

TÍTULO: Técnicas avanzadas en la reconstrucción de accidentes de tráfico

AUTOR: Vicente Díaz López

DIRECCIÓN: Avd. de la Universidad, 30. 28911. Leganés (Madrid). España

INSTITUCIÓN: Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid

NIF: 50415063Y

TELÉFONO: 916249493

FAX: 916249465

E-MAIL: vdiaz@ing.uc3m.es

SITUACIÓN LABORAL: Catedrático en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid. Director del Instituto de Seguridad de Vehículos Automóviles (ISVA)

AUTOR: José Luis San Román

DIRECCIÓN: Avd. de la Universidad, 30. 28911. Leganés (Madrid). España

INSTITUCIÓN: Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid

NIF: 50066883T

TELÉFONO: 916249185

FAX: 916249465

E-MAIL: jlsanro@ing.uc3m.es

SITUACIÓN LABORAL:

AUTOR: Beatriz López Boada

DIRECCIÓN: Avd. de la Universidad, 30. 28911. Leganés (Madrid). España

INSTITUCIÓN: Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid

NIF: 51061039G

TELÉFONO: 916249168

FAX: 916249430

E-MAIL: bboada@ing.uc3m.es

SITUACIÓN LABORAL: Ayudante Doctor en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid

AUTOR: M^a Jesús López Boada

DIRECCIÓN: Avd. de la Universidad, 30. 28911. Leganés (Madrid). España

INSTITUCIÓN: Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid

NIF: 51061040M

TELÉFONO: 916249168

FAX: 916249430

E-MAIL: mjboada@ing.uc3m.es

SITUACIÓN LABORAL: Ayudante Doctor en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid

Técnicas Avanzadas en la Reconstrucción de Accidentes de Tráfico

Prof. Dr. D. Vicente Díaz

Catedrático en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid
Director del Instituto de Seguridad de los Vehículos Automóviles (ISVA)

Prof. Dr. D. José Luis San Román

Catedrático en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid
Subdirector del Instituto de Seguridad de los Vehículos Automóviles (ISVA)

Prof. Dra. Dña. Beatriz L. Boada

Ayudante Doctor en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid

Prof. Dra. Dña. M^a Jesús L. Boada

Ayudante Doctor en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid

Introducción

La Reconstrucción de un Accidente de Tráfico (RAT) se basa en determinar cómo se ha producido un accidente a partir de la información disponible (MAKISHITA, 1991). El alcance de esta reconstrucción depende de la cantidad y calidad de los datos recogidos. Generalmente, no se dispone de la suficiente información para llegar a una única conclusión, por lo que es necesario utilizar tanto los conocimientos físicos como los conocimientos obtenidos de la experiencia.

Para llevar a cabo una buena reconstrucción del accidente es necesario resolver un número elevado de ecuaciones complejas. La llegada del PC ha permitido que todas estas ecuaciones se resuelvan de una manera más fácil que, de otro modo, hubiera sido inviable al requerir un tiempo o una capacidad de procesamiento elevados. Muchos programas informáticos han sido desarrollados especialmente para la RAT. Ellos permiten el cálculo del movimiento del vehículo y de las colisiones basándose en varios modelos físicos.

Clasificación de los programas informáticos utilizados en la RAT

Con la introducción de los ordenadores personales en los años 80, se han podido desarrollar programas informáticos que son empleados para analizar y estudiar los accidentes de tráfico. Cuando estos programas informáticos son usados adecuadamente, ellos son una herramienta de investigación de un valor. Sin embargo, una mala utilización de los mismos puede producir

errores en los resultados proporcionados y, por tanto, pueden provocar que se obtengan unas conclusiones falsas de lo que ha ocurrido realmente en el accidente.

En la actualidad, los programas informáticos, utilizados en la investigación de accidentes de tráfico, se pueden clasificar en cinco grandes grupos (DAY, 1987): 1) Programas de análisis general. 2) Programas basados en la dinámica del vehículo. 3) Programas basados en la dinámica del impacto. 4) Programas basados en la dinámica humana. 5) Programas basados en la fotogrametría.

Programas de análisis general

Los programas de análisis general realizan tanto cálculos cinemáticos (posición, velocidad y aceleración en función del tiempo), como cálculos basados en la conservación de la energía y la conservación del momento. Estos programas usan la dinámica de una partícula, es decir, consideran al vehículo como una masa puntual. Además, consideran generalmente que la aceleración es constante. La primera razón para utilizar este tipo de programas es su capacidad para llevar a cabo los cálculos de una manera rápida proporcionando unos resultados con una precisión aceptable.

Dentro de este grupo se encuentran programas como: BLAQQ BOXX, C.A.A. System, A-I-CALC, C.A.R.S., COLLIDE y CAR.

Programas basados en la dinámica del vehículo

Los programas de análisis vehicular son utilizados para estudiar el comportamiento de vehículo cuando está acelerando, frenando y haciendo maniobras de giro. Los investigadores de accidentes de tráfico pueden utilizar estos programas para ganar perspectiva de si el conductor ha perdido el control de su vehículo como resultado de circular a una velocidad excesiva, o por el hecho de frenar, o cualquier otro error producido por el conductor. Estos programas también pueden ser utilizados para estudiar el comportamiento general de un vehículo debido a cambios en el coeficiente de rozamiento, distribución de pesos, dimensión del vehículo u otros parámetros. Una aplicación adicional de estos programas es el análisis de la fase de post-impacto de una colisión, calculando las velocidades de separación.

El problema de este tipo de programas, al igual que otros muchos, es que una simple simulación no puede ser usada para explicar lo que ha ocurrido realmente. Se tienen que llevar a cabo muchas simulaciones, cambiando los parámetros que son desconocidos o que han sido estimados, para mostrar un rango de posibles soluciones.

Algunos programas de análisis vehicular son: SMAC, EDSVS, EDVTS, EDVSM, EDVDS, HVOSM. Estos programas varían en su nivel de sofisticación.

Programas basados en la dinámica de impacto

Los programas basados en la dinámica del impacto son usados para estudiar los accidentes cuando éstos se producen tanto por colisión entre vehículo-vehículo como por colisión entre vehículo-barrera. El primer objetivo de estos programas es estimar la velocidad de impacto y el Delta-V. Aunque estos modelos se concentran sobre todo en la fase de impacto, algunos de ellos también analizan las fases de pre-impacto y post-impacto.

El Delta-V se define como el cambio de velocidad que experimenta un vehículo durante la fase de colisión en un choque entre dos vehículos a motor, es decir, desde el momento de contacto inicial entre los dos vehículos hasta el momento de su separación (DAY, 1987). El Delta-V se utiliza, además de para conocer el comportamiento de los vehículos antes, durante y después de la colisión, como un indicador de la severidad del impacto debido a que da una idea de la velocidad de la *segunda colisión* (colisión entre los ocupantes y el interior del vehículo) y, por lo tanto, de los daños que pueden sufrir los ocupantes del vehículo.

Existen dos métodos que permiten determinar el Delta-V de dos vehículos implicados en una colisión (BRACH, 1998): 1) Técnica de Reconstrucción de Accidentes basada en el Daño (*Damage Approach*) y 2) Técnica de Reconstrucción de Accidentes basada en la Trayectoria (*Trrajjectory-based Approach*). Los programas informáticos que permiten calcular la Delta-V emplean uno o ambos métodos.

Al igual que otras técnicas de reconstrucción de accidentes, los programas basados en la dinámica del impacto requieren una gran cantidad de datos, tanto del lugar del accidente como del vehículo. Algunos de estos datos son medidos y otros son estimados. Los datos que típicamente tienen que ser estimados son generalmente la posición de impacto, el ángulo del vehículo y el de deslizamiento, camino seguido por el vehículo desde el impacto hasta la posición de reposo, frenada en la rueda, y algunos tipos de datos de daños. La mala interpretación de estos datos siempre afecta a los resultados en más o menos grado. El investigador debe interpretar los datos correctamente.

Programas basados en la dinámica del impacto son: CRASH, SMAC, PC-CRASH, RECONSTRUCTOR-98 y SINRAT.

Programas basados en la dinámica humana

Los investigadores de accidente de tráfico pueden utilizar los programas basados en la dinámica humana para determinar cómo los ocupantes de un vehículo y peatones se lesionan durante un impacto. Los estudios sobre lesiones incluyen los efectos del diseño del interior, el uso o no uso de sistema de retención, y el efecto del reposacabezas. Para colisiones con peatones, los simuladores de impactos de humanos pueden ser usados para estimar la distancia a la que son desplazados a una velocidad dada en relación al diseño exterior del vehículo.

Otras de las aplicaciones de estos programas es la de determinar qué ocupante era el conductor del vehículo en accidentes complejos donde el vehículo da vueltas de campana basándose en las posiciones finales de las víctimas dentro del vehículo.

Los programas basados en la dinámica humana tienen una característica común con todas las simulaciones: ellos generalmente no proporcionan una única solución. De esta manera, su uso debería estar limitado a estudios de diseño de parámetros e ilustraciones generales de mecanismos de generación de lesiones para la reconstrucción forense de accidentes.

Programas basados en la dinámica humana son: MVMA-2D, CVS/ATB-3D, EDHIS y MADYMO.

Programas basados en la fotogrametría

Los programas basados en fotogrametría son utilizados para posicionar información a partir de fotografías tomadas en el lugar del accidente. Esta información puede ser marcas de neumáticos, restos de vehículos, posición de reposo de vehículos, etc. De tal manera que, para usar este tipo de programas es necesario disponer de buenas fotografías. El investigador debe emparejar las coordenadas X,Y de cuatro puntos de la escena del accidente con cuatro puntos visibles en la fotografía. Estos cuatro puntos, llamados puntos de calibración, deben ser seleccionados cuidadosamente para proporcionar datos precisos.

La precisión de estos programas se reduce cuanto más lejos esté la localización de interés. El efecto de la pérdida de precisión debería ser incluida en el análisis usando un rango de valores para una localización específica. Si fuera necesario, se deberían usar fotografías adicionales.

Programas basados en la fotogrametría son: TRANS4, FOTOGRAM, AICALC, EDCAD, iWitness, PhotoModeler y PC-RECT.

Características de los programas de RAT más utilizados

Programas basados en la dinámica del vehículo

EDSVS (*Engineering Dynamics Single Vehicle Simulator*): es un programa de simulación para el análisis de la respuesta de un vehículo de motor (automóvil de 4 ruedas o camión con ejes en tandem y neumáticos dobles) a las acciones del conductor, como son las que se realizan sobre los sistemas de dirección y de frenos (MONCARTZ, 1975).

Las hipótesis consideradas por EDSVS son:

- No se permiten vuelcos.
- El análisis es válido mientras las ruedas están en contacto con el suelo. En el momento en que las ruedas despegan del suelo, el cálculo se para.
- No se consideran efectos de suspensión sobre las ruedas. Se supone que permanecen verticales en todo momento.
- Todas las fuerzas externas se consideran aplicadas en los neumáticos. Se ignoran los efectos aerodinámicos.
- Considera que la pendiente del terreno es inferior a 15°.

EDVTS (*Engineering Dynamics Corporation Vehicle Trailer Simulator*): es un programa para la simulación de la respuesta de un sistema de vehículo trailer (tractor semirremolque o automóvil remolque) a la frenada y giros de volante de vehículos articulados de 4 grados de libertad (FANCHER, 1986).

Se puede considerar que EDVTS es un análisis similar al de EDSVS para vehículos articulados, tanto para un vehículo estándar arrastrando un remolque como para un trailer o un tractor-trailer. En este caso, se añade un grado de libertad que es el giro de la parte articulada con respecto a la parte tractora.

Las hipótesis consideradas por EDVTS son las mismas que para EDVSV.

HVOSM (*Highway Vehicle Object Simulation Model*): En los años 60 *Calspan Corporation* desarrolló un modelo matemático, al que denominó HVOSM, que era capaz de generar los movimientos tridimensionales resultantes tanto de las distintas acciones de control introducidas por el conductor, como de los efectos de atravesar ciertas irregularidades del terreno o de chocar contra ciertos tipos de obstáculos de la vía (MC-HENRY, 1987).

El modelo matemático HVOSM consta de 15 grados de libertad; 6 para la masa suspendida y hasta 9 para la masa no suspendida. El modelo matemático está basado en las leyes

fundamentales de la física (Dinámica Newtoniana del Sólido Rígido) combinadas con relaciones empíricas derivadas de ensayos experimentales (p.e., características de los neumáticos y suspensión, propiedades de la deformación bajo carga de la estructura de un vehículo). El equilibrio de las fuerzas aplicadas a los componentes del sistema se define como un conjunto de ecuaciones diferenciales que constituyen el modelo matemático del sistema.

Actualmente, *McHenry Software* ha desarrollado la versión comercializada m-HVOSM, versión totalmente equivalente del programa original capaz de correr bajo Windows.

EDVSM (*Engineering Dynamics Vehicle Simulation Model*): es un programa de análisis tridimensional de la respuesta de un vehículo a las entradas del conductor (dirección, gases, frenos y selección de marchas) que está basado en HVOSM (DAY, 1997).

EDVSM calcula la cinemática del vehículo (posición, velocidad y aceleración en función del tiempo) a partir de las fuerzas aerodinámicas, de las fuerzas que actúan sobre los neumáticos, y partir de las dimensiones del vehículo. Con EDVSM se puede predecir y visualizar la respuesta del vehículo dependiendo de la actuación del conductor, siendo especialmente útil para analizar maniobras con resultado de pérdida de control y vuelcos.

El modelo de EDVSM es totalmente tridimensional. Incluye suspensión delantera y trasera, y modela los sistemas de suspensión independiente y de eje rígido. Tiene 14 grados de libertad: 6 para la masa suspendida (x , y , z , cabeceo, balanceo y guiñada para el cuerpo del automóvil) y dos grados de libertad para cada masa no suspendida (rotación de las ruedas y rebote/estiramiento de la suspensión en cada una).

EDVSM incluye modelos detallados de los sistemas de frenos para permitir el estudio de las características del sistema de freno y su comportamiento en maniobras de conducción bruscas, como la evasión en un accidente. Por otra parte, este programa puede simular un vehículo circulando prácticamente por cualquier superficie.

EDVDS (*Engineering Dynamics Vehicle Dynamics Simulator*): es un programa de simulación 3D de la respuesta dinámica de un camión a las entradas del conductor y a las condiciones tridimensionales de la carretera. EDVDS es una versión extendida del programa PHASE 4 (MAC-ADAM, 1980).

Los ingenieros de diseño de vehículos e investigadores de seguridad usan EDVDS para realizar estudios detallados sobre la controlabilidad o capacidad de manejo de un camión en determinadas circunstancias; problemas relativos al factor humano (acciones del conductor y velocidad), relativos al factor vehículo (diseño del sistema de frenos y suspensión, condiciones de carga, y propiedades del neumático), y los relativos al factor entorno (circulación por pendientes y ante condiciones deslizantes de la carretera).

EDVDS emplea modelos tridimensionales de hasta 23 grados de libertad para cada vehículo. El programa soporta vehículos de hasta 4 ejes, con suspensión de ejes tipo tandem o solidarios, con transferencia de carga inter-tandem, y con una o dos ruedas. Se conectan los vehículos usando conexiones de tipo fijo y/o convertoras con barras estabilizadoras rígidas o articuladas.

Se suprime la hipótesis de ángulo pequeño de PHASE 4 permitiéndose la simulación completa de vuelco de vehículos. Además, otra extensión de EDVDS es que incluye un modelo *drivetrain* o de la transmisión que permite introducir parámetros del motor, de la caja de cambios y del grupo diferencial. La interacción neumático calzada es modelada de manera totalmente transparente para el usuario.

Programas basados en la dinámica del impacto

CRASH (*Calspan Reconstruction of Automobile Speeds on the Highway*): En 1975 McHenry presentó la versión original de CRASH (DAY, 1987). Inicialmente CRASH se diseñó para lograr uniformidad en la interpretación de evidencias físicas de los accidentes automovilísticos. En particular, se cree que los cambios en la velocidad, Delta-V, y en su dirección son los mejores indicadores de la severidad a la que están expuestos los ocupantes del vehículo.

En 1976 McHenry y Linch modificaron el programa CRASH para incorporar una rutina de simulación de trayectoria que permitiera la comprobación automática y el refinamiento de las estimaciones de CRASH acerca de las velocidades de separación. La versión modificada de CRASH se llamó CRASH2. El programa CRASH2 se volvió más eficaz, poderoso y amistoso que CRASH. En 1981 Jones y Jennings observaron que, en Europa, las características de los accidentes eran muy diferentes a la de los Estados Unidos, de tal manera que, si CRASH2 no fuera modificado tendría un uso muy limitado. Para mejorar la exactitud de la reconstrucción de CRASH2 para las dimensiones de los vehículos europeos, se reemplazaron los coeficientes de rigidez usados en la rutina de análisis de daño adecuándoles para las categorías de los vehículos utilizados en Europa. Los nuevos coeficientes mostraron una mejora significativa en la exactitud de casos individuales. También se agregaron al programa medios para valorar la guiñada del vehículo en el impacto.

En los inicios de 1981, apareció una versión actualizada de CRASH2 a la que se la denominó CRASH3 y, desde entonces, ha sido el programa de reconstrucción de uso más extendido en los Estados Unidos. Desde 1981 se han sugerido diversas modificaciones en CRASH3 para hacerlo más exacto, eficaz y amigable desde el punto de vista del usuario.

CRASH es un programa de reconstrucción de accidentes para colisiones en los que están implicados uno o dos vehículos. Es un análisis de 3 grados de libertad que no toma en cuenta los efectos de la suspensión de los vehículos. Cubre las fases de impacto y post-impacto del

accidente. La fase de post-impacto se analiza empleando métodos de energía, con extensiones que contemplan los efectos de rotación del vehículo y la curvatura de las trayectorias.

Las hipótesis consideradas por CRASH son:

- Superficie horizontal y lisa.
- No se considera transferencia de carga durante los procesos aceleración-desaceleración.
- No se consideran los efectos de la suspensión.
- No se consideran actuaciones del conductor (aceleración y frenando) y no hay conducción activa.
- Resistencia a compresión exterior lineal.
- Uniformidad vertical del perfil de daño.
- Ningún golpe fuerte lateral.
- Fuerzas en el neumático despreciables durante impacto.
- Datos predefinidos del vehículo procedentes de un vehículo tipo (algunos programas).
- Restitución despreciable, se desprecia la recuperación elástica de la estructura.
- CRASH3 asume que en las trayectorias post-colisión los vehículos presentan resistencias de rodadura constantes.
- CRASH3 asume que en algún momento durante el impacto, el punto de contacto entre ambos vehículos alcanza una velocidad común. Hay ciertas situaciones, en las que existe un deslizamiento lateral considerable, en las que un análisis de CRASH3 no dará resultados muy fiables.
- CRASH3 mantiene las tablas de propiedades que dividen el parque de los vehículos en categorías discretas.
- CRASH3 asume una rigidez a compresión uniforme para el lateral, el frontal y la parte trasera de un vehículo. Obviamente la noción de uniformidad no tiene en cuenta el hecho de que un lado del vehículo es bastante rígido cerca de los nervios del chasis y bastante menos cerca de las puertas.

La medida en la que cada una de estas hipótesis afecta a los resultados debe evaluarse en cada caso particular. Por lo que, en cada caso debe realizarse un análisis de sensibilidad, variando los parámetros, para determinar el efecto sobre los resultados y para identificar aquella información, que variando ligeramente, afecta gravemente a los resultados.

m-crash (McHenry Crash Reconstruction of Accident Speeds on the Highway): El programa m-crash consiste en una versión ampliada y mejorada, por McHenry, del programa CRASH3 con el objetivo de aumentar significativamente la fiabilidad y exactitud de los resultados. A continuación, se muestran las ampliaciones y mejoras que han sido incorporadas en el programa m-crash en relación a CRASH3:

- Se ha implementado el principio de conservación del momento angular, junto con la conservación del momento lineal existente.
- Los efectos de cambios en las posiciones y orientaciones de los vehículos individuales durante la colisión son aproximados e incluidos en el procedimiento de la solución.
- Los cambios de velocidad de impacto, o valores del Delta-V, se calculan por rotación de marcos de referencia.
- Se han hecho correcciones y refinamientos en cálculos relacionados con la obtención del punto de velocidad común.
- Se han incorporado, en el procedimiento de análisis de daño, los efectos de restitución de las estructuras.
- Los efectos de las fuerzas y momentos externos, que actúan sobre el sistema de los dos cuerpos durante la colisión, son aproximados e incluidos en el procedimiento del cálculo.
- Se han incorporado varios chequeos internos de compatibilidad de diferentes aspectos de la reconstrucción.
- En casos donde se encuentran diferencias significativas entre los resultados del análisis de trayectoria y el análisis de daño, puede usarse un procedimiento opcional de optimización para lograr una solución de compromiso mejor.

EDCRASH (Engineering Dynamics Corporation Reconstruction of Accident Speeds on the Highway): es un programa basado completamente en CRASH. EDCRASH es un modelo matemático de reconstrucción de accidentes de tráfico con uno o dos vehículos implicados basado en la conservación del momento lineal y en el análisis de los daños sufridos en la colisión.

Se trata de un análisis de 3 grados de libertad que ignora los efectos de la suspensión. El programa determina las condiciones de colisión, incluyendo la velocidad de los vehículos en el momento del impacto y la gravedad del mismo, utilizando información obtenida de los vehículos y de estudios de accidentes (crash tests, etc.). EDCRASH analiza las tres fases de una colisión: pre-impacto, impacto y post-impacto.

Las hipótesis consideradas por EDCRASH son:

- El análisis es de tres grados de libertad (la colisión ocurre en un plano horizontal).
- El análisis de daños asume que hay una relación lineal entre los daños en los vehículos y la fuerza que los ha causado.
- Para el análisis basado en daños, EDCRASH asume que se alcanza una velocidad común en el centroide del área de daño. Esto hace que no se puedan analizar accidentes con colisiones laterales.
- Se supone que la distribución del daño es homogénea y, por tanto, que el impulso está localizado en el centroide del área de daño.
- La duración de una colisión no es instantánea y, por tanto, la dirección de los ángulos de impacto no es la misma que la dirección de los ángulos de separación.
- EDCRASH desprecia las fuerzas que actúan en los neumáticos durante la fase de impacto (esto no se cumple en pequeños impactos, impactos laterales e impactos con grandes camiones).
- EDCRASH usa el modelo de neumáticos Fiala.

SMAC (*Simulation Model of Accident Collision*): A principios de los 70, NHTSA esponsorizó el proyecto de investigación para el desarrollo de un programa de ordenador que proporcionara mejoras en la uniformidad, así como también, mejoras en la precisión, el detalle y la interpretación de las evidencias físicas de un accidente. El prototipo resultante fue SMAC (NEPTUNE, 1998). En 1986, Day&Hargens crearon EDSMAC, que no es más que una versión para PC escrita en Basic del programa *NHTSA SMAC program* de 1974, salvo mínimas modificaciones y habiendo sido centrado todo el esfuerzo en el entorno gráfico (DAY, 1988).

En 1994, se desarrolló EDSMAC4 para incluir un modelo más realista del comportamiento estructural del vehículo actual basado en un modelo de rigidez A, B. Los choques entre vehículos a motor no son completamente plásticos, tienen restitución. La restitución se compone de 2 aspectos separados: 1) Una recuperación parcial de la dimensión y 2) una restauración parcial de la energía cinética.

Las versiones actuales de SMAC para PC son: EDSMAC (y versiones), WinSMAC y m-smac. En todos estos programas no se han hecho ninguna mejora significativas con respecto a la versión inicial de SMAC. La ventaja que presentan es que permiten trabajar en un entorno Windows.

En el programa original de SMAC, las hipótesis hechas en el cálculo de la fuerza de la colisión son:

- Los vehículos se tratan como sólidos rígidos, cada uno rodeado por una capa de material isotrópico y homogéneo que exhibe un comportamiento elastoplástico.
- La presión dinámica en la línea periférica aumenta linealmente con la profundidad de la penetración en relación al contorno inicial de la superficie deformada.
- El valor (ajustable y no lineal) del coeficiente de restitución varía como función de la máxima deformación.
- Los movimientos del vehículo se limitan a un plano horizontal en el que se descuidan los efectos de cabeceo y balanceo.

Las hipótesis hechas en el cálculo de las fuerzas en el neumático son:

- Los movimientos del vehículo se limitan a un plano horizontal en el que pueden desprejarse los efectos de cabeceo y balanceo.
- La superficie del terreno es llana y horizontal.
- Los efectos del alabeo y del balanceo en las ruedas se desprecian.
- El concepto de círculo de fricción aproxima las interacciones entre las fuerzas circunferenciales y laterales en los neumáticos.
- Los cambios en el coeficiente fricción neumático-suelo que ocurren entre dos zonas del terreno son lineales.
- El coeficiente de fricción neumático-suelo disminuye linealmente con el incremento de las velocidades resultantes de los centros de la rueda (opción).

Otras hipótesis incluidas son:

- No se consideran transferencias de carga durante los procesos de aceleración-desaceleración.
- Resistencia de la compresión exterior lineal.
- Uniformidad vertical del perfil de daño.

PC-CRASH: PC-CRASH es un programa de reconstrucción de colisiones basado en el momento, y, por tanto, no está basado en el programa CRASH. PC-CRASH es un programa para la simulación hacia atrás y hacia delante del movimiento de los vehículos y para el cálculo de parámetros de accidentes (CLIFF, 1996). Sirve también como una herramienta cómoda para el análisis distancia-tiempo. En general, el programa permite la reconstrucción del desarrollo del accidente desde el momento crítico, pasando por la situación pre y post al choque hasta la posiciones finales de los vehículos.

Una ventaja esencial es su interfaz cómodo, que permite una fácil comunicación con el programa y posibilita, casi inmediatamente, la interpretación de los resultados de los cálculos, dado que el programa transforma continuamente los cálculos numéricos en gráficos. Ello permite al usuario el seguimiento directo del movimiento del vehículo en la pantalla.

A través del uso conjunto de PC-CRASH, con otros programas como PC-SKETCH (programa para la creación de croquis de carretera), y con PC-RECT (programa para la rectificación fotogramétrica de las fotos del lugar del accidente), se consigue un trabajo eficiente. Además, estos programas pueden ser utilizados independientemente.

Sin embargo, el punto débil del programa es que PC-CRASH incluye sólo un procedimiento de solución basado en el momento para todo tipo de impactos simulados. El usuario, después de cargar los vehículos y la escena, no sólo debe decidir la configuración del impacto inicial y el punto de máximo contacto durante cada una de las fases de la colisión. Ésto supone una notable deficiencia, ya que, permite demasiada dispersión en los resultados de la reconstrucción: mediante un cambio arbitrario del contacto inicial y del punto de máximo contacto, el analista puede inadvertidamente o intencionalmente desviar los resultados.

Por este motivo, deben analizarse cuidadosamente todos los accidentes evaluados con PC-CRASH y deben también evaluarse, a ser posible, por otros medios independientes y robustos, como SMAC. No es aconsejable la utilización del programa sin buenos conocimientos de los fundamentos físicos, sin la consideración de las simplificaciones y restricciones del programa, así como, sin tener en cuenta la propia experiencia. Tiene que ser siempre considerado que un programa de ordenador nunca puede ser la solución absoluta, y que el resultado conseguido depende de la calidad de los datos disponibles. Además en casos complejos, la aplicación de PC-CRASH requiere mucho tiempo para la revisión del alto número de soluciones posibles.

Conclusiones

Los estudios de validación realizados sobre los programas de ordenador usados en la reconstrucción de accidentes revelan que éstos pueden proporcionar resultados precisos y útiles cuando son empleados apropiadamente. Sin embargo, existe un alto riesgo de utilizarlos de una manera incorrecta.

Ningún programa de ordenador debe ser considerado como una caja negra que cualquiera, sin experiencia previa, puede usar para obtener resultados correctos de forma consistente. La habilidad del investigador es un elemento esencial para la obtención de resultados útiles en todos los programas de ordenador. Para hacer un buen uso de los programas informáticos utilizados en la RAT se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- Entender el programa.
- Repasar el manual técnico y la literatura que describe el programa antes de usarlo para casos individuales.
- Usar el programa dentro de su alcance. Por ejemplo, no aplicar el programa a colisiones en los que incluyen factores significativos que no son considerados por el programa.
- Ejecutar una serie de análisis, de tal manera, que se pueda determinar cómo influye la variación de ciertos parámetros en los resultados obtenidos.
- Presentar los resultados dentro de un rango. Usar una serie de análisis para mostrar todos los resultados posibles.
- Siempre que sea posible, no confiar en un sólo medio de análisis. Es decir, usar métodos independientes para comparar los resultados obtenidos.
- Presentar los resultados a revisión. El mal uso de un programa es frecuentemente descubierto mediante una revisión del análisis. Durante esta revisión, la aplicación del programa a un accidente específico debe asegurar que las hipótesis del programa no se violan, los datos de entrada son correctos y los resultados son aplicables.

Desde el punto de vista de la elección del programa debe destacarse que la mejor elección dependerá en cada caso de las particularidades del problema de reconstrucción individual al que nos enfrentemos. Es decir, el mejor programa en cada situación será aquel que mejor informe de las necesidades que tengamos bajo la mejor relación coste/capacidad. Así, por ejemplo, si lo que precisamos es un valor orientativo del cambio de velocidad de un vehículo en una colisión, bastará con la utilización de un programa de análisis de daño, tipo CRASH, sin la necesidad de tener que acudir a un programa de simulación de tipo SMAC, cuyo coste computacional y temporal es mayor, al mismo tiempo que requiere un volumen mayor de datos precisos de entrada. Por el contrario, cuanto mayor sea el grado de precisión o de detalle exigido se tendrá que ir subiendo en la sofisticación del programa a utilizar, sofisticación que irá acompañada, generalmente, de un mayor coste computacional y económico, junto con una mayor cualificación y experiencia del usuario que lo maneje.

Referencias

BRACH R.M. and Brach R.M. *Crush Energy and Planar Impact Mechanics for Accident Reconstruction*. SAE 980025. 1998.

CLIFF W.E. and Montgomery D.T. *Validation of PC-CRASH - A Momentum-Based Accident Reconstruction Program*. SAE 960885. 1996.

DAY T.D. and Hargens R.L. *An Overview of the Way EDCRASH Computes Delta-V*. SAE 870045. 1987.

DAY T.D. and Hargens R.L. *An Overview of the Way EDSMAC Computes Delta-V*. SAE 880069. 1988.

DAY T.D. *Validation of the EDVSM 3-Dimensional Vehicle Simulator*. SAE 970958. 1997.

FANCHER P.S., Ervin R.D., Winkler C.B. and Gillespie T.D. *Factbook of the Mechanical Properties of the Components for Single-Unit and Articulated Heavy Trucks*. Highway Safety Research Institute, University of Michigan. DOT HS-807 125. 1986.

MAC-ADAM C.C., Fancher P.S., Hu G.T. and Gillespie T.D. *Computerized Model For Simulating the Braking and Steering Dynamics of Trucks, Tractor-Semitrailers, Doubles, and Triple Combinations, Users' Manual - Phase 4*. Highway Safety Research Institute, University of Michigan. UM-HSRI 80-58. 1980.

MC-HENRY B.G. *Simulation Models of Vehicle Dynamics*. National Conference on Future Improvements to and Supplemental Guidance for AASHTO Policy on Geometric Design of Highways and Streets. 1987.

MAKISHITA H., Ueyama M., and Saitoh S. *An Application of Computer Graphics for Vehicle Reconstruction*. SAE 910367. 1991.

MONCARTZ H.T., Bernard J.E. and Fancher P.S. *A Simplified, Interactive Simulation for Predicting the Braking and Steering Response of Commercial Vehicles*. Highway Safety Research Institute, University of Michigan. UM-HSRI PF 75-8. 1975

NEPTUNE J.A. *Crush Stiffness Coefficients, Restitution Constants and a Revision of CRASH3 & SMAC*. SAE 980029. 1998.