16 13,34*	75,1 18,14*	47,16 13,34*	93,08 52,62*	106,7 15,00*			
G [N]	1445,68	1566,24	1445,68	1568,07	1445,68	1568,07	1573,04	1849,74			
Trasero											
A [N/cm]	452,41 83,26*	509,04 85,20*	452,41 83,26*	509,04 85,2*	452,41 83,26*	509,04 85,2*	492,11 73,24*	546,4 132,68*			
B [N/cm²]	75,04 27,05*	84,81 28,67*	75,04 27,05*	84,81 28,67*	75,04 27,05*	84,81 28,67*	81,7 24,32*	97,72 42,6*			
G [N]	1363,82	1527,75	1363,82	1527,75	1363,82	1527,75	1482,01	1527,58			
Lateral											
A [N/cm]	180,38 5,73*	136,6 n/a	180,38 5,73	136,6 n/a	180,38 5,73	136,6 n/a	168,12 0,00	239,92 n/a			
B [N/cm²]	63,43 0,57*	27,58 n/a	63,43 0,57	27,58 n/a	63,43 0,57	27,58 n/a	52,4 0,00	65,5 n/a			
C [N]	256,47 n/a	338,29	256,47	338,29	256,47	338,29	269,7	439,41			

Tabla 4.6: coeficientes de rigidez frontal, lateral y trasero para pick-up, vans, mini-vans y multi-propósito.

(*) Desviación estándar.

4. PROTOCOLOS DE MEDICIÓN DE LAS DEFORMACIONES DE UN VEHÍCULO

Los métodos estandarizados para estimar la energía disipada en la deformación residual de vehículos, requieren además que las seis o cuatro medidas que solicita el método, puedan ser recolectadas bajo un mismo procedimiento.

De esta manera, los autores Nicholas Tumbas y Russell A. Smith [8], desarrollaron un protocolo para la toma de medidas de deformación aceptado por la SAE y publicado por este organismo en el año 1988.

El protocolo indicado detalla cinco (5) etapas para la realización de la toma de medidas, las que se sintetizan a continuación:

- a) *Determinación del frente de impacto o plano deformado.*
- b) *Medición de la anchura del frente o plano deformado.*
- c) *Altura de las mediciones.*
- d) *Determinación de la línea de referencia (LR).*
- e) *Toma de las medidas.*

Las operaciones que se describirán, requieren un mínimo de instrumentación sencilla. Aunque las mediciones también se pueden realizar con equipamientos más complejos como estación total y escáner láser; el equipamiento mínimo que se necesita se indica a continuación:

Cinta métrica de nailon.

Regla de madera,

Plomada y nivel de mano,

Líneas de nailon, estacas de madera o guías con apoyo.

Algunas modificaciones al protocolo original se indican a continuación, debido a que en nuestra región, las condiciones en las cual se deben realizar las tareas de mediciones son, con frecuencia, lugares y superficies poco útiles o incómodos, como terrenos irregulares con arbustos, etc.

4.1 Determinación del frente o plano de deformación

Si el daño está bien definido en el frente, costado o parte trasera del vehículo, no existirán dudas sobre la dirección de la fuerza deformante que actuó sobre la carrocería. Sin embargo, puede ocurrir que el daño presente una irregularidad tal que se duda sobre cuál es el frente del daño.

La Figura 4.17 puede presentar duda acerca si las medidas se toman desde el frente o desde el lateral.

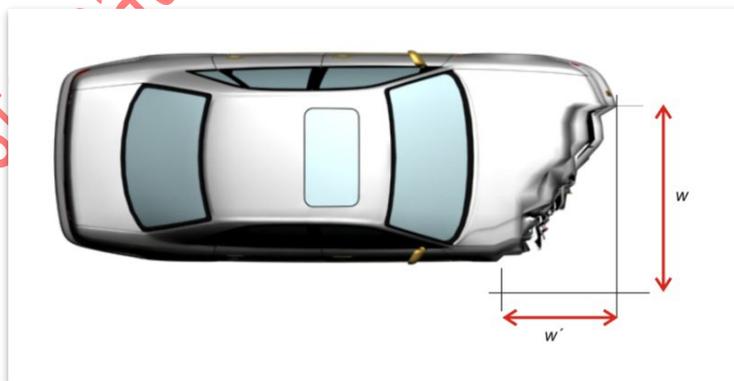


Figura 4.17: frente del daño irregular.

El criterio más sencillo recomendado consiste en medir ambos planos de deformación y verificar cual es el mayor para seleccionar el plano donde se realizarán las medidas correspondientes.

La medida del frente de deformación w es mayor a w' , y por lo tanto se escoge este plano para tomar las medidas de deformación.

También es importante tener presente que, el procedimiento de medición y aplicación del método exige por protocolo que por lo menos el 40% del frente del impacto se encuentre dañado.

4.2 Medición de la anchura del frente o plano deformado.

En el proceso de medir el ancho de la deformación " w " es necesario tener presente dos conceptos: *daño inducido* y *daño directo*.

El daño directo está determinado por el corrimiento de la carrocería dentro del plano o área propia de la misma, sin sobrepasar los límites de dicha carrocería.

El daño indirecto corresponde a las deformaciones de la carrocería del vehículo que se extiende más allá de los límites de la misma.

Las mediciones del ancho de la deformación deben, en todos los casos, discriminar los daños inducidos.

En el caso de una colisión frontal donde se sabe que la unidad impactó con todo su frente, el ancho de la deformación no puede ser mayor que el ancho estándar del vehículo.

La Figura 4.17 ilustra esta situación. La misma consideración es necesario tener presente si la colisión es en la parte trasera.

En las colisiones laterales, los daños inducidos son más difíciles de detectar, pero el criterio del ancho estándar del vehículo que impacta, resuelve inicialmente la determinación del ancho de deformación. Ver Figura 4.18 y 4.19.

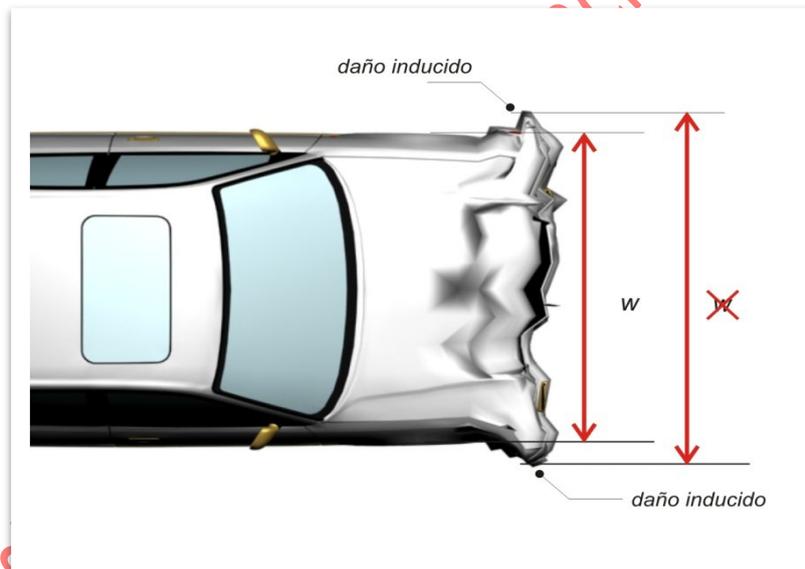


Figura 4.18: daño inducido y directo en la colisión frontal.

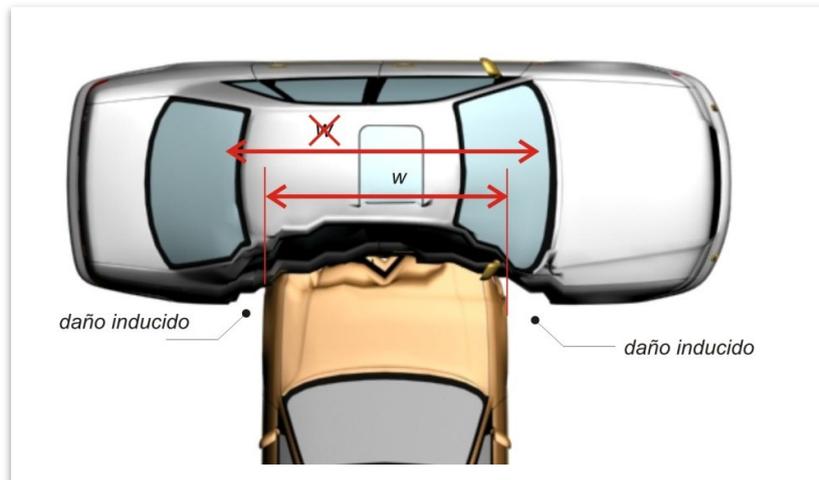


Figura 4.19: daño inducido y directo en la colisión lateral.

4.3 Altura de las mediciones

En todos los casos de deformaciones por colisiones frontales o traseras, las medidas se realizan a la altura del paragolpes o a la altura del larguero del chasis.

En el caso de las colisiones laterales, las mediciones se realizan a la altura del piso del vehículo o zócalo del mismo.

En el caso inicial, para colisiones frontales o traseras, puede suceder que la deformación varíe con la altura, ya sea que la estructura por arriba del paragolpe o larguero sea mayor o menor. En estos casos, el protocolo recomienda:

A] Si las mayores deformaciones se encuentran a la altura del paragolpe, se realizarán en este sector.

B] Si la diferencia entre las deformaciones superior e inferior es menor a 10 centímetros, se tomará como altura de deformación, las medidas obtenidas a la altura del paragolpes.

C] Si la diferencia entre las deformaciones superior e inferior es mayor a 10 centímetros, el protocolo recomienda realizar una ponderación midiendo arriba y abajo y calculando los promedios correspondientes.

D] Si en la colisión no afecto a elementos estructurales del larguero del vehículo, su travesía o puente de motor; y solo se han deformado elementos blandos como, por ejemplo, capó, radiador, parrilla frontal; se recomienda no aplicar el método.

4.4 Construcción de la línea de referencia (LR)

Si la colisión se realizó en el frente, costado o parte posterior; la carrocería se encontrará desplazada por lo tanto no será posible establecer cuál era la posición inicial del frente deformado. Por tal motivo es necesario determinar una línea de referencia a partir del cual se tomarán las medidas de penetración. En todos los casos, dicha línea debe ser medida desde alguna referencia no dañada del vehículo.

Para las colisiones frontales, la línea de referencia (LR), se toma desde el eje trasero siempre que éste no se encuentre corrido. Para ello con una cinta de nailon se mide desde el centro de la rueda trasera hasta un punto arbitrario, tal como se ilustra en la Figura 4.20 y 4.21.

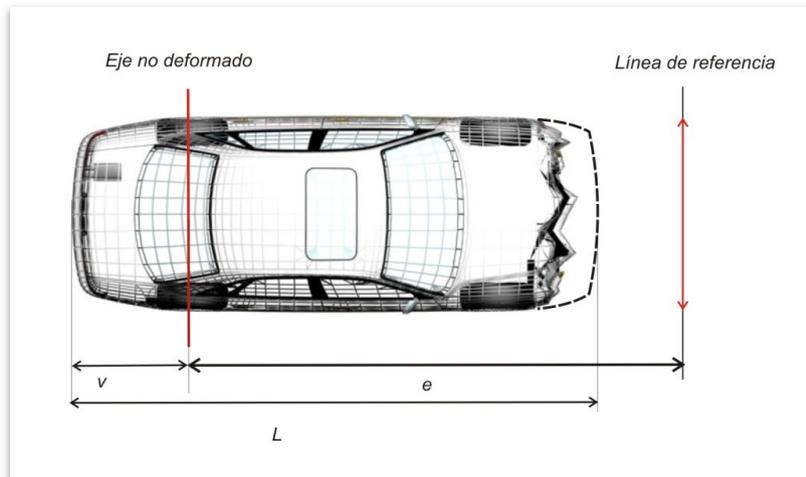


Figura 4.20: LR para colisiones frontales.

Las medidas a tener presente son:

L: largo total del vehículo sin deformar, obtenida de las fichas técnicas,

e: distancia arbitraria a la línea de referencia,

v: voladizo desde el eje trasero al límite posterior del vehículo,

A: ancho estándar del vehículo.



Figura 4.21: construcción de la LR con una cinta métrica de nailon sobre superficie firme.

Si la deformación se registrara sobre el lateral del vehículo, el criterio de establecer la línea de referencia es la misma: estableciendo una medida arbitraria desde un punto de la carrocería no afectada.

Si el automóvil no presenta arqueamientos, la medida para establecer la línea de referencia puede ser tomada desde la línea tangente al costado opuesto del lado deformado, tal como se ilustra en la Figura 4.22.

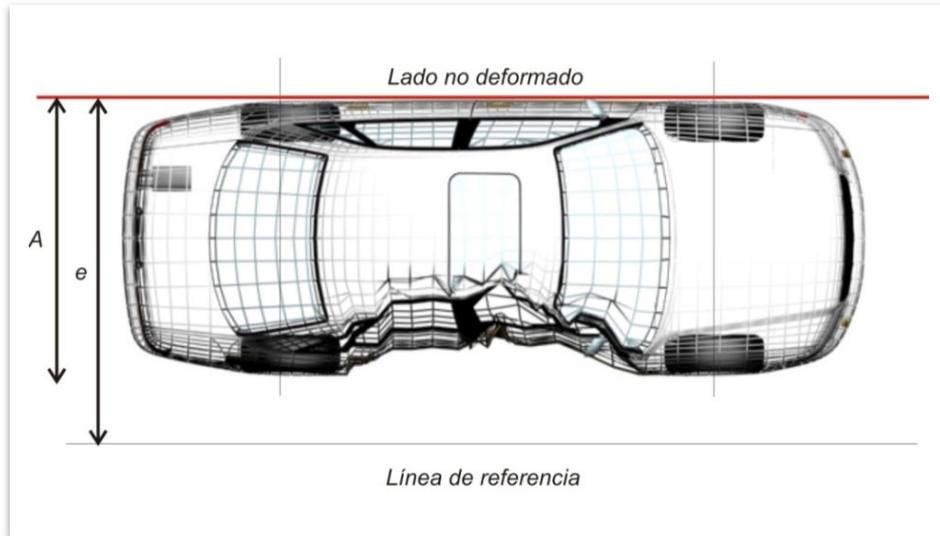


Figura 4.22: fijación de la LR en colisiones laterales.

Si el vehículo presenta un arqueamiento importante en su carrocería, o el eje trasero también presente un corrimiento, las líneas de referencia no podrán establecerse de la forma indicada y el perito o reconstructor deberá buscar otros puntos de la carrocería no afectados por la colisión a partir del cual realizar la fijación de la LR.

En los casos de vehículos muy deformados, se deberá recurrir a fotografías aéreas para montaje sobre planos a escala del vehículo.

4.5 Toma de las medidas

La toma de las medidas se planifican en principio, en función de las condiciones donde se encuentra el vehículo a medir. Fundamentalmente en relación al tipo de superficie, dado que las bibliografías americanas no plantean la posibilidad de que el vehículo deformado, pueda hallarse depositado en un terreno irregular.

De acuerdo al protocolo, la medida de deformación debe tomarse desde la prolongación del daño a la superficie, hasta la línea de referencia tal como se ilustra en la Figura 4.23. La proyección del daño sobre la superficie se realiza con una plomada teniendo presente además que en dicha proyección debe evadirse los restos livianos de carrocería que pudieran entorpecer la operación.

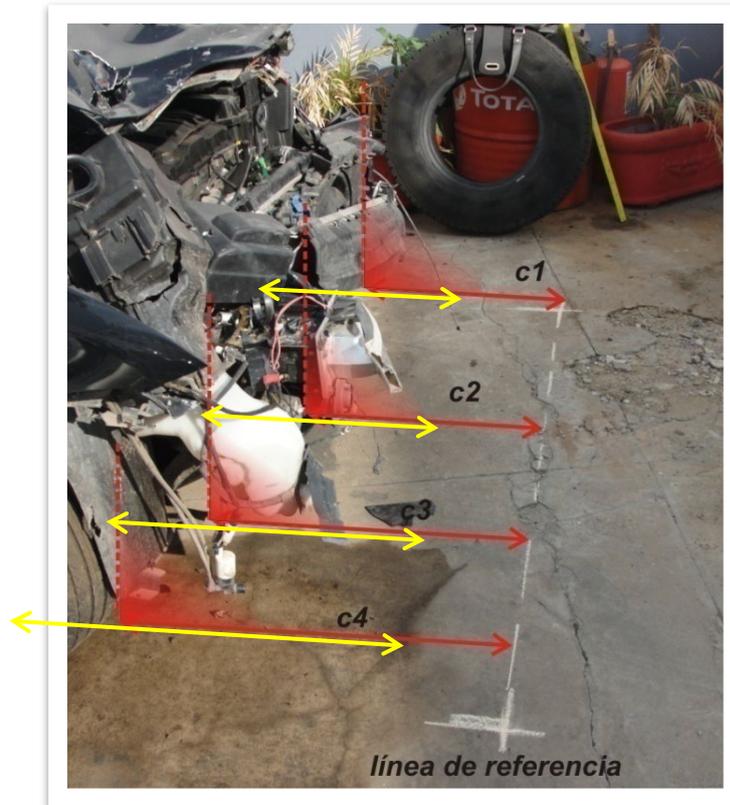


Figura 4.23: medidas de deformación con proyección de los daños sobre la superficie.

No obstante, es muy frecuente que en nuestra región los vehículos a medir se encuentren en corralones o depósitos donde la superficie no es regular.

La Figura 4.24 ilustra la situación frecuente donde el vehículo se encuentra sobre un terreno irregular.

En dichos casos, en base a experiencias del autor, se recomienda elevar el plano de medición utilizando para ello líneas de nailon sujetadas desde el eje trasero del vehículo que pasen por dos estacas firmes ubicadas a plomo en una misma distancia arbitraria del eje trasero. La línea de nailon deberá quedar a la altura determinada sobre la cual se harán las mediciones.



Figura 4.24: formación de la línea de referencia sobre un terreno irregular.

Una vez formada la línea de referencia se procede a realizar las medidas empleando una regla firma de plástico o madera nivelada desde el punto de deformación hasta la línea de referencia.

4.5.1 Consideraciones sobre las medidas tomadas

Si el frente del daño no es regular se deberán tomar seis medidas equidistantes entre sí. Una vez determinado el ancho de la deformación, se divide por 5 y se procede a tomar las medidas empezando desde el extremo izquierdo.

Si el frente del daño no fuera tan irregular a criterio del perito o reconstructor, podrá realizar 4 medidas o 2. En el caso de que fueran 4, el ancho de deformación se dividirá por 3 para conocer la distancia entre cada medida.

Finalmente, las medidas tomadas desde la línea de referencia no serán las que se introduce en las ecuaciones 4.55, 4.56 y 4.57, dado que deben ser corregidas debido a la arbitrariedad de la línea de referencia escogida.

Tal como se ilustra en la Figura 4.25, el perito o reconstructor también debe fijar las medias v (*voladizo*), L (*largo estándar del vehículo*).

De esta manera las medidas serán corregidas con la siguiente fórmula:

$$c' = e - (L - v) \quad \text{Ec 4.67}$$

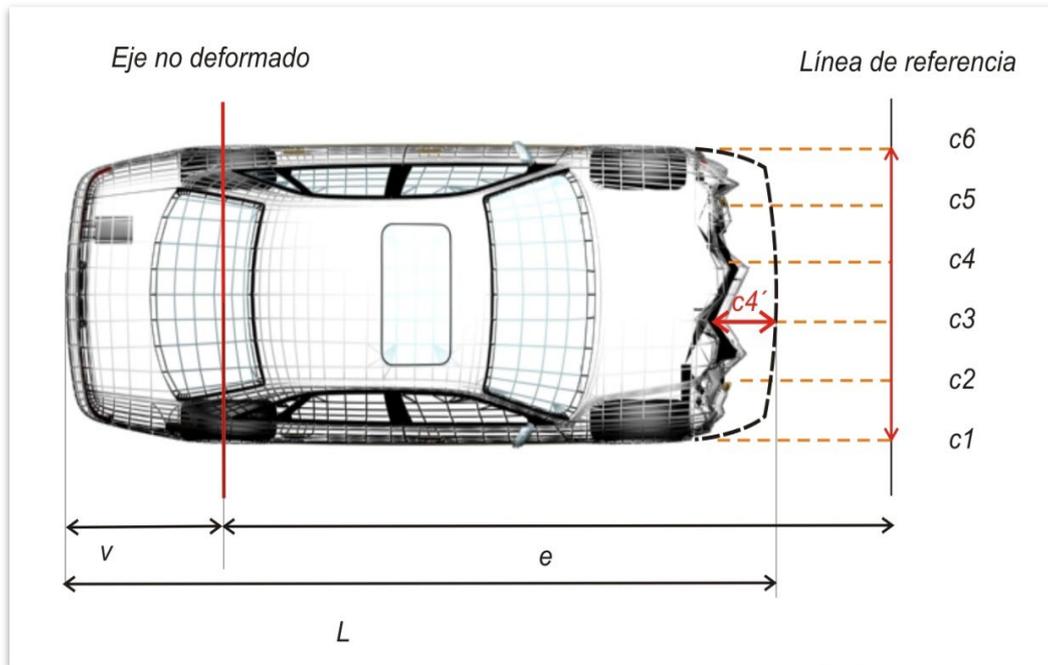


Figura 4.25: medidas a realizar para las deformaciones.

Igual criterio se realizará si las mediciones se realizan para una colisión trasera o lateral.

Uso de la plantillas P.C.D.

Adjunto al presente libro, usted puede reclamar la Plantilla de Cálculo de Deformación.

Dado que las ecuaciones 4.55, 4.56 y 4.57, son extensas y pueden ocasionar errores en su operación utilizando simples calculadoras, se ha diseñado una plantilla en formato Excel 2007 ©, para ayuda del perito o reconstructor.

En dicha plantilla, el perito puede escoger los coeficientes de rigidez directamente de la hoja correspondiente y copiarlos a la ecuación escogida en función también, de la cantidad de medidas de deformación que disponga.

Debe tener presente además, que las medidas insertadas son las que resultan de la corrección previa explicada en el punto anterior.

La Figura 4.26, muestra la pantalla de trabajo de esta plantilla.

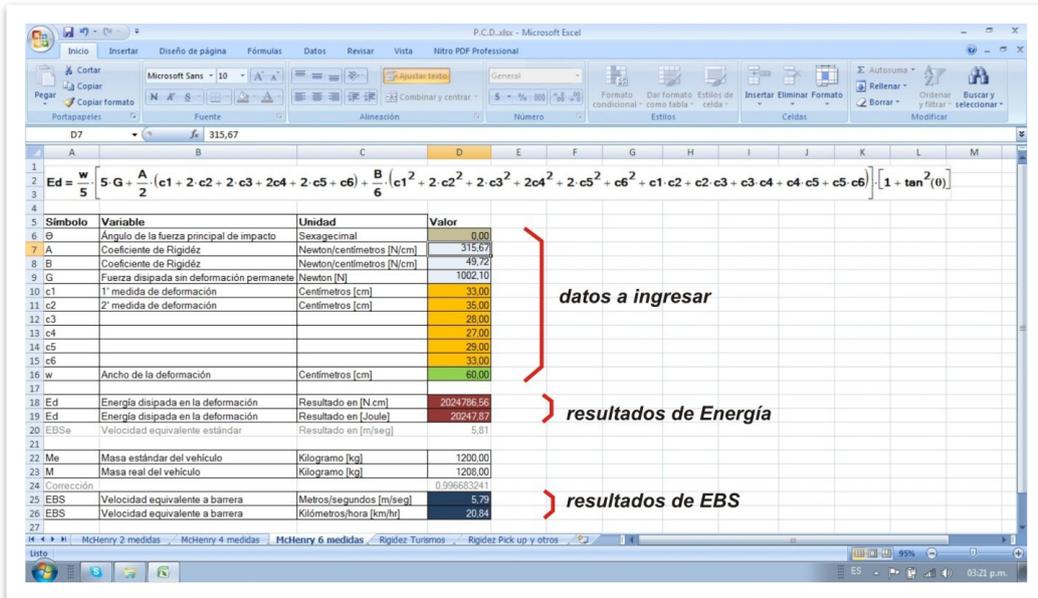


Figura 4.26: aspecto de la Plantilla de Cálculo de Deformación.

La plantilla solo permite ingresar datos en cierta celdas correspondiente a la información solicitada por le ecuación escogida.

Otras celdas, muestran los resultados de energía dispada estimada en unidades de Newton por centímetro y Joule.

También la plantilla facilita el cálculo del EBS con su correspondiente corrección de masa.

Copiar este material sin autorización es un DELITO