

**DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA RECONSTRUCCIÓN ANALÍTICA
DE LA COLISIÓN AUTOMÓVIL – AUTOMÓVIL CON EFECTO ROTACIONAL
RESPECTO AL EJE VERTICAL DEL MOVIMIENTO POS IMPACTO**

CAMILO JOSÉ GUERRERO GUTIÉRREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2008**

**DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA RECONSTRUCCIÓN ANALÍTICA
DE LA COLISIÓN AUTOMÓVIL – AUTOMÓVIL CON EFECTO ROTACIONAL
RESPECTO AL EJE VERTICAL DEL MOVIMIENTO POS IMPACTO**

CAMILO JOSÉ GUERRERO GUTIÉRREZ

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de
Físico**

**Director
JAIRO LUIS FUENTES PÉREZ
Físico Forense (INMLCF)**

**Codirector
RAFAEL CABANZO HERNÁNDEZ
Magíster en Física**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2008**

**A mi madre, padre y a mi
Zurita linda preciosa.**

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mis mas sinceros agradecimiento a mi madre Elizabeth Gutiérrez Rodríguez, a mi padre Elías Guerrero Couott y a mi hermanita Juliana Guerrero Gutiérrez. Ya que son ellos la razón por la cual estoy donde estoy y los responsables de todo lo bueno que hay en mi. Sin ellos seguramente jamás habría ingresado a estudiar a la universidad industrial de Santander y estaría deambulando por la vida sin rumbo. Ellos son el motor de mi vida, y estaré toda la vida en deuda con ellos.

Agradecimientos muy especiales a Jairo Luis Fuentes Pérez por su colaboración , amistad y apoyo en el desarrollo de este proyecto y al Instituto Nacional de Medicina Legal Y Ciencia Forenses, por permitirme trabajar con ellos en mi trabajo de grado.

Al profesor Rafael Cabanzo Hernández por su colaboración en el desarrollo de este proyecto. Sin su apoyo este proyecto seguramente no hubiera sido posible.

Finalmente agradecerla a la Universidad Industrial de Santander, ya que me permitió abrir la mente y salir de la cueva de la ignorancia a la cual hubiera podido estar condenado de por vida.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. ACCIDENTES DE TRANSITO	18
1.1 FASES DE LA COLISIÓN VEHÍCULO – VEHÍCULO	20
1.1.1 Etapa pre impacto	20
1.1.2 Etapa de colisión	20
1.1.3 Etapa pos impacto	20
1.2 RECONSTRUCCIÓN DE LA COLISIÓN AUTOMÓVIL – AUTOMÓVIL	21
1.2.1 Croquis	21
1.2.2 Daños de los vehículos	22
1.2.3 Acta de levantamiento	22
2. MODELO FÍSICO	23
2.1 ENERGÍA DE DEFORMACIÓN	27
2.2 ENERGÍA DE ROTACIÓN	29
3. CALCULO DE VELOCIDADES POS IMPACTO	33
3.1 DESPLAZAMIENTO LINEAL O DE RODAMIENTO LIBRE	34
3.2 MOVIMIENTO DE ROTACIÓN TRASLACIÓN	35
3.3 MOVIMIENTO DE ROTACIÓN TRASLACIÓN SEGUIDO DE MOVIMIENTO LINEAL	38
3.4 PARÁMETROS FÍSICOS	39
4. APLICACIÓN DEL MODELO	41
4.1 ZONA DE IMPACTO	41
4.2 EES`s	43
4.3 COEFICIENTE DE FRICCIÓN	44
4.4 MODELO ACTUAL DEL INMLCF	44
5. PRUEBAS ANALIZADAS	45
5.1 DATOS DE PRUEBAS CONTROLADAS	45

5.2 EXPEDIENTES DEL INMLCF	50
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
6.1 PRUEBAS CONTROLADAS	54
6.2 EXPEDIENTES DEL INMLCF	56
CONCLUSIONES	57
REFERENCIAS	59

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama de colisiones centrales y no centrales para dos vehículos	19
Figura 2. Representación geométrica de la ecuación (17), para el vehículo uno	27
Figura 3. Momentos de fuerza de un automóvil que rota con respecto a su centro de masa	30
Figura 4. Representación gráfica para la definición del coeficiente de fricción efectivo en el movimiento rotacional	32
Figura 5. Gráfica que muestra la definición del coeficiente de fricción efectivo en un instante de tiempo, visto desde una llanta	36
Figura 6. Croquis de la escena del accidente de tránsito que muestra la zona de impacto de la colisión	42
Figura 7. Posición relativa de colisión entre los vehículos Datsun 200SX y Chevrolet Sprint	46
Figura 8. Posición relativa de colisión entre los vehículos Toyota Corolla y Chevrolet Cavallier	47
Figura 9. Posición relativa de colisión entre los vehículos Volkswagen Jetta y Pontiac	48
Figura 10. Posición relativa de colisión entre los vehículos Audi 5000 y Volvo 264	49
Figura 11. Posición relativa de colisión entre los vehículos Volvo 264 y Pontiac 6000	50
Figura 12. Posición relativa de colisión entre los vehículos Mazda 626 y Renault 12	51
Figura 13. Posición relativa de colisión entre los vehículos Sprint y Mazda 323	51
Figura 14. Posición relativa de colisión entre los vehículos Hyundai y Chevrolet Corsa	52

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Coeficientes de fricción para automóviles según marcha o cambio	35
Tabla 2. Coeficientes de fricción dinámico promedio para automóviles	37
Tabla 3. Parámetros del movimiento de los vehículos Sprint y Datsun	46
Tabla 4. Parámetros del movimiento de los vehículos Corolla y Cavallier	47
Tabla 5. Parámetros del movimiento de los vehículos Jetta y Pontiac	48
Tabla 6. Parámetros del movimiento de los vehículos Audi y Volvo	49
Tabla 7. Parámetros del movimiento de los vehículos Volvo y Pontiac	50
Tabla 8. Parámetros del movimiento de los vehículos Mazda y Renault	51
Tabla 9. Parámetros del movimiento de los vehículos Sprint y Mazda	52
Tabla 10. Parámetros del movimiento de los vehículos Hyundai y Chevrolet	52
Tabla 11. Velocidades calculadas de las pruebas controladas	54
Tabla 12. Velocidades calculadas de los expedientes	56

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA RECONSTRUCCIÓN ANALÍTICA DE LA COLISIÓN AUTOMÓVIL – AUTOMÓVIL CON EFECTO ROTACIONAL RESPECTO AL EJE VERTICAL DEL MOVIMIENTO POS IMPACTO*.

AUTOR: GUERRERO GUTIERREZ, Camilo José**.

PALABRAS CLAVES: Reconstrucción, colisión, velocidades de colisión, energía rotacional.

DESCRIPCION:

La reconstrucción analítica de la colisión tipo automóvil automóvil, sigue siendo una de las pruebas mas objetivas para aclarar los hechos presentados en un accidente de transito. El grado de complejidad que esta presenta ha impulsado el desarrollo de nuevos modelos, los cuales en base a las leyes fundamentales de la física (la conservación de la energía, el momento lineal y angular) y haciendo uso de técnicas tan variadas como la misma experimentación, pasando por técnicas de simulación, hasta reconstrucciones teóricas, se han acercado más a la realidad, mejorando las herramientas utilizadas para determinar culpables o impartir justicia en la rama judicial a nivel nacional e internacional.

El modelo acá desarrollado introduce la energía rotacional de los automóviles en el movimiento posterior al impacto para el cálculo las velocidades de impacto de los automóviles. Tres expedientes de accidentes reales de transito del INMLCF y cinco pruebas controladas de colisiones entre automóviles sin volcamiento, son aplicados al modelo desarrollado y al modelo actual utilizado por el INMLCF el cual no tiene en cuenta la energía rotacional en el desarrollar de la reconstrucción. Análisis y comparación de los resultados muestran una mejoría en el cálculo de las velocidades de colisión de los autos al introducir la energía de rotación y muestran la importancia de incluir la energía rotacional de los automóviles en sus movimientos pos impacto.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Jairo Fuentes Pérez.

SUMMARY

TITLE: DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE RECONSTRUCTION OF THE ANALYTICAL MOTOR CAR COLLISION TYPE WITH ROTATIONAL EFFECT RESPECT TO THE VERTICAL AXIS ON THE AFTER IMPACT MOTION^{*}.

AUTHOR: GUERRERO GUTIERREZ, Camilo José^{**}.

KEY WORDS: Reconstruction, collision, speed collision, rotational energy.

DESCRIPTION:

The reconstruction of the analytical type motor car collision remains one of the most objective evidence to clarify the facts presented in a traffic accident. The degree of complexity that this presents has prompted the development of new models, which based on the fundamental laws of physics (the conservation of energy, linear and angular momentum) and using techniques as varied as the same testing through simulation techniques, and theoretical reconstructions, have approached closer to reality, improving the tools used to identify culprits or apply justice in the judicial branch nationally and internationally.

The model here developed introduces the rotational energy of the cars in the after impact motion, to calculate the impact speeds of cars. Three records from actual traffic accident from the INMLCF and five controlled collisions tests between cars without tipping, are applied to the model developed and the current model used by the INMLCF, which does not take into account the rotational energy in the development of reconstruction. Analysis and comparison of the results show an improvement in the calculation of the collision speeds of the cars ones the rotational energy is introduce and shows the importance of including the rotational energy of the cars in their movements towards impact.

^{*} Work of degree

^{**} Faculty of Sciences. School of Physics. Director: Jairo Fuentes Pérez.

INTRODUCCIÓN

Los medios de transporte terrestre han jugado un papel muy importante en el desarrollo tecnológico, social y económico de la humanidad. El uso del vehículo inicialmente impulsado por la fuerza animal, y posteriormente por medios mecánicos, a vapor y de combustión interna, trajo consigo un nuevo riesgo social aceptado [15]. El desarrollo de los medios de transporte genera un incremento en la accidentalidad, donde en un principio se presentaba con carruajes, bicicletas, trenes, automóviles, barcos y posteriormente con aviones.

Para finales de 1800 el automóvil y principalmente a principios de 1900 la comercialización de los vehículos alcanza su máxima popularidad con el modelo Ford T desarrollado por el estadounidense Henry Ford, vendiendo más de 15.000.000 de unidades entre 1908 y 1928. De igual manera el índice de accidentalidad y mortalidad en las carreteras adquiriría un valor significativo. Las muertes para ese entonces causadas en un accidente de tránsito era considerada un hecho accidental, no punible. Pero este concepto cambia a finales de 1890 cuando William Haddon, Jr, MD, médico, epidemiólogo e ingeniero, se hace cargo de la NHTSA [1] organización norteamericana fundada en 1870 encargada de salvar vidas, prevenir lesiones y reducir los costos económicos debido a los accidentes de tránsito, a través de la educación, la investigación y el desarrollo de estándares de seguridad.

A partir de ese momento las legislaciones incluyen en sus códigos penales, sanciones a los responsables de las lesiones, muertes y prejuicios ocasionados en accidentes de tránsito. Los casos judiciales se incrementaron en gran medida, buscando establecer culpabilidad y así poder sancionar al responsable e

indemnizar a la víctima o a sus familiares en caso de que la víctima haya fallecido en el accidente.

Posteriormente a principios de 1900 en USA se funda la SAE [2] entidad dedicada al desarrollo técnico y científico de todo lo relacionado con medios de transportes terrestres y aéreos, la cual a través de los años ha establecido estándares de desarrollo para todo tipo de medios de transporte.

Estas dos organizaciones fueron las pioneras, en los siguientes años, de impulsar el desarrollo investigativo en todo lo referente a medios de transporte y estándares de seguridad. Para 1969 surge la IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) la NASVA (National agency for Automotive Safety) y la EuroNCAP (European New Car Assessment Programme) a finales de 1990. Todas estas organizaciones se encargan de hacer el control de los estándares de seguridad que deben cumplir los automóviles puestos a disposición del usuario.

Por otro lado el avance en la tecnología de la informática, y la reducción del costo de equipos como son los ordenadores, a partir de la década de los ochenta, impulsa el desarrollo de software especializado de reconstrucción y simulación, los cuales brindan una herramienta y soporte más sólido a la investigación de accidentes de tránsito.

Todo este desarrollo en materia de medios de transporte y seguridad a través del siglo XX impulsa la aplicación de la física a las ciencias forenses, abriendo consigo nuevas ramas de investigación, siendo Alemania y USA los principales exponentes en materia de desarrollo y tecnología.

En la investigación de los accidentes de tránsito los métodos usados son varios, desde la misma experimentación, pasando por técnicas de simulación, hasta reconstrucciones teóricas.

Las técnicas experimentales se utilizan para estudiar el accidente en forma controlada y así poder construir un modelo del comportamiento de los autos que chocan. Para el caso del choque automóvil – automóvil, se hacen colisionar dos autos dotados de sistemas de medición, como acelerómetros, cámaras de alta resolución las cuales permiten llevar un registro de todo el movimiento de los autos antes, durante y después del choque, equipos especiales que miden la deformación que sufren los autos debido a la colisión, así como la medición de huellas de frenado, posiciones iniciales de contacto, de choque y de reposo. Esta clase de investigación tiene como dificultad el alto costo en su desarrollo pero brindan una sustentación fuerte a la investigación y Permite el desarrollar modelos tanto teóricos como empíricos.

El desarrollo experimental da paso a la simulación, la cual en la actualidad se ha tomado el campo de la reconstrucción de accidentes así como cualquier otra rama de investigación desde las ciencias básicas hasta las aplicadas. Este método permite un modelamiento del accidente a muy bajo costo, sin embargo hay que aclarar que los modelos aplicados a las simulaciones se basan en un extenso desarrollo experimental y teórico.

En la actualidad existen en el mercado diferentes tipos de programas de reconstrucción o simulación de accidentes, entre los cuales podemos nombrar al VISTA FX, HVE, SIMON, EDSMAC4, EDSVS, EDVTS, EDCRASH entre otros, donde para el caso específico de accidentes de tránsito el más reconocidos por su desarrollo a través de los últimos años es el PC CRASH [3]. Todos estos programas basan sus modelos en desarrollos tanto teóricos como empíricos y a través de los años se han venido mejorando por medio de nuevas y mejores implementaciones, consecuencia del continuo desarrollo y estudio en el tema de reconstrucción de accidentes.

Casi 130.000 personas mueren anualmente en las autopistas y carreteras de las Américas. Más de 44.500 muertes ocurren en los Estados Unidos, en donde los accidentes de tránsito son la principal causa de muerte entre los hispanos menores de 34 años de edad.

Según estadísticas de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) para las Américas, en 2002 se registraron 128.908 muertes en choques de tránsito en el continente. Más del 76 % de estas muertes - es decir, 98.213 casos- ocurrieron en las carreteras de Estados Unidos, Brasil, México y Colombia, los países más poblados de la región [4].

En Colombia el número de muertes por accidentes de tránsito en 2007 fue de 5,642, y 44,702 personas lesionadas. Estos datos muestran un crecimiento del 3% en accidentes fatales y un 11% en accidentes no fatales frente a los datos reportados en el 2006. De acuerdo a los datos del 2007, hubo 13 muertos y 102 lesionados por cada 100,000 habitantes. También 1,145 mujeres murieron y 16,066 fueron lesionadas; mientras que 4,497 hombres murieron y 28,636 fueron lesionados. Los accidentes de tránsito, como la mayoría de actos violentos, afectan principalmente a la gente joven. La edad promedio para víctimas fatales fue de 40 años, y no fatales fue de 33 años. 1,755 peatones fueron asesinados y 9,705 fueron lesionados. Siendo los motociclistas los más afectados, con un incremento del 10.7% en muertes y un 19.5% en lesionados comparado con el 2006. [5]

Cuando en un accidente de tránsito se producen lesiones y/o muertes de personas, la reconstrucción de accidentes sigue siendo una de las pruebas más objetivas a la hora de aclarar los hechos. Esto ha obligado a que se desarrolle ampliamente esta rama de investigación.

A nivel nacional el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (INMLCF) es el organismo encargado de realizar el estudio técnico y científico en el esclarecimiento de culpabilidad en hechos que involucren heridos o muertos, como los que se presentan en los accidentes de tránsito.

Para la reconstrucción de accidentes de tránsito tipo automóvil – automóvil el INMLCF basa su estudio en un software de nombre COLINUET, y/u HOJA DE CÁLCULO, el cual a través de los datos registrados en el croquis de la escena del accidente y los registros gráficos de los daños sufridos por los autos en la colisión, calcula las velocidades pre impacto de los dos automóviles.

El modelo hace uso de la conservación de la energía para el cálculo de las velocidades post impacto y aplica la conservación del momentum lineal para determinar las velocidades pre impacto. Haciendo uso de los EES (energía de velocidad equivalente), parámetros responsables de determinar la pérdida de energía cinética transformada en trabajo de deformación que sufren los automóviles en el choque, se establece un rango de valores de las velocidades de colisión de los dos vehículos.

El nivel de desarrollo técnico y científico en materia de reconstrucción de accidentes con que cuenta el instituto (INMLCF) a nivel nacional aún no está a la altura que muestran países como USA y Alemania. Por tal razón es necesario realizar esfuerzo en conjunto para que las entidades encargadas de brindar el soporte técnico científico a la administración de justicia, como el instituto el INMLCF y la universidad, establezcan de común acuerdo propuestas de desarrollo e investigación en materia de desarrollo de las ciencias forenses, permitiendo desarrollar modelos mucho más acordes con la realidad, mejorando las herramientas utilizadas a la hora de determinar culpables o impartir justicia.

El libro se desarrolla de la siguiente forma. En el capítulo 1 se expone el concepto de accidente de tránsito, y las fases de una colisión vehículo vehículo. También se hace referencia al método de reconstrucción de accidentes y la evidencia utilizada para el mismo. En el capítulo 2 se hace el desarrollo del modelo físico para el cálculo de las velocidades pre impacto de los vehículos que colisionan, así como el cálculo de las Energías de deformación y rotación presentes en la colisión. El capítulo 3 deduce la velocidad pos impacto de los vehículos para diferentes tipos de movimientos pos impacto, presentando todos los parámetros necesarios para el cálculo de las velocidades pre impacto. El capítulo 4 expone la aplicación del modelo desarrollado a colisiones reales, tipo automóvil automóvil, así como una breve descripción del modelo actual utilizado por el INMLCF. El capítulo 5 hacen una descripción de las colisiones aplicadas al modelo desarrollado y al modelo actual utilizado por el INMLCF. El capítulo 6 presenta un análisis de los resultados obtenidos al aplicar los dos métodos. Finalmente se exponen las conclusiones del trabajo desarrollado y las referencias bibliográficas citadas.

1. ACCIDENTES DE TRANSITO

Clasificación de los accidentes de tránsito. Los accidentes de tránsito se clasifican en forma general en dos tipos [6]:

Accidentes de colisión directa:

Vehículo – vehículo

Vehículo – motocicleta

Vehículo – peatón

Vehículo – semoviente (animal)

Vehículo – objeto fijo

Accidentes que no incluyen colisiones directas:

Volcamientos, rodamientos, caídas de ocupantes, deslizamientos, etc.

A su vez los vehículos se clasifican en:

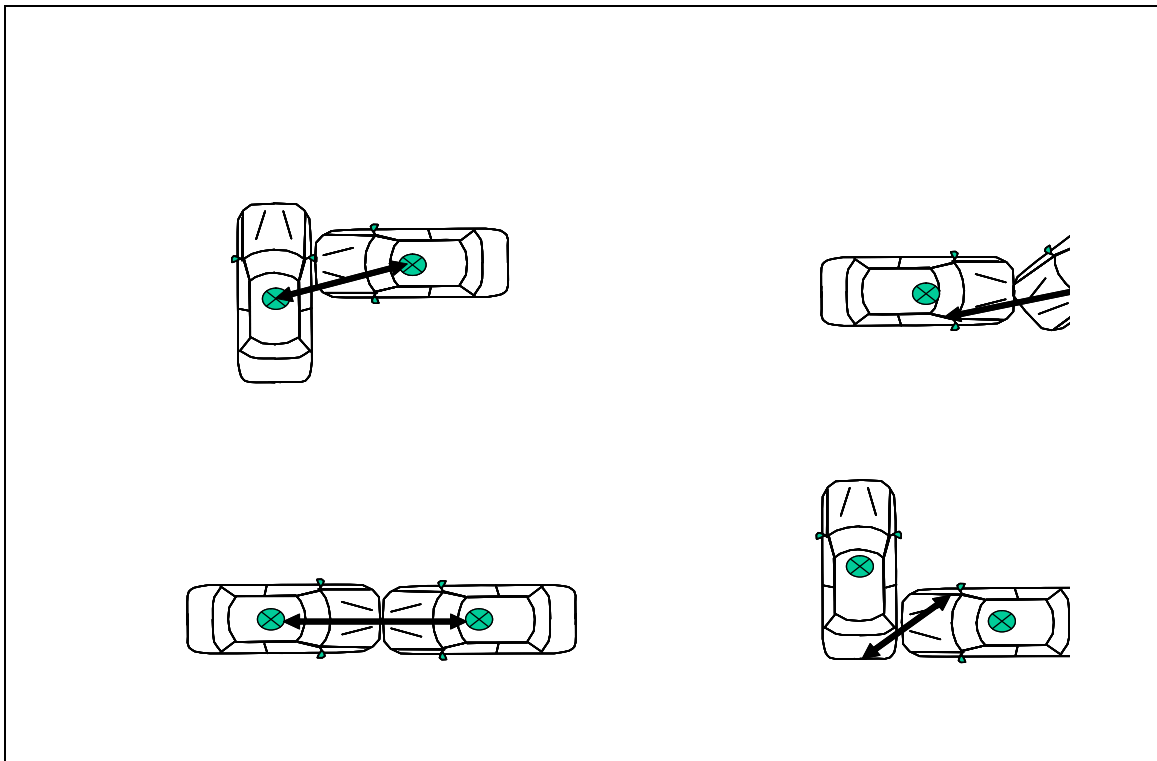
- Vehículos ligeros: motocicletas y automóviles.
- Vehículos medianos: camionetas, microbuses, camperos y busetas.
- Vehículos pesados: doble troqué, camiones rígidos, buses y vehículos articulados.

En este estudio solo se hace referencia al choque entre vehículos ligeros, tipo automóvil, donde los vehículos no sufren volcamiento debido al impacto.

La colisión entre dos vehículos se puede clasificar de acuerdo a la posición relativa de los dos vehículos en el instante del impacto. Podemos hablar de colisión oblicua cuando el ángulo entre los dos vectores de velocidad de los automóviles antes del impacto es mayor que diez grados; y colisión colineal cuando el ángulo entre los dos vectores de velocidad de los vehículos es menor que diez grados.

Sin embargo, existe una clasificación mucho más importante a la hora de analizar el choque entre dos vehículos, y es la diferencia entre un choque central y un choque no central. Durante la colisión hay transferencia de momentum lineal entre los dos vehículos. De acuerdo con la tercera ley de Newton la fuerza entre los vehículos durante la colisión es de igual magnitud y de sentido opuesto, por tal razón el impulso es compartido de igual forma para los dos vehículos. En el choque no central el vector impulso que sufren los dos vehículos no actúan a través del centro de masa de los vehículos y como consecuencia de ello se genera un movimiento rotacional post impacto en uno o ambos vehículos. La figura 1 muestra la configuración de dos colisiones centrales y dos no centrales.

Figura 1. Diagrama de colisiones centrales y no centrales para dos vehículos. Los puntos marcados en verde representan los centros de masa de cada vehículo y las flechas indican los vectores impulso de cada auto durante la colisión.



Para la mayoría de los casos por no decir todos los casos, el vector impulso mutuo que se genera en el choque no actúa directamente sobre el centro de masa de los vehículos y esto ocasiona un movimiento rotacional posterior al impacto. Por tal razón, es importante tener en cuenta la energía rotacional que se genera en este tipo de colisión a la hora de aplicar un modelo de reconstrucción [7]. El modelo actualmente utilizado por el INMLCF, no tiene en cuenta la energía rotacional que adquieren los vehículos después de la colisión.

1.1 FASES DE LA COLISIÓN VEHICULO – VEHICULO

En general, una colisión se puede dividir en tres fases: Pre impacto, colisión y pos impacto.

1.1.1 Etapa pre impacto. Esta etapa corresponde a las condiciones de los vehículos antes del contacto físico. Los dos vehículos se desplazan a velocidades que llamaremos velocidades pre impacto. Para las colisiones desarrolladas en este trabajo, se asume que los automóviles se desplazan en línea recta, es decir, solo poseen energía cinética traslacional.

1.1.2 Etapa de colisión. Esta comprende desde el instante en el cual los dos autos entran en contacto físico hasta el momento de su separación física. En esta etapa el impulso mutuo que sufren los automóviles, genera de acuerdo a las características del choque una transformación significativa de energía, la cual se ve representada por cambios en sus momentos, pérdida de energía debido a la deformación de las estructuras no elásticas de los autos y al movimiento rotacional adquirido durante la colisión si es el caso.

1.1.3 Etapa pos impacto. Esta etapa comprende desde el momento de la separación de los automóviles hasta el reposo de cada uno de ellos. En esta etapa los vehículos se desplazan bajo el efecto de una fuerza no conservativa, la cual

esta representada por la fuerza de fricción de las llantas con la superficie sobre la cual se desplazan los automóviles. Esta fuerza disipativa es la responsable de convertir la energía cinética de cada automóvil en trabajo no conservativo y llevarlo hasta el reposo. Los casos analizados hacen referencia al movimiento libre pos impacto de los dos vehículos, es decir, los dos vehículos se separan una vez superan la etapa de colisión sin que ninguno afecte o influya en el movimiento pos impacto del otro.

1.2 RECONSTRUCCIÓN DE LA COLISIÓN AUTOMÓVIL - AUTOMÓVIL

El objetivo principal de la reconstrucción, es poder determinar la secuencia de eventos antes, durante y después del accidente. El proceso total de investigación y reconstrucción se divide en dos fases: la recolección y la interpretación de los datos.

La primera etapa hace referencia a la recolección de toda la evidencia en la escena del accidente, siendo el croquis la evidencia más importante para el reconstructor. La segunda fase hace referencia a la aplicación de los modelos físicos, los cuales nos permiten desarrollar la reconstrucción de la escena a partir de los datos recolectados en la primera etapa y calcular las velocidades con que colisionan los automóviles.

Para la reconstrucción de este tipo de accidente es necesario hacer uso de la evidencia objetiva, la cual está representada por:

1.2.1 Croquis. Reporte gráfico que posee los detalles de la escena del accidente de tráfico y su zona de influencia en el momento de los hechos, especificando entre otras cosas las posiciones u orientaciones cardinales de los vehículos involucrados en el incidente, posición de los automóviles, huellas de frenado o derrape que los automóviles pudieron haber dejado en la escena. Todas estas

mediciones están indicadas con respecto a un sistema o punto de referencia fijo de la escena del accidente e incluye todos los elementos que tienen incidencia en el accidente.

1.2.2 Daños de los vehículos. Referencia gráfica de los daños sufridos por los vehículos en el accidente, estos se obtienen por medio de registros fotográficos tomados por peritos de tránsito o autoridades judiciales a los vehículos involucrados. Estas imágenes son utilizadas para el cálculo de los EES.

1.2.3 Acta de levantamiento. La realiza la policía judicial o quienes tengan funciones de policía judicial; Es necesaria cuando en la colisión se ocasiona la muerte de alguna persona. El acta contiene todo lo referente a la escena del hecho.

2. MODELO FÍSICO

El análisis de la colisión entre dos cuerpos que intervienen en una colisión del tipo vehículo – vehículo se desarrolla a través de las leyes fundamentales de la física, las cuales se conocen como principios de conservación. Estas son, la conservación de la energía, la conservación del momentum lineal y el momentum angular. Estas ecuaciones son válidas siempre y cuando no existan fuerzas externas que actúan sobre el sistema que se analiza. Para el caso de la colisión automóvil - automóvil las fuerzas de fricción que se generan entre las llantas y el suelo durante el choque de los vehículos están presentes y en principio no se podrían utilizar los principios de conservación antes mencionados. Sin embargo, estas fuerzas son despreciables comparadas con las fuerzas de contacto que intervienen en la colisión*.

Los principios de conservación son válidos en cualquier sistema inercial, y escoger un sistema adecuado simplifica los cálculos. Por tal razón, se escoge el sistema de referencia fijo al centro de masa del sistema de dos cuerpos. De acuerdo a lo anterior, se define la posición y velocidad del centro de masa para el sistema de dos vehículos respecto a un sistema inercial cualquiera arbitrario (el cual podría ser representado por la intersección donde ocurrió el accidente), de la forma.

$$\vec{R}_{cm} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2} \quad (1)$$

$$\vec{V}_{cm} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

* El modelo desarrollado se basa en el modelo actual utilizado por el INMLCF y se generaliza para el caso en dos dimensiones utilizando [8].

Donde m_1 y m_2 son las masas de cada uno de los autos; \vec{r}_1 y \vec{r}_2 representan los vectores posición de los vehículos, y \vec{v}_1 , \vec{v}_2 son las velocidades respectivas, todos los vectores medidos respecto al sistema inercial arbitrario. Debido a que las fuerzas externas que actúan durante la colisión en el sistema son despreciables, la velocidad del centro de masa debe ser constante para los instantes antes y después de la colisión.

$$\vec{V}_{cm} = \vec{V}'_{cm} \quad (3)$$

Reemplazando los valores de la velocidad del centro de masa antes del impacto y después del impacto en la ecuación (3) obtenemos una de las condiciones de conservación más importantes, la conservación del momento lineal.

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2 \quad (4)$$

El momentum lineal del vehículo uno, medido respecto al sistema centro de masa \tilde{v}_1 , se puede escribir:

$$m_1\tilde{v}_1 = m_1(\vec{v}_1 - \vec{V}_{CM}) \quad (5)$$

Reemplazando (2) en (5) y simplificando, se obtiene el momentum lineal del vehículo uno, medido respecto a un sistema fijo al centro de masa del sistema de dos partículas, en función de las masas y velocidades pre impacto de los vehículos.

$$m_1\tilde{v}_1 = \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2}(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \quad (6)$$

Si se define la masa reducida como.

$$m^* = \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

Y la velocidad relativa pre impacto de los vehículos como.

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 \quad (8)$$

La ecuación (6) se puede escribir:

$$m_1 \tilde{v}_1 = m^* \Delta \vec{v} \quad (9)$$

Realizando un procedimiento similar para el vehículo dos, encontramos:

$$m_2 \tilde{v}_2 = - m^* \Delta \vec{v} \quad (10)$$

Comparando (9) y (10) podemos ver que el momentum lineal pre impacto de los dos vehículos, medidos respecto al sistema centro de masa, son de igual magnitud pero de sentido contrario.

Si se hace un balance de energía, teniendo en cuenta que los diferentes vectores se miden desde el sistema fijo en el centro de masa, se tiene:

$$m_1 \tilde{v}_1^2 + m_2 \tilde{v}_2^2 = m_1 \tilde{v}_1'^2 + m_2 \tilde{v}_2'^2 + 2\Delta E_T \quad (11)$$

Donde, los cuatro primeros términos corresponden a la energía cinética traslacional y el último término de la igualdad representa la energía disipada en trabajo de deformación y energía rotacional pos impacto que adquieren los vehículos, es decir.

$$\Delta E_T = E_{deformacion} + E_{rotacional} \quad (12)$$

Haciendo uso de las ecuaciones (9) y (10) y reagrupando los términos de (11) se obtiene.

$$\Delta v^2 = \Delta v'^2 + \frac{2\Delta E_t}{m^*} \quad (13)$$

Donde al último término de (13) se le conoce como, Velocidad Relativa de Energía Equivalente (V_e), responsable de incluir la pérdida de energía debido a la deformación de los autos y la energía rotacional adquirida por los autos en la colisión.

$$V_e = \sqrt{\frac{2\Delta E_T}{m^*}} \quad (14)$$

Por lo tanto la ecuación (13) se puede escribir,

$$\Delta v^2 = \Delta v'^2 + V_e^2 \quad (15)$$

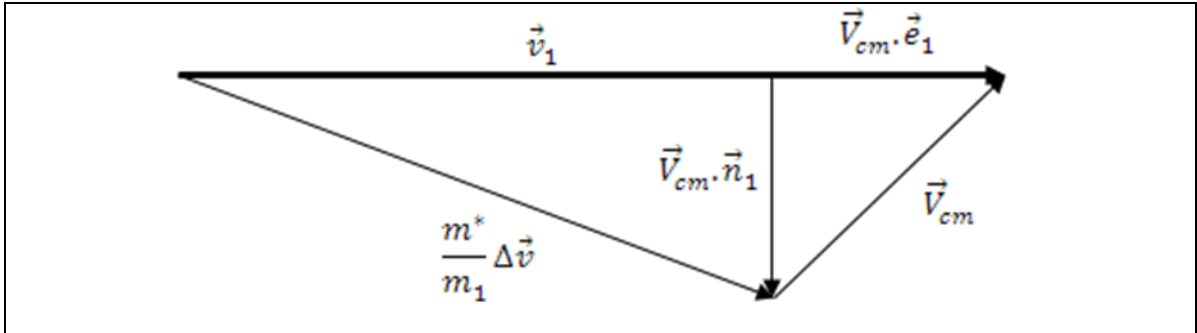
Los otro dos términos de la ecuación (13) $\Delta v'^2$ y Δv^2 son las magnitudes de las velocidades relativas pre impacto y pos impacto de los vehículos elevadas al cuadrado respectivamente.

Eliminando la masa m_1 de la ecuación (5) y reemplazando el valor en la ecuación (9) se deduce la ecuación vectorial para la velocidad del vehículo uno en el instante anterior al impacto.

$$\vec{v}_1 = \vec{V}_{cm} + \frac{m^*}{m_1} \Delta \vec{v} \quad (16)$$

La representación geométrica de la ecuación vectorial (16) se muestra en la Figura 2. Si se definen los vectores unitarios \vec{e}_1 y \vec{h}_1 como los vectores paralelo y normal respecto del vector velocidad pre impacto del vehículo uno, se puede escribir:

Figura 2. Representación geométrica de la ecuación (17), para el vehículo uno



$$v_1 = \vec{V}_{cm} \cdot \vec{e}_1 + \sqrt{\left[\frac{m^*}{m_1}\right]^2 * \Delta v^2 - (\vec{V}_{cm} \cdot \vec{n}_1)^2} \quad (17)$$

Como se dijo anteriormente, las fuerzas externas que actúan sobre el sistema durante la colisión son despreciables y por ello $\vec{V}_{cm} = \vec{V}'_{cm}$, así que la ecuación (17) se puede escribir:

$$v_1 = \vec{V}'_{cm} \cdot \vec{e}_1 + \sqrt{\left[\frac{m^*}{m_1}\right]^2 * \left[\Delta v^2 + \frac{2\Delta E_t}{m^*} \right] - (\vec{V}'_{cm} \cdot \vec{n}_1)^2} \quad (18)$$

2.1 ENERGÍA DE DEFORMACIÓN

Para calcular la energía disipada en trabajo de deformación, se deben evaluar los daños en cada uno de los vehículos. El método más sencillo de encontrar los valores de energía de deformación es a través de pruebas de colisiones. En los

casos más simples el vehículo colisiona contra una barrera rígida estacionaria indeformable. Para este caso la energía disipada en trabajo de deformación es igual a la energía cinética antes de la colisión ya que el auto es frenado totalmente por la barrera rígida. De tal forma que la energía disipada durante el choque se puede caracterizar por la velocidad con que colisiona el auto contra la barrera rígida.

$$\Delta E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (19)$$

Para el caso donde el auto no llegue al reposo después de la colisión, la energía disipada en la colisión esta dada por la expresión.

$$\Delta E_1 = \frac{1}{2}m_1(v_1^2 - v_1'^2) \quad (20)$$

Donde v_1 y v_1' representan las velocidades pre y pos impacto, respectivamente. Cuando no es posible determinar la energía de deformación con base en la velocidad de colisión del vehículo, se puede definir como una velocidad v_{e1} que es proporcional a la energía disipada durante la colisión.

$$\Delta E_1 = \frac{1}{2}m_1v_{e1}^2 \quad (21)$$

Es decir,

$$v_{e1} = \sqrt{\frac{2\Delta E_1}{m_1}} \quad (22)$$

A esta velocidad (23) se le conoce como **Velocidad Equivalente de Energía** (EES) [8], que se constituye en el parámetro principal para el cálculo del trabajo de deformación de los autos que colisionan. De esta forma para el caso de dos autos

que colisionan la energía total disipada en trabajo de deformación esta dada en términos de los EES de la forma.

$$\Delta E_{def} = \frac{1}{2}m_1v_{e1}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{e2}^2 \quad (23)$$

Donde el cálculo de los EES de cada auto que colisiona, se obtienen a través de un programa que contiene una extensa base de datos de colisiones de autos de todas las marcas con diferentes tipos de configuraciones, y sus respectivo EES ya determinados por estas pruebas controladas. El reconstructor por medio de comparación grafica del modelo del auto, perfil de daños y el tipo de choque, determina un rango de valores de los EES para cada auto, y determinar el valor a utilizar en el modelo de reconstrucción.

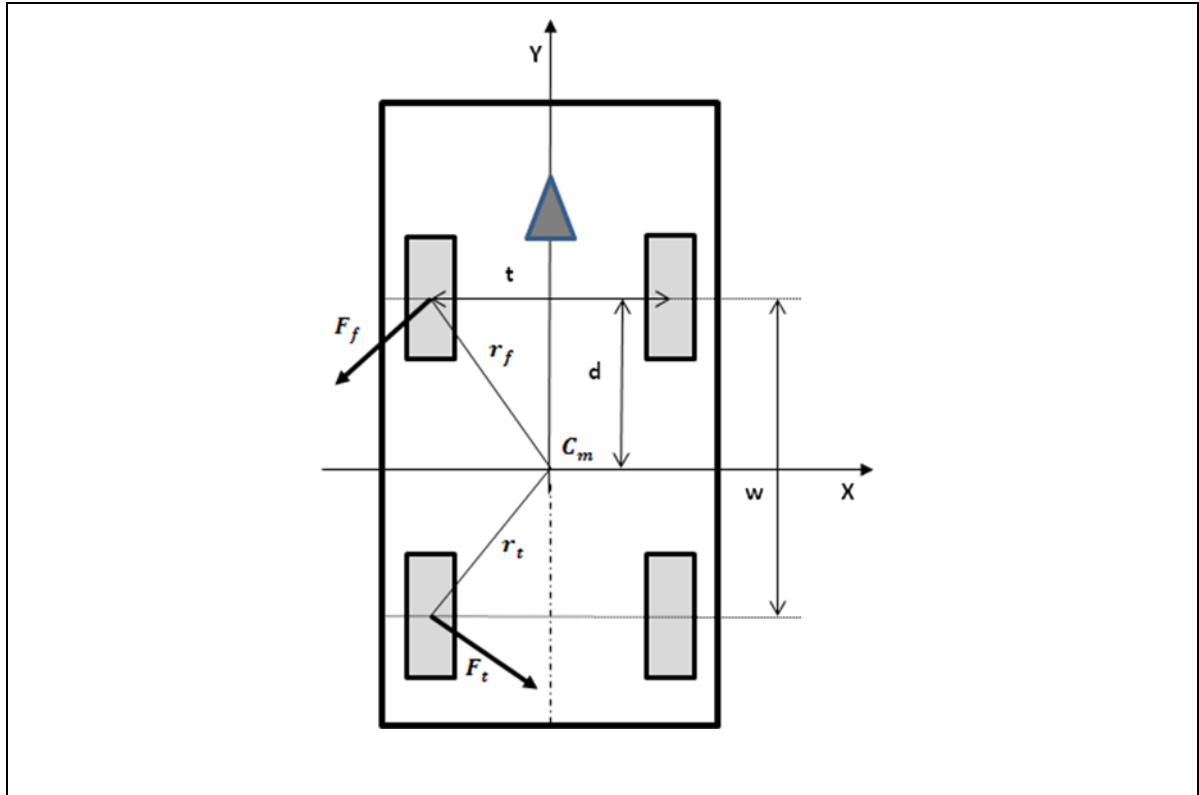
2.2 ENERGÍA DE ROTACIÓN

El trabajo realizado por el momento de fuerza de fricción del contacto entre neumáticos y superficie con respecto al centro de masa de un auto que rota un ángulo $\Delta\theta$ esta dado de la forma:

$$\Delta E_{rot} = [2(\mathbf{r}_f \times \mathbf{F}_f) + 2(\mathbf{r}_t \times \mathbf{F}_t)] \times \Delta\theta \quad (24)$$

Donde los términos \mathbf{r}_f y \mathbf{r}_t representan el brazo del centro de masa a las llantas frontales y traseras respectivamente, \mathbf{F}_f y \mathbf{F}_t la fuerza de fricción de cada una de las llantas frontales y traseras respectivamente, definidos de acuerdo a la Figura 3.

Figura 3. Momentos de fuerza de un automóvil que rota con respecto a su centro de masa



Asumiendo una distribución de masa simétrica con respecto al eje longitudinal del vehículo (eje y), el problema radica en determinar la ubicación del centro de masa con respecto al eje transversal (eje x). Este valor es muy complicado de determinar con exactitud debido a la variedad de configuraciones de los autos que hay en el mercado y la complejidad del mismo. Por tal razón para el presente estudio se ha asumido una distribución de masa simétrica con respecto a la distancia entre ejes de llantas.

Esta afirmación se base en el análisis de la relación K , la cual se define como la razón entre la distancia centro de masa al eje frontal del auto (d) y distancia entre ejes delanteros y traseros (w), es decir:

$$K = \left(\frac{d}{w}\right) \quad (25)$$

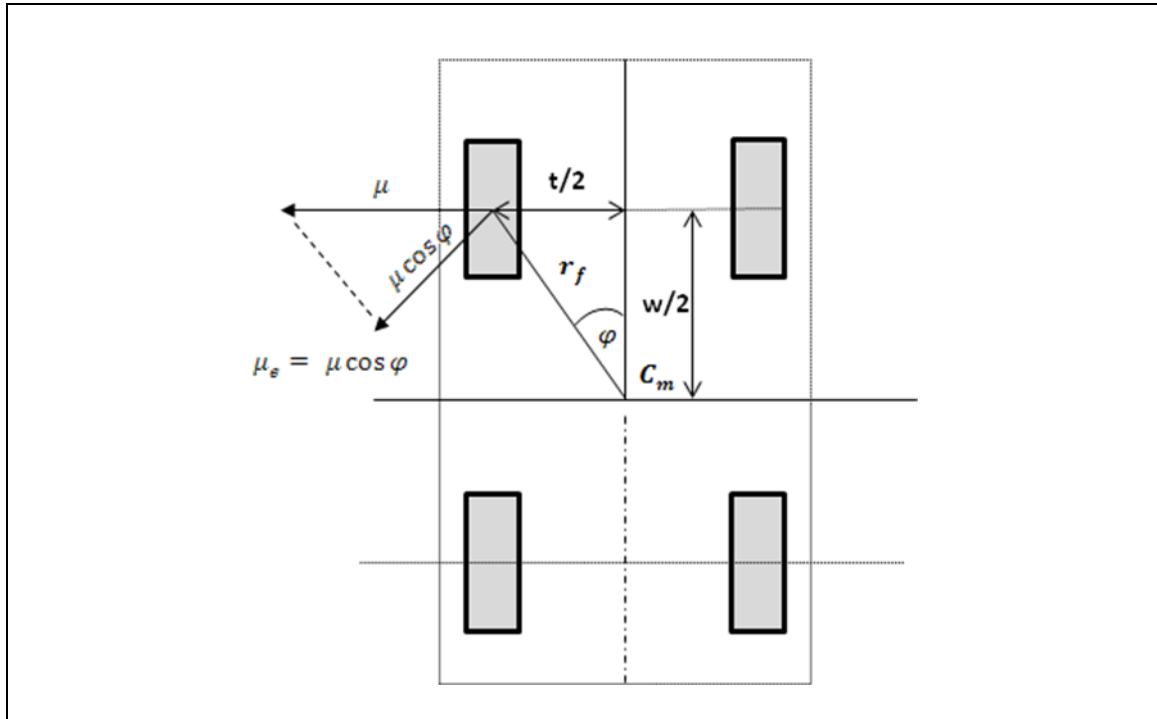
Para el caso de automóviles K esta en el rango de **0.4** a **0.5**. Y de camionetas pick ups es del orden de **0.5** a **0.6**. Para automóviles de calle el valor K que registra la literatura usado por los re constructores es de 0.47 y de 0.5 [9]. Para el caso de simetría adoptado en este estudio el valor de K es de 0.5. Como consecuencia de esta distribución simétrica de peso sobre todo el vehículo, y el hecho de que el vector del brazo desde el centro de masa hasta las llantas y el vector fuerza que desacelera la rotación son perpendiculares, la ecuación (24) se simplifica a la forma.

$$\Delta E_{rot} = \left[\frac{\mu_e mg}{2} \sqrt{w^2 + t^2} \right] \times \Delta\theta \quad (26)$$

Donde w = es la distancia entre ejes, t = la trocha, μ_e = el coeficiente efectivo, mg = el peso del auto y $\Delta\theta$ = el ángulo total que giró el auto (radianes).

Se define el coeficiente efectivo para el movimiento de rotación como la proyección del coeficiente de fricción dinámico perpendicular al eje principal de la llanta sobre la dirección anti paralela de la velocidad de rotación de la llanta como se ilustra en la Figura 4. Para efectos de gráfica se representará la fuerza de fricción únicamente por el coeficiente de rozamiento respectivo.

Figura 4. Representación gráfica para la definición del coeficiente de fricción efectivo en el movimiento rotacional



$$\mu_e = \mu \cos \varphi \quad (27)$$

Conociendo los valores de la distancia entre ejes, la trocha del auto, el coeficiente de fricción, el peso y el giro del auto, el cálculo de la energía de rotación adquirida por el auto en la colisión se hace a través de la ecuación (26).

3. CÁLCULO DE VELOCIDADES POS IMPACTO

El movimiento pos impacto de dos vehículos que colisionan se puede describir en general de tres formas. La primera puede ser un movimiento lineal de desplazamiento o rodamiento libre del vehículo posterior al impacto hasta su reposo. La segunda un movimiento de rotación traslación hasta el reposo y la tercero un movimiento de rotación traslación seguido de un desplazamiento de rodamiento libre hasta el reposo.

En cualquiera de las tres formas de movimiento pos impacto, la energía de los vehículos es disipada debido a la presencia de las fuerzas de fricción que surgen del contacto entre las llantas de los autos y la superficie por donde se desplazan.

Si se asume un desplazamiento rectilíneo pos impacto de los autos hasta el reposo. La ecuación general que determina la velocidad pos impacto del auto esta dada de la forma.

$$v_f = \sqrt{2 * \mu_i * g * D} \quad (28)$$

Donde μ_i representa el coeficiente efectivo de fricción con la superficie por donde se desplaza el auto, g es la aceleración de la gravedad y D es la distancia total que se desplaza el auto sobre la superficie. Esta ecuación de velocidad pos impacto es la expresión general, sin embargo debe ajustarse de acuerdo al tipo de movimiento pos impacto que sufran los autos. El modelo del INMLCF, utiliza (28) para el cálculo de las velocidades pos impacto introduciendo un coeficiente de fricción equivalente a libertad del reconstructor.

3.1 DESPLAZAMIENTO LINEAL O DE RODAMIENTO LIBRE

Para el rodamiento puro la forma general del cálculo de la velocidad pos impacto de la ecuación (28) se conserva y el parámetro más importante a determinar es el coeficiente de fricción efectivo μ_i , también conocido como coeficiente de rodamiento libre o coeficiente de resistencia al rodamiento que actúa durante el desplazamiento del auto.

El coeficiente de fricción μ_i efectivo responsable de la desaceleración del auto en su movimiento es un parámetro que depende de diferentes factores, entre los cuales se pueden nombrar, el nivel de bloqueo de las llantas, la marcha o cambio en que se encuentra el auto y el estado de la llanta entre otros. Desde el punto de vista del reconstructor y más específicamente para el caso del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (INMLCF), estos parámetros son muy difíciles de determinar en el desarrollo de una reconstrucción y no se realiza ningún estudio técnico para determinar su valor.

Diferentes registros de pruebas se han realizado para determinar el coeficiente de fricción de rodamiento libre hasta el reposo [10], logrando obtener unos rangos de valores. Estos valores de coeficiente de fricción se determinan a través de pruebas. Sin embargo, un vehículo que colisiona, durante el desplazamiento pos impacto, puede ser bloqueado, frenado o acelerado por el conductor, alterando el libre movimiento del vehículo, o también puede ser obstaculizado por alguna estructura u objeto en su línea de desplazamiento, trayendo como consecuencia resultados poco precisos en el cálculo de la velocidad pos impacto del vehículo. Por tal razón es habilidad del reconstructor determinar los valores de los coeficientes que pueden ser utilizados en la reconstrucción

La tabla siguiente muestra un resumen de pruebas realizadas en diferentes tipos de autos [10]. Los coeficientes de fricción de rodamiento puro varían

principalmente de acuerdo al modelo del vehículo, la velocidad con la cual se desplazaba el vehículo y el cambio o marcha en que se encontraba el auto.

Tabla 1. Coeficientes de fricción para automóviles según marcha o cambio

velocidad	Marcha 1	Marcha 2	Marcha 3	Marcha 4	Marcha 5
12 [m/s]	0.214-0.217	0.102-0.130	0.064-0.080	0.051-0.060	0.035-0.059
2 [m/s]	0.097-0.105	0.064-0.071	0.042-0.051	0.040-0.063	0.036-0.051

Si no se tienen en cuenta los valores para el caso de que el auto se encuentre en el cambio neutro, los cuales son del orden de 0.017 a 0.025 para el coeficiente de fricción, se puede observar que el rango de valores para un coeficiente de fricción de rodamiento puro es del orden de **0.035 a 0.217** para el caso de automóviles. La tabla anterior hace referencia a automóviles con caja mecánica, ya que son los carros que se analizaron en las pruebas, pero para automóviles automáticos, estos valores cambian.

De esta forma, se puede escoger el coeficiente de rodamiento libre adecuado que se debe introducir en la ecuación general que permite calcular la velocidad pos impacto de los automóviles, ecuación (28).

3.2 MOVIMIENTO DE ROTACIÓN - TRASLACIÓN

Como su nombre indica este movimiento está compuesto por un desplazamiento lineal y rotación del vehículo con respecto a su centro de masa. Para este tipo de movimiento la rapidez de desaceleración del vehículo por parte de la fricción de las llantas con el pavimento o superficie es función de la orientación del vehículo y la dirección del movimiento de su centro de masa.

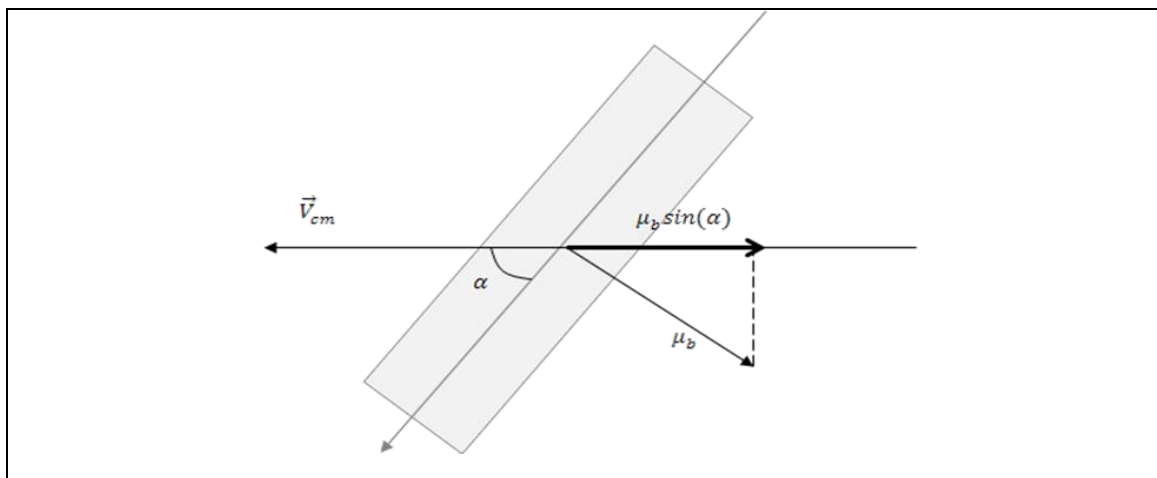
La variedad de condiciones que presentan las llantas durante el movimiento combinado de rotación traslación afectan directamente al movimiento del vehículo y la cantidad de energía disipada en el mismo [11]. Las llantas pueden encontrarse

libres de rodamiento, bloqueadas o desinfladas debido a la colisión o a la obstrucción por parte de la estructura misma del auto, generando un incremento en el coeficiente de rodamiento libre. Sin embargo, no es posible asegurar con certeza las condiciones referentes al estado de las llantas durante el movimiento y de hacerlo sería totalmente arbitraria.

Asumiendo que las llantas se encuentran libres para el rodamiento, la velocidad lineal es disminuida a medida que la orientación del vehículo cambia con respecto a la dirección de su centro de masa. En forma general podemos decir que la desaceleración y consecuentemente el coeficiente de fricción durante un movimiento de rotación - traslación es variable y por eso es preciso encontrar un coeficiente que permita caracterizar ese movimiento.

Podemos expresar el coeficiente efectivo de fricción que desacelera un auto que realiza un movimiento de rotación y traslación en un instante cualquiera como la proyección del coeficiente de fricción dinámico de la llanta sobre la dirección de desplazamiento del centro de masa como se muestra en la Figura 5, el cual como ya se explicó es máximo cuando el auto esta orientado perpendicularmente al vector velocidad del centro de masa.

Figura 5. Gráfica que muestra la definición del coeficiente de fricción efectivo en un instante de tiempo, visto desde una llanta



Visto desde el marco de referencia de una de las llantas es equivalente a la expresión.

$$\mu_i = \mu_b |\sin(\alpha_i)| \quad (29)$$

Donde α_i es el ángulo entre el eje longitudinal del auto (eje y) el cual coincide con el eje longitudinal de la llanta y el vector velocidad del centro de masa. μ_b es el coeficiente de fricción dinámico el cual depende del tipo de superficie donde ocurrió el accidente y se puede encontrar valores aproximados para diferentes superficies en tablas [11].

Tabla 2. Coeficientes de fricción dinámico promedio para automóviles

Condición de Superficie	Fricción dinámica	Pico de fricción
Asfalto/concreto seco	0.65 – 0.90	0.80 – 1.00
Asfalto/concreto mojado	0.45 – 0.70	0.60 – 0.75
Grava, ligera a compacta	0.40 – 0.70	
Grava con algo de prado	0.35 – 0.40	0.40 – 0.50
Pradera mojada	0.15 – 0.20	0.20 – 0.25
Pradera seca, prado corto	0.35	0.45
Asfalto, hojas mojadas	0.60	0.70
Camino cubierto de nieve	0.30	0.30
Hielo	0.15	0.15
Barro , pavimento mojado	0.2 – 0.3	
Gasolina diesel en asfalto mojado	0.25 - 0.3	

De esta manera, se puede definir el coeficiente efectivo medio que actúa sobre el auto al realizar una rotación desde α_0 hasta α_n durante su desplazamiento de rotación traslación hasta el reposo de la forma:

$$\bar{\mu}_e = \frac{1}{\Delta\alpha} \times \sum_{i=1}^n \mu_i \quad \rightarrow \quad \mu_i = \mu_b * |\sin(\alpha_i)| \quad (30)$$

$$\bar{\mu}_e = \frac{1}{\Delta\alpha} \times \sum_{i=1}^n \mu_b * |\sin(\alpha_i)| \quad (31)$$

Donde el $\bar{\mu}_e$ se define como coeficiente de fricción efectivo medio, $\Delta\alpha$ es el ángulo de rotación total y la suma se realiza sobre todos los valores de μ_i con incrementos de un grado desde α_0 hasta α_n . Esto se hace asumiendo distribución de pesos iguales para cada una de las ruedas. Introduciendo el coeficiente que se acaba de calcular en (28), se obtiene la expresión para el calculo de la velocidad pos impacto del movimiento rotación – traslación.

$$v_f = \sqrt{2 * \bar{\mu}_e * g * D} \quad (32)$$

Esta expresión tiene la misma forma de (28) y solo cambia en el coeficiente efectivo medio que actúa sobre el auto al desplazarse hasta su reposo.

3.3 MOVIMIENTO DE ROTACIÓN TRASLACIÓN SEGUIDO DE MOVIMIENTO LINEAL

El movimiento describe el caso donde el auto después de que cesa su movimiento de rotación - traslación continua moviéndose linealmente hasta el reposo. Por tal razón el cálculo de la velocidad pos impacto consiste en la suma de las velocidades para los dos tipos de movimientos. Y se puede expresar de la forma.

$$v_f = \sqrt{v_{rt}^2 + v_l^2} \quad (33)$$

Donde v_{rt} es la velocidad pos impacto para el movimiento de rotación - traslación calculado a través de (31) y v_l es la velocidad pos impacto para el movimiento lineal hasta el reposo calculada a través de (28).

Finalmente haciendo uso del croquis y de los registros gráficos de los daños de los autos podemos determinar los vectores unitarios \vec{n}_1 y \vec{e}_1 y de la base de datos con que cuenta el instituto o a través de internet se pueden determinar las especificaciones técnicas de cada auto para la obtención de los valores de masa, distancia entre ejes y trocha.

De esta forma se obtienen los valores de los parámetros necesarios para el cálculo de las velocidades pos impacto de los autos que colisionan.

3.4 PARÁMETROS FÍSICOS

Haciendo uso de la ecuación (19) y remplazando los parámetros anteriormente deducidos de las velocidades pos impacto, energías de deformación, energías rotacionales y masas de cada uno de los automóviles con los vectores unitarios \vec{e}_i y \vec{n}_i correspondientes al automóvil. Se obtiene una expresión general para el cálculo de las velocidades pre impacto de los vehículos en función de los parámetros deducidos.

$$v_i = v_i(\mu, g, D, \vec{e}, \vec{n}, EES, m, w, t, \Delta\theta) \quad (34)$$

Donde (μ) representa el coeficiente de fricción efectivo entre las llantas y la superficie donde se desplaza el automóvil, (g) es la aceleración de la gravedad, con un valor de $9.81[m/s^2]$, (D) es la distancia que se desplaza el automóvil desde la zona de impacto hasta el punto de reposo, (\vec{e}) es el vector unitario paralelo a la velocidad pre impacto del automóvil, (\vec{n}) es un vector unitario perpendicular a la dirección pre impacto del automóvil, (EES) son los valores de la velocidad

equivalente de energía, (m) la masa de los automóviles, (w) es la distancia entre los ejes frontales y traseros del automóvil, (t) trocha o distancia entre llantas de uno de los ejes (frontal o trasero) y ($\Delta\alpha$) es el giro que realiza en automóvil en su movimiento rotacional, el cual es medido en radianes.

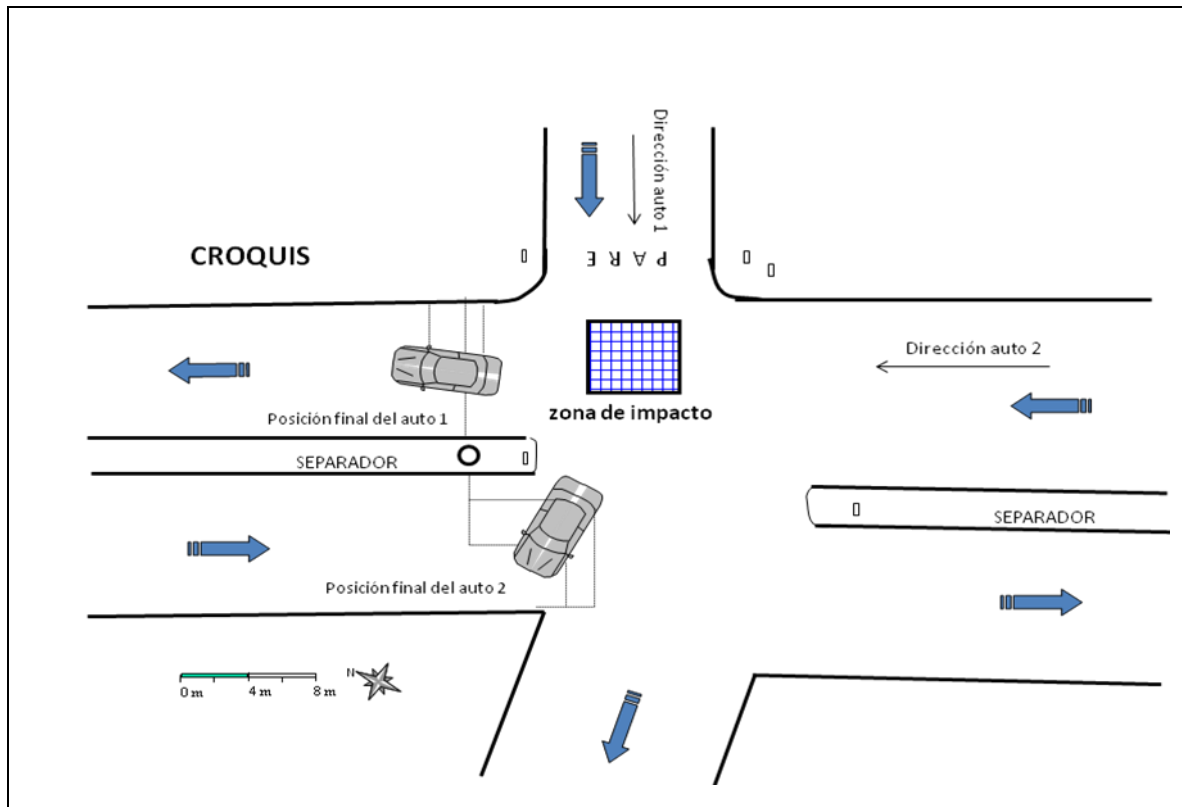
4. APLICACIÓN DEL MODELO

Para aplicar el modelo planteado en la sección anterior nos basamos en la evidencia objetiva, constituida por el registro fotográfico de los vehículos que colisionaron, el croquis de la escena del accidente y el acta de levantamiento.

4.1 ZONA DE IMPACTO

El croquis permite establecer con precisión la posición final de los vehículos en la escena del accidente así como su orientación y todo aquello comprendido dentro de la escena de accidente que tenga alguna incidencia en los cálculos a desarrollar. Sin embargo el croquis no puede determinar el punto exacto donde ocurrió la colisión entre los dos vehículos. Por esta razón el re constructor con base al croquis, la evidencia presentada en el mismo, como huellas de frenado, restos de carrocería desprendidos en la colisión, obstáculos presentes en la escena del accidente entre otros y usando su experiencia, determina una zona de impacto, la cual gráficamente se puede representar como una matriz cuadrada de puntos como se muestra en el siguiente croquis (figura 6).

Figura 6. Croquis de la escena del accidente de tránsito que muestra la zona de impacto de la colisión



El modelo se aplica a cada punto de la matriz de la zona de impacto generando una matriz de pre impacto para cada vehículo. Con base en estas matrices se determina el rango de velocidades pre impacto de cada uno de los automóviles. Debido a la cantidad de puntos a evaluar en la matriz zona de impacto, se desarrollo un pequeño programa en lenguaje C++ el cual incorpora el modelo facilitando y agilizando el cálculo de las velocidades pre impacto.

Como se observa en la ecuación (28), el cálculo de la velocidad pos impacto, es función de la distancia total que se desplaza el automóvil después de la colisión y del coeficiente de fricción aplicado. La distancia total de desplazamiento es proporcional a las dimensiones de la zona de impacto que se adopte, por tal razón

a mayor dimensión de la zona de impacto, mayor será el rango de valores para la velocidad pre impacto. Zonas de impacto grandes, generan aumento del rango de velocidades pre impacto. Lo ideal es introducir la posición exacta donde ocurrió la colisión para cada uno de los vehículos y obtener un rango de valores de velocidades solo con base en el rango del coeficiente de fricción que se adopte. Sin embargo, esto es técnicamente imposible.

El modelo actual con que trabaja el INMLCF toma la zona de impacto de forma arbitraria, algunos modelos de reconstrucción presentados en la literatura toman un rango de metro y medio con respecto a un punto fijo [11], y para el caso general de los programas de reconstrucción en el mercado, se establecen un punto exacto para evaluar. Este modelo adopta una zona de impacto de nueve metros cuadrados.

4.2 EES`s

La obtención de los EES`s se hace a través de la comparación de los registros gráficos de los autos que colisionan y la base de datos de colisiones controladas con que cuenta el Instituto. De esta forma se establece un rango de valores de EES`s para cada vehículo.

Los EES's son utilizados para el cálculo de la energía o pérdida de energía debido a la deformación no elástica de las estructuras de los coches. Para los modelos o programas modernos de reconstrucción como por ejemplo el ED-CRASH o PC – CRASH [13] entre otros, esta energía se calcula a través de las medidas de deformación de las estructuras, las cuales se aplican a fuerzas de deformación con coeficientes de deformación empíricos ya establecidos que al ser integradas sobre toda el área o volumen de deformación, se obtiene un valor de energía único.

El modelo desarrollado establece un valor único promedio, a partir del rango de los EES`s de cada vehículo calculado a través de la comparación de los registros gráficos de daños con la base de datos del INMLCF.

4.3 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

El coeficiente de fricción de rodamiento libre es un valor único, por tal razón se ha tomado un rango pequeño inicial de 0.15 – 0.2, y se modifica de acuerdo a las exigencias de las pruebas o resultados, según lo considera el reconstructor, evitando una ampliación en el rango de velocidades pre impacto calculadas.

4.4 MODELO UTILIZADO POR EL INMLCF

El modelo actual utilizado por el INMLCF hace uso de las ecuación (4), (12) y (28), para el calculo de las velocidades pre y pos impacto de los vehículos que colisionan, sin distinguir entre un movimiento pos impacto de rotación traslación o uno de libre rodamiento. Su cálculo se basa en el uso de un coeficiente (un rango) de libre escogencia por parte del reconstructor de acuerdo a las características del choque.

5. PRUEBAS ANALIZADAS

El modelo fue aplicado a cinco pruebas controladas presentadas en el artículo, **Data from Five Staged Car Collisions and Comparison with Simulations** [14], el cual presenta cinco colisiones tipo automóvil - automóvil con su registro gráfico de daños y especificaciones técnicas de cada uno de los autos que colisionaron, croquis a escala de cada accidente con registro de huellas y el desplazamiento de los autos en su movimiento pos impacto hasta el reposo.

De igual forma se aplicó a tres expedientes investigados por el INMLCF, los cuales viene con su respectivo croquis y registro fotográfico para cada automóvil.

Para las pruebas controladas se ha utilizado el coeficiente de fricción reportado por las mismas y para los expedientes del instituto se utilizó un rango de acuerdo a los valores reportados en tablas [11]. Las tablas siguientes muestran los parámetros técnicos generales de cada prueba, dados por posiciones finales, orientaciones iniciales y finales (para el caso de un movimiento de rotación pos impacto), la masa de los vehículos, el ángulo de giro que sufre en el movimiento rotacional, los EES's de cada vehículo, la distancia entre ejes y la trocha. En todas las pruebas se utiliza la siguiente notación: (θ_f) orientación final, (θ_i) orientación inicial, (X_f) posición final en el eje x, (Y_f) posición final en el eje y, $(\Delta\theta)$ ángulo de rotación, (w) distancia entre ejes y (t) la trocha. Todos los cálculos se hacen en unidades de sistema internacional.

5.1 DATOS DE LAS PRUEBAS CONTROLADAS

Prueba #1 ($\mu_t = 0.8$)

La colisión se desarrolla entre un automóvil Chevrolet Sprint a $V = 6.7$ [m/s] y un Datsun 200SX a $v = 15.6$ [m/s], que se desplazan sobre asfalto seco. El

movimiento pos impacto del sprint se asume de roto traslación hasta el reposo y el del Datsun es un movimiento de rodamiento libre hasta el reposo.

Figura 7. Posición relativa de colisión entre los vehículos. Datsun 200SX y Chevrolet Sprint

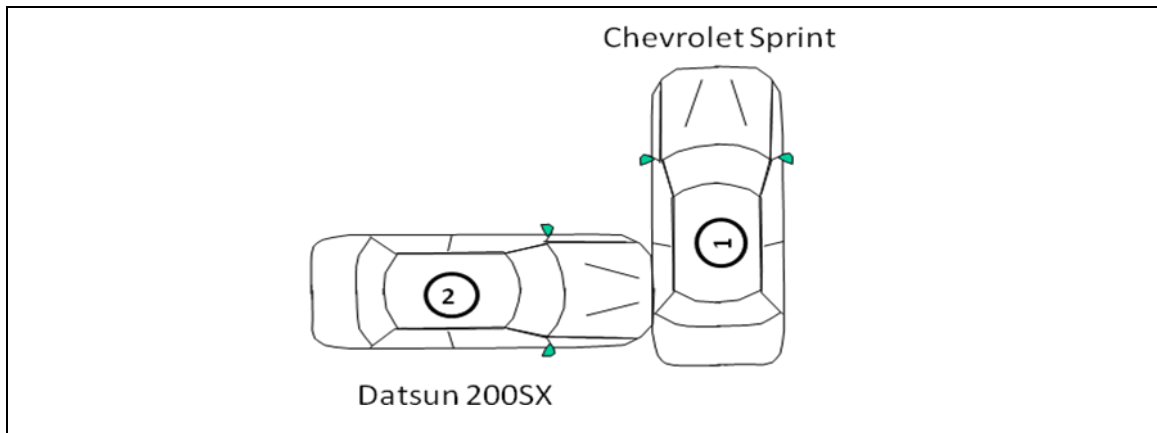


Tabla 3. Parámetros del movimiento de los vehículos Sprint y Datsun

AUTO	X_f	Y_f	θ_i	θ_f	MASA	$\Delta\theta$	EES	w	t
Sprint	14.1	12.0	90	380	660	290	7.638	2.23	1.3
Datsun	44.2	16.5	0	16.7	1318	X	3.748	X	X

Prueba #2 ($\mu_t = 0.79$)

La colisión se desarrolla entre un automóvil Toyota Corolla a $V = 12.1$ [m/s] y un Chevrolet Cavalier a $v = 12.3$ m/s, sobre superficie de asfalto seco. El movimiento pos impacto del auto Corolla según muestra el croquis, es de una roto traslación seguida por un desplazamiento lineal. El cavalier se desplaza libremente hasta el reposo después de la colisión.

Figura 8. Posición relativa de colisión entre los vehículos. Toyota Corolla y Chevrolet Cavallier

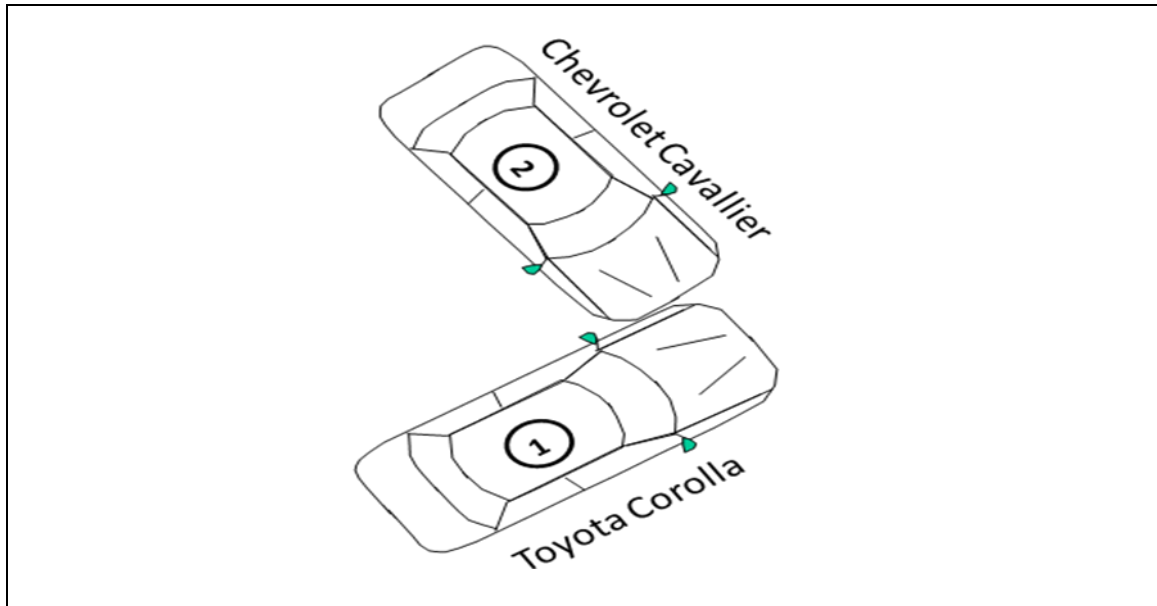


Tabla 4. Parámetros del movimiento de los vehículos Corolla y Cavallier

AUTO	X_f	Y_f	θ_i	θ_f	MASA	$\Delta\theta$	EES	w	t
Corolla	14.1	9.8	381	341	1100	40	6.944	2.38	1.37
Cavallier	29.1	15.4	290	18	1190	X	4.166	X	X

Prueba #3 ($\mu_t = 0.72$)

La colisión se desarrolla entre un automóvil Volkswagen Jetta a $V = 5.3$ [m/s] y un Pontiac Parisienne a $v = 12.1$ [m/s], sobre asfalto seco. El movimiento pos impacto de Volkswagen según croquis es de una roto traslación seguida de un desplazamiento libre hasta el reposo. El Pontiac se desplaza libremente hasta el reposo después de la colisión.

Figura 9. Posición relativa de colisión entre los vehículos. Volkswagen Jetta y Pontiac

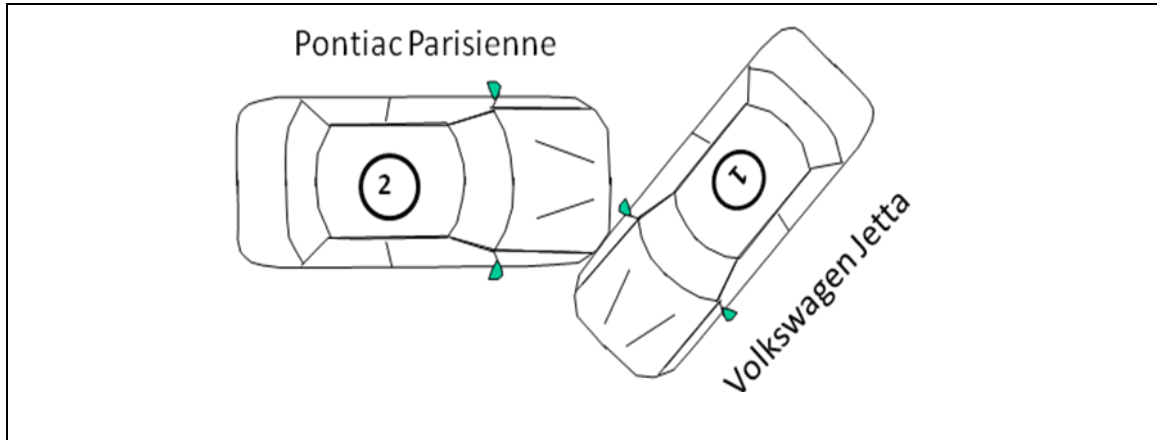


Tabla 5. Parámetros del movimiento de los vehículos Jetta y Pontiac

AUTO	X_f	Y_f	θ_i	θ_f	MASA	$\Delta\theta$	EES	w	t
Jetta	15.6	7.9	226	162	1150	64	7.638	2.46	1.42
Pontiac	32.4	6.6	0	-26	2100	X	6.110	X	X

Prueba #4 ($\mu_t = 0.72$)

La colisión se desarrolla entre un automóvil Audi 5000 a $V = 7.3$ [m/s] y un Volvo 264 a $v = 14.0$ [m/s], sobre asfalto seco. El movimiento pos impacto de Audi según croquis es de una roto traslación hasta el reposo. El volvo se desplaza libremente hasta el reposo después de la colisión.

Figura 10. Posición relativa de colisión entre los vehículos. Audi 5000 y Volvo 264

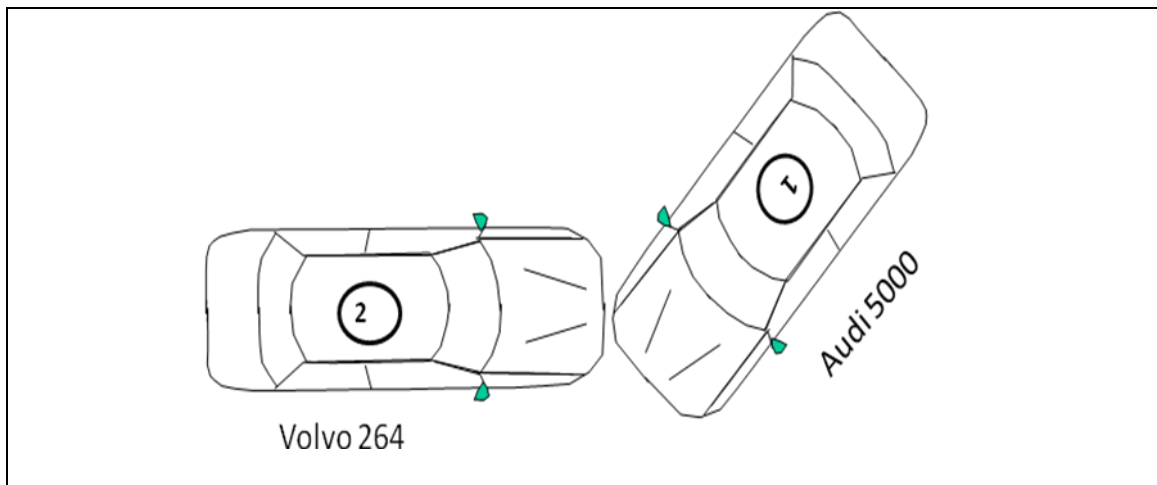


Tabla 6. Parámetros del movimiento de los vehículos Audi y Volvo

AUTO	X_f	Y_f	θ_i	θ_f	MASA	$\Delta\theta$	EES	w	t
Audi	13.4	6.4	226	300	1413	74	6.111	2.69	1.5
Volvo	8.2	8.6	0	336	1565	X	6.111	X	X

Prueba #5 ($\mu_t = 0.72$)

La colisión se desarrolla entre un automóvil Volvo 264 a $V = 5.2$ [m/s] y un Pontiac 6000 a $v = 12.3$ [m/s], sobre asfalto seco. El movimiento pos impacto de Volvo según croquis es de una roto traslación seguida de un desplazamiento libre hasta el reposo. El Pontiac se desplaza libremente hasta el reposo después de la colisión.

Figura 11. Posición relativa de colisión entre los vehículos. Volvo 264 y Pontiac 6000

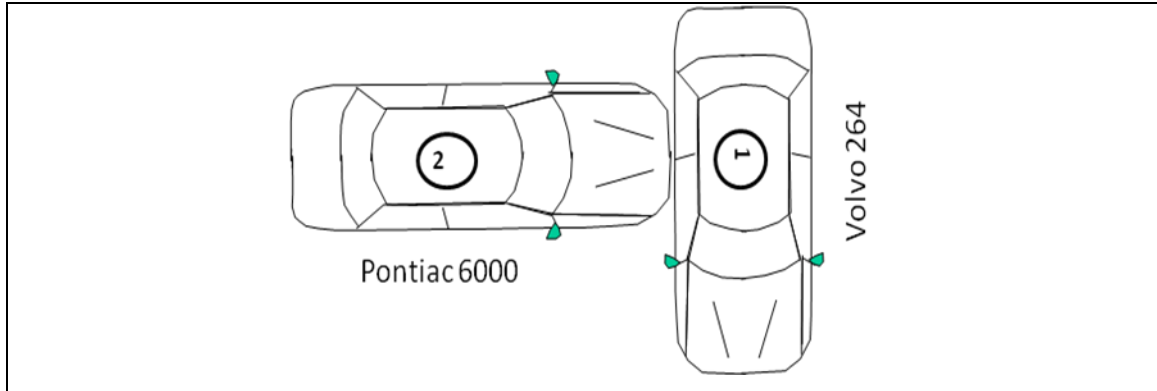


Tabla 7. Parámetros del movimiento de los vehículos Volvo y Pontiac

AUTO	X_f	Y_f	θ_i	θ_f	MASA	$\Delta\theta$	EES	w	t
Volvo	18.6	5.3	270	148	1565	122	4.721	2.64	1.4
Pontiac	38.2	7.3	0	-16	1350	X	3.332	X	X

5.2 EXPEDIENTES DEL INMLCF

Expediente #1

La colisión se desarrolla entre un automóvil Mazda 626 (1) y un Renault 12 (2) sobre asfalto mojado, y se toma un coeficiente de fricción en el rango de [0.45 - 0.6]. El movimiento pos impacto del Mazda según croquis es de una roto traslación hasta el reposo. El Renault 12 se desplaza libremente hasta el reposo después de la colisión.

Figura 12. Posición relativa de colisión entre los vehículos. Mazda 626 y Renault 12

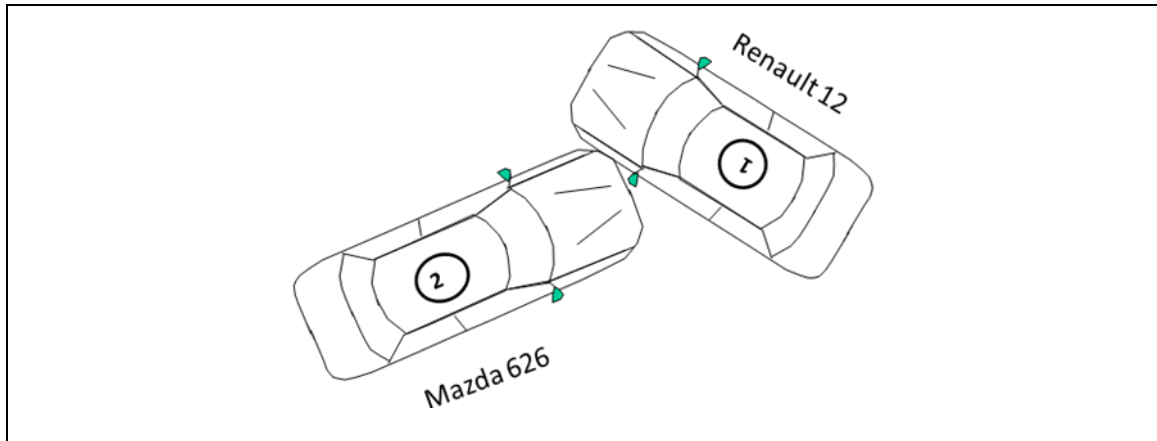


Tabla 8. Parámetros del movimiento de los vehículos Mazda y Renault

AUTO	X_f	Y_f	θ_i	θ_f	MASA	$\Delta\theta$	EES	w	t
Mazda	20	3.5	340	490	1266	150	14.6	2.6	1.47
Renault	19.5	9	145	x	1045	X	14.6	X	X

Expediente #2

La colisión se desarrolla entre un automóvil Sprint (1) y un Mazda 323 (2) sobre asfalto mojado, y se toma un coeficiente de fricción en el rango de [0.45 -0.6]. Tanto el Sprint como el Mazda sufren un movimiento pos impacto de roto traslación hasta el reposo.

Figura 13. Posición relativa de colisión entre los vehículos. Sprint y Mazda 323

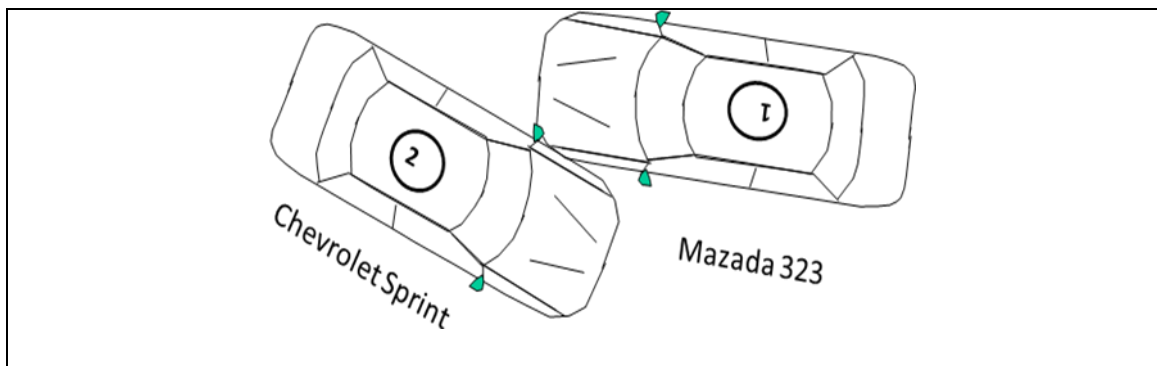


Tabla 9. Parámetros del movimiento de los vehículos Sprint y Mazda

AUTO	X_f	Y_f	θ_i	θ_f	MASA	$\Delta\theta$	EES	w	t
Sprint	9.8	1.4	335	425	900	90	8.333	2.23	1.3
Mazda	2.2	11.6	170	325	1085	155	8.333	2.4	1.4

Expediente #3

La colisión se desarrolla entre un automóvil Hyundai (1) y un Chevrolet Corsa (2) sobre asfalto seco, y se toma un coeficiente de fricción en el rango de [0.7 -0.8]. El movimiento pos impacto del Hyundai según croquis es de una roto traslación hasta el reposo. El Corsa se desplaza libremente hasta el reposo después de la colisión.

Figura 14. Posición relativa de colisión entre los vehículos. Hyundai y Chevrolet Corsa

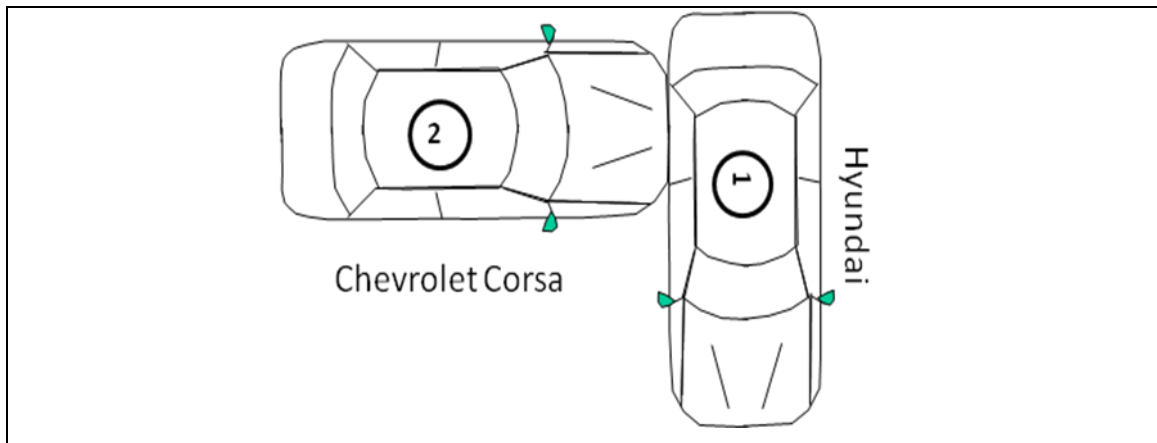


Tabla 10. Parámetros del movimiento de los vehículos Hyundai y Chevrolet

AUTO	X_f	Y_f	θ_i	θ_f	MASA	$\Delta\theta$	EES	w	t
Hyundai	5.6	1.8	270	150	1100	120	6.944	2.4	1.42
Corsa	5.2	3.8	0	X	950	X	5.555	X	X

Los parámetros que no son necesarios para el cálculo de la velocidad pre impacto del automóvil son marcados con una X.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos al aplicar el modelo actual del INMLCF (modelo 2) y el modelo acá desarrollado (modelo 1) se presentan a continuación para su análisis.

6.1 PRUEBAS CONTROLADAS

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en el cálculo de velocidades pre impacto de las colisiones analizadas y las velocidades reales de los automóviles para las pruebas controladas. El coeficiente de fricción esta dado para cada colisión. El modelo 1 hace a referencia al modelo acá desarrollado, y el modelo 2 hace referencia al modelo actual Utilizado por el INMLCF.

Tabla 11. Velocidades calculadas de las pruebas controladas

<i>Colisión</i>	<i>Automóviles</i>	<i>Velocidades pre impacto del modelo 1 (m/s)</i>	<i>Velocidades pre impacto modelo 2 (m/s)</i>	<i>Velocidades reales (m/s)</i>
Prueba #1	Sprint	6.66 – 8.82	6.38 – 8.88	6.7
	Datsun	13.48 – 16.21	8.05 – 9.16	15.6
Prueba #2	Corolla	8.66 -12.18	10.0 – 12.0	12.3
	Cavallier	7.58– 13.54	7.5 - 10	12.1
Prueba #3	Jetta	2.62 – 5.86	5.55 – 6.66	5.3
	Parisienne	10.86 – 12.77	7.5 – 8.05	12.1
Prueba #4	Audi	3.21 – 8.18	2.67 – 6.94	7.3
	Volvo	9.88 – 13.64	6.38 – 11.9	14.0
Prueba #5	Volvo	2.85 – 6.30	2.77 – 3.88	5.2
	Pontiac	11.82 – 13.34	8.16 – 9.44	12.3

Para la prueba # 1 el rango de velocidades del Sprint es muy parecido para los dos modelos, y el valor real de velocidad esta dentro de los dos rangos. Por el contrario el caso del Datsun el modelo 1 genera un rango el cual incluye el valor real de velocidad pre impacto, mientras que el modelo 2, genera un rango que no incluye el valor real y esta muy alejado del mismo.

Para la prueba # 2 el rango de velocidades del Corolla es muy parecido para los dos modelos, pero ninguno de los dos resultados incluye el valor real de velocidad. Sin embargo los dos rangos generan valores que están muy cerca del valor real. Para el caso del Cavallier el modelo 1 genera un rango que incluye el valor real de velocidad, mientras que el modelo 2 no incluye el valor real en el rango generado y esta un poco alejado.

Para la prueba # 3 el rango de velocidades del Jetta generado por el modelo 1 incluye el valor real y el rango generado por el modelo 2 está muy cercano pero no lo incluye. Para la velocidad del Parisienne, el modelo1 genera un rango que incluye el valor real mientras que el modelo 2 no lo incluye y esta alejado del valor real.

Para la prueba # 4 el rango de velocidades del Audi generado por el modelo 1 incluye el valor real, mientras que el modelo 2 no lo incluye aunque esta muy cerca. Para el caso del volvo ninguno de los dos modelos generan un rango el cual incluya el valor real de velocidad pre impacto, sin embargo el rango generado por el modelo 1 se acerca más del valor real.

Para la prueba # 5 el rango de velocidades del Volvo generado por el modelo 1 Incluye el valor real, mientras que el modelo 2 no lo incluye. Para la velocidad del Pontiac, el modelo1 genera un rango que incluye el valor real mientras que el modelo 2 no lo incluye y esta un poco alejado.

6.2 EXPEDIENTES DEL INMLCF

Los expedientes analizados, por ser de colisiones reales no presentan las velocidades reales pre impacto de los autos.

Tabla 12. Velocidades calculadas de los expedientes

Colisión	Automóviles	Velocidades pre impacto del modelo 1 (m/s)	Velocidades pre impacto modelo 2 (m/s)
Expediente #1	Mazda 626	20.75 – 24.5	18.33 – 24.16
	Renault 12	7.11 – 10.56	7.22 – 15.0
Expediente #2	Sprint	2.54 – 4.45	0.0 – 13.05
	Mazda 323	16.07 – 19.29	8.88 – 24.166
Expediente #3	Hyundai	8.31 – 13.05	6.66 – 9.44
	Chevrolet Corsa	8.67 – 13.36	9.44 – 15.0

Para el expediente #1 el rango de velocidades generados por los dos modelos es muy similar, con la diferencia que para el Renault 12, el rango del modelo 2 es mas amplio que del modelo 1 generando mas incertidumbre.

Para el expediente #2 el rango de velocidades generados por los dos modelos es totalmente diferente. El modelo 1 genera unos rangos pequeños aceptables, mientras que el modelo 2 genera unos rangos de mas de 13 (m/s) de amplitud, creando mayor incertidumbre en la determinación de las velocidades pre impacto de los autos, y con la particularidad, que para el sprint el rango de velocidades parte de un valor a 0.0 (m/s) según el modelo 2.

Para el expediente #3 el rango de velocidades generado para los dos automóviles es razonable. Para el Hyundai el rango de valores del modelo 1 estas en valores mayores a los del modelo 2, mientras que para el Chevrolet, el rango de valores es muy similar.

CONCLUSIONES

- La reconstrucción analítica de accidentes de tránsito tipo Vehículo – Vehículo es un campo muy desarrollado de la física forense en algunos países, ya que esta ha permitido la generación de dictámenes mas confiables en al campo judicial.
- A nivel nacional el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, organismo encargado de dar soporte técnico científico a la justicia en estos tipos de accidentes, debe hacer esfuerzos para desarrollar proyectos de investigación que permitan el desarrollo de modelos más confiable y acordes con la realidad y el avance que al tema de física forense se le ha dado a nivel mundial.
- La inclusión de la energía de rotación en el modelo de reconstrucción, mejoró considerablemente las velocidades pre impacto calculadas de los auto en las pruebas controladas según los resultados obtenidos, y para el caso donde el rango de valores no incluía el valor real, este estaba muy próximo y nunca mostró menor certeza que al rango expuesto por el modelo actual del INMLCF.
- Para el caso de los expedientes analizados el modelo desarrollado muestra unos rangos de velocidades pre impacto más coherente y justos que los expuestos por el modelo actual del INMLCF. Dándole más credibilidad y certeza a las velocidades pre impacto calculadas con el modelo acá desarrollado.
- El modelo desarrollado para la reconstrucción del accidente tipo automóvil – automóvil permitió un mejor entendimiento a la complejidad de la reconstrucción de accidentes de transito, generando pautas y caminos para futuras investigaciones en el tema.

- Se fortalece el vinculo entre la universidad industrial de Santander y el Instituto Nacional de Medicina Legal para el desarrollar de investigaciones que le permitan al Instituto mejorar sus dictámenes a la hora de impartirse justicia y a la universidad hacer un aporte directo en beneficio de la sociedad.

REFERENCIAS

- [1] <http://www.nhtsa.dot.gov/>, “National Highway Traffic Safety Administration”.
- [2] <http://www.sae.org> “Society of Automobile Engineering”.
- [3] <http://www.dsd.at/PCCrash.htm> , <http://www.mchenrysoftware.com/>
- [4] <http://www.col.ops-oms.org>, Organización Mundial de la Salud.
- [5] **FORENSIS** “datos para la vida”. Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. Herramientas para la interpretación, intervención y prevención de lesiones de causa externa en Colombia, 2007.
- [6] M.R JOUVENCEL. “Biocinemática del Accidente de Transito”. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos S.A, 2000.
- [7] Terry D. Day and Randall L. Hargens. “An Overview of the way EDCRASH Computes Delta - V” Engineering Dynamics Corp. SAE 1987. International congress exposition, Detroit, Michigan, Febrero 1987.
- [8] Wolfgang Hugemann “An introduction to the mechanics of collision”, Curso de Reconstrucción de Accidentes. Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. Bogotá, Colombia 1992.
- [9] Ing. Anibal O. Garcia Movimientos de Roto traslación, Aplicación del Momento Resistente al cálculo de Energía Cinética en las Estimaciones de Velocidad.
- [10] William E. Cliff and James J. Bowler. The Measured Rolling Resistance of Vehicles for Accident Reconstruction. MacInnis Engineering Associates (MEA), SAE 1998.
- [11] LIMPET R. Motor Vehicle Reconstruction and cause analysis, Matthew Bender and Company, inc., 1999.
- [12] Ernesto N. Martinez. Cálculo de cotas de error en accidente logia usando la técnica de Monte, Instituto Balseiro, UN Cuyo Centro Atómico Bariloche, CNEA 8400 Bariloche, Argentina, Abril, 2003.
- [13] Brian G. Mc Henry. McHenry Software, The Algorithms of Crash. 2001.
- [14] Mark N. Bailey, Jonathan M Lawrence, Stuart J. Fowler. MacInnis

Data from Five Staged Car Collisions and Comparison with Simulations.
Engineering Associates, Ltd. 2000.

[15] CABELLOS MARTINEZ, Malka Irina y ROJAS REINA, John Filman.
Validación de la prueba: distancia de lanzamiento para la reconstrucción analítica
de la Colisión vehículo – peatón. Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad
Industrial De Santander - Facultad de Ciencias, Escuela de Física, 2005.