



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Tesis previa a la obtención del Título de
INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ

TEMA

“PROPUESTA DE UN MODELO PARA PERITAJE DE
SINIESTROS DE VEHICULOS LIVIANOS”

AUTOR

David Enrique Santos León

DIRECTOR

Ing. Fredy Tacuri

CUENCA - ECUADOR

2013

CERTIFICACIÓN

Yo, Ingeniero Fredy Tacuri, profesor de la Universidad Politécnica Salesiana, de la Facultad de Ingenierías, certifico que el presente trabajo de Tesis ha sido realizado íntegramente por el señor David Enrique Santos León bajo mi supervisión. Por cumplir todos los requisitos autorizo su presentación.



Ing. Fredy Tacuri

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, SANTOS LEÓN DAVID ENRIQUE

DECLARO QUE:

El Proyecto de Grado titulado: “**PROPUESTA DE UN MODELO PARA PERITAJE DE SINIESTROS DE VEHICULOS LIVIANOS**” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme citas, cuyas fuentes se incorporan en bibliografía consecuentemente el presente trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración me responsabilizo del contenido veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención y autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana el uso de la misma con fines académicos.

Cuenca, 25 de febrero del 2013.



David Enrique Santos León

C.I. 0104997218

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres Enrique Santos J. y Marcia León T. quienes con su apoyo han sido una guía para formarme como un ser humano de íntegros valores. Dedico igualmente a mis hermanos Ernesto y Daniel, así como también a mi esposa Liz y mi hija Raffaella.

Por último quisiera dedicarlo al Max 5 el cual fue la inspiración para desarrollar el presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por su apoyo durante toda mi formación profesional, Enrique, Marcia, Ernesto, Daniel, quienes aparte de su apoyo incondicional hicieron llevaderos los varios años de estudio.

Agradezco a mi esposa Liz por su grata compañía, y además por su ayuda con la elaboración de varios gráficos de este estudio.

Agradezco a mi hija Raffaella quien con sus llantos me tuvo despierto avanzando la última parte de este estudio.

Agradezco a Zeus y a Eko por su compañía y cariño en esos días en que no se veía fin a las horas de estudio.

Agradezco al Max 5 que estuvo ahí cuando lo necesitaba.

Agradezco a mi director de tesis Ing. Fredy Tacuri quien aparte de su guía me permitió realizar este estudio con libertad, permitiendo lograr un trabajo de mi completa satisfacción.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	13
1. INTERACCION ENTRE EL VEHÍCULO LIVIANO Y SU ENTORNO COMO ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL ACCIDENTE DE TRÁNSITO.	13
1.1. SEGURIDAD ACTIVA.....	13
1.2. SEGURIDAD PASIVA.	15
1.3. PROBLEMÁTICA EN LA SEGURIDAD ACTIVA.....	15
1.3.1. CAUSAS RELATIVAS AL ENTORNO DEL VEHÍCULO.....	15
1.3.2. CAUSAS RELATIVAS AL VEHÍCULO.	16
1.3.3. CAUSAS RELATIVAS AL FACTOR HUMANO.....	16
1.3.4. CAUSAS RELATIVAS AL MANEJO Y LAS NORMAS DE CIRCULACIÓN.....	16
1.4. EL VEHÍCULO Y SU VELOCIDAD.	17
1.5. RELACIÓN ENTRE EL FACTOR HUMANO Y LA SEGURIDAD ACTIVA.	19
1.5.1. TIEMPO DE PERCEPCIÓN, DECISIÓN Y REACCIÓN.	20
1.5.1.1. ENSAYOS REALIAZADOS PARA OBTENER EL TIEMPO PDR.....	20
1.6. INTERACCIÓN ENTRE EL VEHÍCULO Y SU ENTORNO.....	21
1.6.1. CÍRCULO Y ELIPSE DE ADHERENCIA.	22
1.6.1.1. ELIPSE DE ADHERENCIA IDEALIZADA.....	23
1.7. FENÓMENO DE AQUAPLANING.	25
1.8. DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA VÍA.	26
1.8.1. DISEÑO DE VÍAS. RECTAS.....	27
1.8.2. DISEÑO DE VÍAS. CURVAS.	27
VISIBILIDAD Y CAMPO DE VISIÓN.	29
1.9.1. DISTANCIA DE PARADA.	30
1.9.2. VISIBILIDAD DE PARADA.	30
1.9.3. VISIBILIDAD DE ADELANTAMIENTO.	30
1.9.4. VISIBILIDAD DE CRUCE.	31
1.9.5. VISIBILIDAD EN CURVAS CIRCULARES.....	31
CAPÍTULO II.....	32
2. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE LA CIRCULACIÓN DEL VEHÍCULO LIVIANO EN RECTA Y EN CURVA PARA REALIZAR LA MECÁNICA DE LA COLISIÓN.....	32
2.1. CIRCULACIÓN EN RECTA.....	32
2.1.1. FUERZAS LONGITUDINALES.	32
2.1.1.1. FUERZAS GRAVITATORIAS.	33
2.1.1.2. FUERZAS DE RESISTENCIA AERODINÁMICA.	34

2.1.1.3. FUERZAS DE RESISTENCIA A LA RODADURA.	34
2.1.2. ACELERACIÓN UNIFORME.	35
2.1.3. ÁNGULO Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN EQUIVALENTE.	36
2.1.4. MOVIMIENTO DE AVANCE DEL VEHÍCULO.	37
2.1.4.1. FUERZA DE TRACCIÓN.	37
2.1.4.1.1. FUERZA DE TRACCIÓN EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS.	37
2.1.4.1.2. FUERZA DE TRACCIÓN EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS EXTRÍNSECAS.	38
2.1.5. DISTANCIA DE PARADA.	41
2.1.5.1. DISTANCIA A PARTIR DE LA VELOCIDAD.	42
2.1.5.2. VELOCIDAD A PARTIR DE LA DISTANCIA.	42
2.1.6. MOVIMIENTO CON ACELERACIÓN NO UNIFORME.	42
2.2. CIRCULACIÓN EN CURVA.	44
2.2.1. MOVIMIENTO CIRCULAR.	45
2.2.2. MOVIMIENTO CIRCULAR CON DESACELERACIÓN.	47
2.2.3. DERRAPE Y VUELCO EN CURVA.	47
2.2.3.1. VELOCIDAD LIMITE DE DERRAPE.	48
2.2.3.2. VELOCIDAD LIMITE DE VUELCO.	50
2.2.3.3. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD LÍMITE DE VUELCO EN DESLIZAMIENTO LATERAL.	51
2.2.3.4. ADHERENCIA LATERAL EN CIRCULACION EN CURVA.	52
2.2.4. CAIDA AL VACIO.	52
2.3. ANALISIS CINEMATICO Y DINAMICO DE LA CIRCULACION VEHICULAR EN LA RECONSTRUCCION DE ACCIDENTES DE TRANSITO.	54
CAPÍTULO III	55
3. PROPUESTA DE UN MODELO PARA PERITAJE DE SINIESTROS DE VEHICULOS LIVIANOS.	55
3.1. LEVANTAMIENTO DE LA ESCENA DEL ACCIDENTE.	55
3.1.1. RECOLECCION DE EVIDENCIA A PARTIR DE LA ESCENA DEL ACCIDENTE.	57
3.1.2. RECOLECCION DE EVIDENCIA A PARTIR DE LOS VEHICULOS SINIESTRADOS.	60
3.2. RECONSTRUCCION DEL SINIESTRO VEHICULAR.	62
3.2.1. RECONSTRUCCION MATEMATICA DEL ACCIDENTE EN BASE A LA DEFORMACION PERMANENTE.	62
3.2.1.1. COLISION CENTRADA.	64
3.2.1.2. COLISION DESCENTRADA.	65

3.2.1.3. COEFICIENTE DE RESTITUCION CR	65
3.2.1.4. COHEFICIENTE DE RESTITUCION EQUIVALENTE.....	67
3.2.1.5. RELACION ENTRE ENERGIA ABSORBIDA Y DEFORMACION PERMANENTE.....	67
3.2.1.6. DIRECCION PRINCIPAL DE LA FUERZA DE COLISION.....	69
3.2.1.7. ENERGIA DE DEFORMACION TOTAL.....	71
3.2.1.8. <i>Delta-v</i> (Δv) Y VELOCIDAD INICIAL.....	72
3.2.1.9. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD INICIAL.....	73
3.2.2. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD A PARTIR DE HUELLAS DE NEUMATICOS.....	75
3.2.2.1. TIPOS DE MARCAS DE NEUMATICOS EN LA CALZADA.....	75
3.2.2.2. CALCULO DE LA VELOCIDAD A PARTIR DE MARCAS DE NEUMATICOS.....	77
3.3. RECONSTRUCCION DE LA EVOLUCION ESPACIO-TIEMPO DEL ACCIDENTE.....	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
BIBLIOGRAFIA.....	80
ANEXOS.....	82
ANEXO A.....	83
ANEXO B.....	86
ANEXO C.....	102
ANEXO D.....	107

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1.1. Límites de velocidad en el Ecuador.	14
Fuente: (Asamblea Nacional Constituyente, 2012)	
Tabla 1.2. Tiempos de reacción según varios autores.	16
Fuente: (Luque & Mantaras, 2007) pág. 7.	
Tabla 1.3. Rangos de coeficientes de fricción para un neumático bloqueado y deslizándose por diferentes condiciones de camino.	20
Fuente: (Branch & Branch, 2011) pág. 40.	
Tabla 1.4 % de peralte en relación al radio y tipo de vía.	25
Fuente: (Luque & Mantaras, 2007) pág. 97.	
Tabla 1.5 Distancias mínimas de visibilidad (m) recomendables.	27
Fuente: (Luque & Mantaras, 2007) pág. 117.	

INDICE DE GRAFICOS

CAPÍTULO I

Figura 1.1. Margen de seguridad activa.	14
Fuente: (Luque & Mantaras, 2007) pág. 5.	
Figura 1.2. Pérdida de margen de seguridad activa.	14
Fuente: (Luque & Mantaras, 2007) pág. 7.	
Figura 1.3. Sistema de coordenadas del neumático, componentes de fuerzas y momentos.	22
Fuente: (Branch & Branch, 2011) pág. 16.	
Figura 1.4. Elipse de adherencia.	23
Fuente: El autor.	
Figura 1.5. Efecto de la velocidad y el espesor de la capa de agua sobre el coeficiente de adherencia longitudinal.	23
Fuente: (Luque & Mantaras, 2007) pág. 79.	
Figura 1.6. Aceleraciones en un vehículo circulando por una curva peraltada.	28
Fuente: El autor.	
Figura 1.7. Visibilidad en curvas circulares.	31
Fuente: (Luque & Mantaras, 2007) pág. 121.	

CAPÍTULO II

Figura 2.1. Diagrama de cuerpo libre de un vehículo en tracción.	39
Fuente: El autor.	

Figura 2.2. Fuerzas que actúan sobre un vehículo circulando en curva. 49

Fuente: El autor.

CAPÍTULO III

Figura 3.1. Colisión centrada. 64

Fuente: El autor.

Figura 3.2. Colisión descentrada. 65

Fuente: El autor.

Figura 3.3. Relación entre el coeficiente de restitución y la velocidad. 66

Fuente: (Luque & Mantaras, 2007) pág. 282.

Figura 3.4. Bosquejo en dos dimensiones. 69

Fuente: El autor.

Figura 3.5. Dirección principal de la fuerza de colisión. 70

Fuente: El autor.

Figura 3.6. Determinación del centroide de colisión. 71

Fuente: (Luque & Mantaras, 2007) pág. 316.

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

CAPÍTULO III

Fotografía 3.1 Escena del accidente sin retirar elementos de la vía. 56

Fuente: http://www.elsalvador.com/mwedh/nota/nota_completa.asp?idCat=6358&idArt=5427295 (Recuperado 12-01-2013)

Fotografía 3.2 Escena de accidente dividida (vehículo). 56

Fuente: <http://mx.clasificados.com/compro-autos-accidentados-128231> (Recuperado 12-01-2013)

Fotografía 3.3 Escena de accidente dividida (lugar de los hechos). 56

Fuente: <http://www.motorzoom.es/mundo-auto/articulo/erat-reconstruccion-de-accidentes-de-trafico/17001/> (Recuperado 12-01-2013)

Fotografía 3.4 Marcas de aceite en la calzada. 58

Fuente: <http://elprogreso.galiciae.com/nova/58656.html> (Recuperado 12-01-2013)

Fotografía 3.5 Restos del vehículo en la calzada. 59

Fuente: El autor.

Fotografía 3.6 Marcas de ralladura en la calzada. 59

Fuente: http://www.heraldo.es/noticias/aragon/zaragoza_provincia/zaragoza/un_herido_volcar_coche_calle_maria_moliner_175931_301.html (Recuperado 12-01-2013)

Fotografía 3.7 Marcas de impacto en objetos fijos.....	59
Fuente: http://archivo.periodico.am/nota.aspx?id=382954 (Recuperado 12-01-2013)	
Fotografía 3.8 Marcas de neumáticos.	60
Fuente: http://fial1992.blogspot.com/2012/05/huellas-en-la-via-ide-ntificar-as_23.html (Recuperado 12-01-2013)	
Fotografía 3.9 Impacto lateral.	60
Fuente: http://distritofederal.evisos.com.mx/fotos-del-anuncio/subasta-de-coches-accidentados-y-de-recuperacion-salvamentos-1-id-277648 (Recuperado 16-01-2013)	
Fotografía 3.10 Impacto contra un objeto fijo e indeformable.....	61
Fuente: El autor.	
Fotografía 3.11 Impacto contra otro vehículo.....	61
Fuente: http://limacallao.olx.com.pe/compro-todo-tipo-de-vehiculos-chocados-iiid-327395162 (Recuperado 16-01-2013)	
Fotografía 3.12 Marcas de volcamiento.....	61
Fuente: http://clasificados.unosantafe.com.ar/Reconquista/Automotores/Autos/Compr-o-Autos-Chocados-6.html (Recuperado 16-01-2013)	
Fotografía 3.13 Medición de la deformación residual.....	69
Fuente: http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv20/07-0211-W.pdf (Recuperado 16-01-2013)	
Fotografía 3.14 Marcas de frenada.	75
Fuente: http://www.elcomercio.es/v/20110706/aviles/muere-nino-anos-atropellado-20110706.html (Recuperado 16-01-2013)	
Fotografía 3.15 Marcas de aceleración.....	76
Fuente: http://www.caranddriver.com/features/a-life-on-skid-road-crime-scene-investigation-page-2 (Recuperado 16-01-2013)	
Fotografía 3.16 Marcas de derrape.	76
Fuente: http://www.circulaseguro.com/categoria/estadisticas/record/10 (Recuperado 16-01-2013)	
Fotografía 3.17 Marcas combinadas frenada-derrape.....	76
Fuente: http://fial1992.blogspot.com/2012/05/huellas-en-la-via-ide-ntificar-las_23.html (Recuperado 16-01-2013)	

INTRODUCCIÓN

Nos encontramos en un entorno en el que todos los días suceden accidentes automovilísticos, parte de estos accidentes no van más allá de un simple arreglo monetario en el acto, pero existen otros siniestros que requieren de una investigación para determinar culpabilidad. Por lo general esta investigación se realiza cuando existen personas afectadas físicamente o cuando la pérdida material es elevada.

La base para iniciar la investigación del siniestro es partir por los testimonios de las personas involucradas y/o testigos, pero este detalle no siempre es fiable ya que sus interpretaciones de los hechos, en la mayoría de las veces suele ser subjetiva. Es por eso la necesidad de un estudio técnico el cual pueda corroborar o refutar dichos testimonios.

En base al análisis de las energías presentes en la colisión de vehículos livianos, de modelos matemáticos de varios autores y de la experiencia laboral, se ha creado un modelo de peritaje automotriz el cual si bien no es exacto, se aproxima a la realidad, logrando el objetivo de confirmar o refutar la información recopilada.

Para la elaboración de este trabajo investigativo se recopilieron más de una docena de casos pero debido a las características únicamente sirvieron para este estudio 3 casos los cuales se exponen en el Anexo B.

CAPÍTULO I

1. INTERACCION ENTRE EL VEHÍCULO LIVIANO Y SU ENTORNO COMO ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL ACCIDENTE DE TRÁNSITO.

Existen numerosas variables a analizar en un accidente de tránsito que comprometen al vehículo, su entorno y su conductor. Estas variables no serán iguales en dos accidentes ya que cada siniestro compromete una situación en particular. Entre las variables más destacables tenemos:

- Condiciones
- Climatológicas.
- Trazados de vía.
- Estado mecánico del vehículo.
- Condiciones físicas y mentales del conductor.

Antes del análisis de cualquier siniestro automotriz se debe entender la manera en la que interactúan los diversos elementos que intervienen en un accidente de tránsito para qué, de esta manera, se pueda realizar un análisis minuciosos y ordenado de la evidencia.

1.1. SEGURIDAD ACTIVA.

“La seguridad activa o primaria analiza y desarrolla los aspectos que afectan al control del automóvil contribuyendo a evitar el accidente” (Orovio, 2010, pág. 28). En la circulación del vehículo en óptimas condiciones, en todo momento está presente un margen de seguridad activa disponible que depende del conductor (factores físicos, mentales, etc.) y del vehículo (frenos, dirección, etc.).

Al momento en el que el vehículo empieza a moverse, se somete a una interacción con el entorno (la vía, vehículos cercanos, etc.), los cuales son un factor determinante para la necesidad de un margen de seguridad activa. “La distancia o separación entre los niveles de seguridad activa disponible y requerida se llaman “margen de seguridad activa”” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 5).

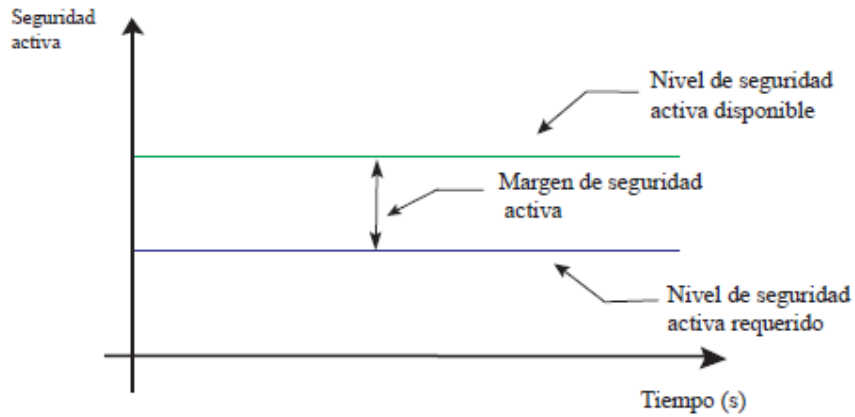


Figura 1.1. Margen de seguridad activa.

El nivel de seguridad activa no es constante debido a que las situaciones de circulación no siempre son las mismas. El nivel de seguridad activa disponible, cuando depende del conductor puede verse afectado por factores como el cansancio, una enfermedad, etc., y cuando depende del vehículo se verá afectado por fallos mecánicos, hidráulicos, etc., u otras condiciones externas como la lluvia, el estado de la calzada, etc.

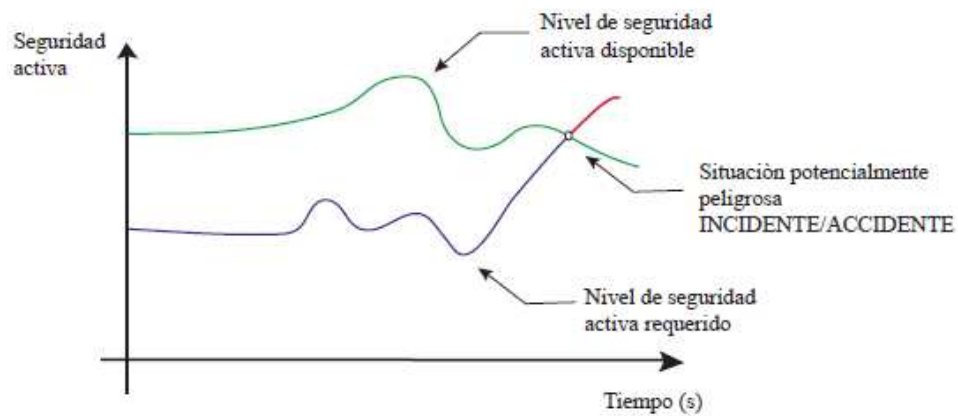


Figura 1.2. Pérdida de margen de seguridad activa.

Observando la figura 1.2 podemos apreciar que los niveles requeridos y disponibles no son constantes por lo que podemos deducir que, cuando el nivel de seguridad activa requerido es mayor que el disponible se está en una situación potencial de producirse un accidente.

1.2. SEGURIDAD PASIVA.

“Se entiende por seguridad pasiva todas aquellas condiciones, sistemas, elementos y factores que tienen por objeto minimizar los daños que ocasionan los accidentes de tráfico” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 7). Esta seguridad está en función de las siguientes variables:

- Conductor (postura, acciones defensivas, etc.)
- Vehículo (airbag, cinturón de seguridad, etc.)
- Entorno (sistemas de contención, tiempo de respuesta de equipos médicos, etc.)

1.3. PROBLEMÁTICA EN LA SEGURIDAD ACTIVA.

Son varios los elementos que influyen en la disminución del margen de seguridad activa. El momento en que se pierde este margen de seguridad es cuando las condiciones son propicias para la sucesión del accidente. Para el autor Pablo Luque, en su libro INVESTIGACION DE ACCIDENTES DE TRANSITO, los motivos por los cuales disminuye la seguridad activa se clasifican en 3 grupos:

- El entorno.
- El vehículo.
- El factor humano.

Pero se puede agregar un grupo más:

- El manejo y las normas de circulación.

1.3.1. CAUSAS RELATIVAS AL ENTORNO DEL VEHÍCULO.

Entre las principales variables y parámetros de importancia, tenemos:

- Diseño de vía.
- Mantenimiento de la vía.
- Intersecciones.
- Lugares donde puede influir la geometría de la vía (túneles, obras, etc.).
- Señalización (inadecuada).

1.3.2. CAUSAS RELATIVAS AL VEHÍCULO.

Diversos factores del vehículo tienen una incidencia directa en el accidente, entre los más importantes para este estudio tenemos:

- Condiciones técnicas.
- Carga.
- Ruedas.
- Sistema de frenado.
- Dirección.
- Sistema de suspensión.
- Motor, transmisión y sistemas adicionales.
- Interior, sistemas de control e información.
- Velocímetro, tacómetro, etc.
- Sistemas de seguridad pasiva.
- Sistemas de alumbrado.

1.3.3. CAUSAS RELATIVAS AL FACTOR HUMANO.

Cuando hablamos del factor humano hacemos referencia a aquel que tiene el control sobre el vehículo. Los problemas o alteraciones pueden provenir de diversos aspectos como son:

- Capacidades físicas (vista, oído, integridad física, etc.)
- Alteración mental (delirium, esquizofrenia, déficit de atención, etc.)
- Sustancias psicotrópicas (alcohol, drogas, medicamentos.)
- Negligencia al manejar (uso de teléfono celular, sobreestimación de habilidades como conductor, fatiga, etc.).

1.3.4. CAUSAS RELATIVAS AL MANEJO Y LAS NORMAS DE CIRCULACIÓN.

En nuestro país la circulación de los vehículos está regulada por la “LEY ORGANICA DE TRANSPORTE TERRESTRE, TRÁNSITO Y SEGURIDAD VIAL 2012” (Asamblea Nacional Constituyente, 2012), el incumplimiento de las

normas vigentes tiene sus respectivas sanciones, entre las normas de interés para este estudio se encuentran:

TITULO III

CAPITULO II

Art. 172.- Se prohíbe la circulación de un vehículo con los neumáticos en mal estado (roturas, lisas, deformaciones), o cuya banda de rodadura tenga un labrado inferior a 1.6 mm.

Art. 175.- Los conductores deberán mantener una distancia prudencial mínima de 3 metros con respecto al vehículo al que antecedan en el mismo carril, de tal forma que le permita detenerse con seguridad ante cualquier emergencia.

Art. 185.- Todo vehículo deberá llevar sus luces encendidas, entre las 18h00 y las 06h00 del día siguiente y, obligatoriamente, entre las 06h00 y las 18h00 si las condiciones atmosféricas (neblina, lluvia,) lo exigen.

Art. 275.- Se prohíbe efectuar maniobras o depositar en la vía pública materiales de construcción u objetos que impidan o dificulten la circulación de vehículos y peatones, salvo cuando la autoridad competente lo haya autorizado.

TITULO VI

CAPITULO III

Art. 329.- Se prohíbe la instalación de rótulos tanto internos como externos que afecte la visibilidad del conductor y de los usuarios, salvo los que sean parte de la señalética de información e identificación autorizados por la Agencia Nacional de Tránsito.

1.4. EL VEHÍCULO Y SU VELOCIDAD.

Sea la causante o no, el efecto de la velocidad se encuentra implicado en todos los accidentes de tránsito, por lo que es un elemento fundamental en la investigación de accidentes.

Según estadísticas de la Agencia Nacional de Transito “en el 2012 se registraron 23.842 accidentes de tránsito” (A.N.T, 2012). Para el Jefe del Servicio de Accidentes de Tránsito de Santo Domingo, Andrés Grijalva, el 95% de los accidentes ocurren por errores humanos, en donde el exceso de velocidad es el principal problema.

“Antes habían 10 accidentes y uno era fatal, ahora hay 5 accidentes, pero 3 son fatales” (Diario Extra, 2012), explicó el oficial. Quien resaltó que el óptimo estado de las carreteras no está contemplado, y ahora los chóferes desarrollan velocidades fuera del límite de lo establecido.

De la apreciación de los accidentes de tránsito que ocurren todos los días se puede deducir que un incremento de velocidad genera mayor riesgo de accidente ya que aminora los tiempos de reacción, y aumenta el daño material y físico.

La vía debe estar diseñada de una manera acorde a la realidad de los automotores que la circulan, al entorno a la vía (edificación cercana) y a las normas de circulación vigentes, los parámetros de diseño deben ser realistas, en función a las características de circulación que deseamos obtener por ejemplo tenemos la velocidad de diseño la cual limitara los radios de curvatura, anchos de vía, etc. Siendo la velocidad el factor más importante, todos los parámetros de diseño tienen que estar en función de la velocidad máxima permitida.

“Existen situaciones, según Elliot et al (2003) y Lynam et al (2005) en las que existe una estimación inadecuada (subestimación) de la velocidad, percibiendo valores inferiores a los reales” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 25), como por ejemplo:

- Situaciones en las que se ha mantenido una velocidad elevada durante un largo periodo.
- Zonas de transición donde los conductores deben reducir la velocidad de forma significativa después de un periodo de circulación a velocidad elevada.
- Situaciones donde no existe una información visual adecuada.

De manera simultánea se han realizado una gran cantidad de estudios para determinar un límite de velocidad que proporcione una circulación segura de acuerdo al tipo de vía. Una de las investigaciones más importantes fue en la que se introdujo el término de “velocidad segura” (Tinguall & Haworth, 1999).

Este concepto ha sido introducido a Ecuador y modificado de acuerdo a su realidad.

Tabla 1.1. Límites de velocidad en el Ecuador.

Tipo de vía	Límite (km/h)
Escolar	30
Urbana	50
Perimetral	90
Rectas en carreteras	100
Curvas en carreteras	60

1.5. RELACIÓN ENTRE EL FACTOR HUMANO Y LA SEGURIDAD ACTIVA.

El factor humano tiene una incidencia directa en el automóvil, en primer plano es el encargado de proporcionar una dirección, velocidad, etc., al vehículo, en otras palabras es el control del vehículo. En otro plano es el causante de todo lo referente a las vías y al vehículo (diseño, construcción y mantenimiento).

El proceso del manejo se basa en una toma continua de decisiones, desde el rumbo que desea tomar, hasta las acciones evasivas en caso de producirse un riesgo de accidente. En una situación normal como en una de emergencia el conductor pasa por tres fases “percepción-decisión-reacción (PDR)”(Branch & Branch, 2011).

- Percepción: se basa en lo que está ocurriendo en nuestro entorno, como por ejemplo, un semáforo en rojo.
- Decisión: se centra en la decisión que tomamos frente al suceso de nuestro entorno, para el ejemplo anterior la decisión sería aplicar los frenos.
- Reacción: es donde actuamos de acorde a lo que hayamos decidido, para el ejemplo presentado es cuando pisamos el freno.

Este proceso transcurre en un espacio de tiempo t_{PDR} , que para efectos prácticos se engloba en el concepto de percepción-decisión-reacción, y es aplicable a conductores como a peatones.

1.5.1. TIEMPO DE PERCEPCIÓN, DECISIÓN Y REACCIÓN.

Es imposible establecer un valor específico que englobe a todo tipo de conductor y a todas las situaciones que se pueden presentar. Entre los aspectos más influyentes de este tiempo tenemos:

- Cansancio.
- Uso de medicamentos.
- Uso de sustancias psicotrópicas.
- Condiciones del entorno (oscuridad, lluvia, etc.)

1.5.1.1. ENSAYOS REALIZADOS PARA OBTENER EL TIEMPO PDR.

Se han realizado un sin número de investigaciones que han intentado evaluar este tiempo, logrando estudiar otros parámetros influyentes en el manejo como por ejemplo la posición del conductor, distintos tipos de distracciones como conversar, discutir, hablar por teléfono celular, manipular la radio, etc.

Para determinar este tiempo se han realizado ensayos en laboratorios, ensayos en simuladores, en pistas cerradas al tráfico y en situaciones de conducción real. Este estudio solo se enfocará en los ensayos en situación de conducción real, aunque estos posean limitaciones por no permitir controlar en su totalidad el entorno y los estímulos, son los que se representan de una mejor manera los tiempos que se presentan en una situación de accidente.

Entre los ensayos destacados en este tipo manejo vale citar los realizados por:

- Los investigadores Johansson y Rumar realizaron prácticas mediante una señal acústica de alerta para frenar, obteniendo una media de 0.66s (Prieto, 1984).
- Otra investigación fue la de determinar el tiempo de reacción de frenado durante un recorrido de tres horas, verificando el incremento del tiempo PDR al existir una mayor fatiga con un tiempo promedio de PDR de 0.67s (Lisper & Laurell, 1973).

Varios autores, dedicados a la investigación de accidentes de tránsito plantean los siguientes valores:

Tabla 1.2. Tiempos de reacción según varios autores.

Edad	Tiempos de reacción (segundos)		
	De día	De noche	De noche y con un vehículo en sentido contrario
18 - 25	0,5	0,8	1
26 - 40	1	1,3	1,5
41 - 55	1,5	1,8	2
> 55	2	2,3	2,5

En España, la Norma de Trazado de la Instrucción de Carreteras, establece el tiempo de reacción PDR t_{PDR} , en 2.0s (Ministerio de Obras Publicas, 2000), el cual es un valor que se debe tener muy en cuenta al momento de diseñar la vía y sus elementos como la señalización, etc.

1.6. INTERACCIÓN ENTRE EL VEHÍCULO Y SU ENTORNO.

El análisis de la interacción entre el vehículo y su entorno ayudará a determinar aspectos concretos como trayectorias, influencia en las maniobras realizadas, interacción neumático-calzada (adherencia, fricción, aquaplaning, etc.), problemas de visibilidad, etc.

El vehículo se encuentra en constante interacción con la vía, siendo la más importante la que realiza con la calzada, esta interacción es la que definirá la dinámica real del vehículo, estando determinada por las fuerzas existentes entre los neumáticos y la calzada. Estas fuerzas son las que permiten que el vehículo posea una capacidad dinámica de avance, frenado y dirección. Las fuerzas de tracción o frenado se originan entre el contacto entre dos cuerpos, por lo que los coeficientes de resistencia dependerán de la carretera y de los neumáticos.

Para describir las fuerzas y momentos que actúan en un neumático es necesario establecer un sistema de coordenadas que servirá como referencia, con lo cual los sistemas variables del neumático, características de los componentes, fuerzas y momentos pueden ser descritos. Un tipo de sistema de coordenadas ampliamente utilizado es el adoptado por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE Internacional).

Para tener en cuenta, “las fuerzas que actúan sobre un neumático no están aplicadas en un punto determinado, sino que son la resultante de las fuerzas normales y de cortadura distribuidas a lo largo de la huella de contacto” (Mezquita & Dols, 2006).

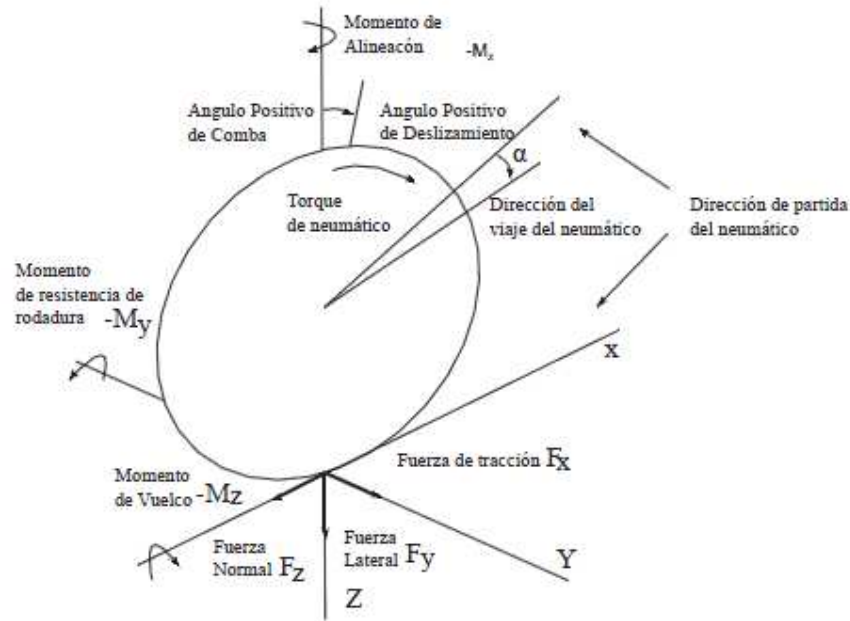


Figura 2.3. Sistema de coordenadas del neumático, componentes de fuerzas y momentos.

1.6.1. CÍRCULO Y ELIPSE DE ADHERENCIA.

Para Russel, C. Hibbeler, “la fuerza de adherencia a superar para iniciar el movimiento relativo entre dos cuerpos está en función de la fuerza normal a la superficie de contacto y de la naturaleza de las dos superficies” (Hibbeler, Mecánica Vectorial para Ingenieros: Estática, 2004). Al ejercer una fuerza F aparece una reacción en el contacto, con un valor máximo que es función del contacto y la fuerza normal. Esta fuerza aparecerá con independencia de la dirección de aplicación. La fuerza de reacción máxima posible, que es función del valor de la adherencia máxima, no depende de la dirección de aplicación de la reacción.

A partir de esto, se define el concepto de círculo de adherencia, que, aunque no es algo que físicamente se pueda observar, recoge esta idea de límites del efecto acción/reacción.

El círculo de adherencia, idealmente, estará centrado con el cuerpo y tendrá un radio de valor F de adherencia máxima, y todas las fuerzas de acción cuyo radio-vector

este contenido en el círculo no producen movimiento relativo de un cuerpo respecto a otro. Si una fuerza, aplicada en el cuerpo presenta un modulo mayor que el valor límite de la fuerza de adherencia, con independencia de la dirección, sentido y de aplicación, hace que aparezca un movimiento relativo entre las superficie de apoyo.

En esta investigación el contacto entre un neumático y una superficie de rodadura es un fenómeno físico complejo, que está afectado por numerosas variables y parámetros que hay que evaluar. Un efecto que se constata habitualmente es que los límites de adherencia de los neumáticos son en función de la dirección de aplicación de la sollicitación, de manera que la capacidad lateral y longitudinal son diferentes, según esto, para poder aplicar los conceptos presentados hasta ahora, hay que modificar el concepto de círculo de adherencia con el de elipse de adherencia, de manera que cada uno de los semiejes de la elipse indicara los valores límite de adherencia en cada dirección principal del contacto (X e Y).

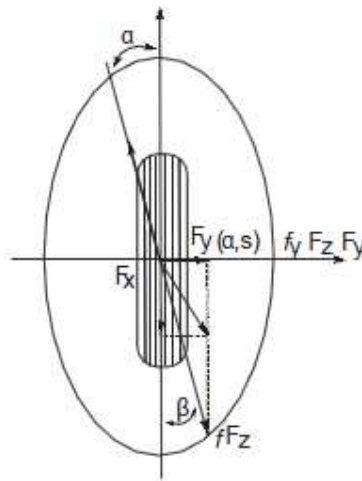


Figura 1.5. Elipse de adherencia.

1.6.1.1. ELIPSE DE ADHERENCIA IDEALIZADA.

“Una expresión para la ecuación de la elipse de adherencia puede ser desarrollada basada en las fuerzas del neumático sobre la calzada, $F_x(\alpha,s)$, $F_y(\alpha,s)$, F_z y los coeficientes de fricción, f_x y f_y ” (Branch & Branch, 2011, pág. 28).

Utilizando la ecuación fundamental de la elipse donde un eje es igual a $2f_x F_z$, el otro eje es igual a $2f_y F_z$, y la abscisa variable igual a $F_y(\alpha,s)$, nos resulta:

$$\frac{F_y^2(\alpha, s)}{f_y^2 F_z^2} + \frac{F_x^2(\alpha, s)}{f_x^2 F_z^2} \leq 1$$

Ec. 1.1

La desigualdad en la ecuación 1.1 nos indica que mientras la fuerza resultante permanezca dentro de la zona de adherencia de la elipse, el derrape no se produce.

Al indicar el límite de adherencia, se está haciendo referencia al valor de rozamiento estático, caracterizado por el coeficiente μ_x .

Tabla 1.3. Rangos de coeficientes de fricción para un neumático bloqueado y deslizando por diferentes condiciones de camino.

Descripción de la superficie del camino	SECO		MOJADO	
	Menos de	Más de	Menos de	Más de
	48 km/h 30 mph	48 km/h 30 mph	48 km/h 30 mph	48 km/h 30 mph
	Rango			
Concreto				
nuevo y agudo	0,8 - 1,05	0,7 - 0,9	0,5 - 0,8	0,4 - 0,75
viajado	0,6 - 0,8	0,6 - 0,75	0,45 - 0,7	0,45 - 0,65
pulido por el tráfico	0,55 - 0,75	0,5 - 0,65	0,45 - 0,65	0,45 - 0,6
Asfalto				
nuevo y agudo	-	0,5 - 0,6	-	0,45 - 0,75
viajado	0,6 - 0,8	0,6 - 0,9	0,45 - 0,7	0,4 - 0,65
pulido por el tráfico	0,55 - 0,75	0,45 - 0,65	0,45 - 0,65	0,4 - 0,6
exceso de alquitrán	0,5 - 0,6	0,35 - 0,6	0,3 - 0,6	0,25 - 0,55
Grava				
comprimida	0,55 - 0,85	0,5 - 0,8	0,4 - 0,8	0,4 - 0,6
suelta	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7	0,45 - 0,75	0,45 - 0,75
Ceniza				
comprimida	0,55 - 0,7	0,5 - 0,7	0,65 - 0,75	0,65 - 0,75
Roca				
aplastada	0,55 - 0,75	0,55 - 0,75	0,55 - 0,75	0,55 - 0,75
Hielo				
suavizado	0,1 - 0,25	0,07 - 0,2	0,05 - 0,1	0,05 - 0,1
lijado	0,19 - 0,24	0,16 - 0,29	0,14 - 0,19	0,14 - 0,19
Nieve				
comprimida	0,3 - 0,55	0,35 - 0,55	0,3 - 0,6	0,3 - 0,6
suelta	0,1 - 0,25	0,1 - 0,2	0,3 - 0,6	0,3 - 0,6

En la tabla 1.3 se recogen valores de adherencia en función del tipo de suelo para un neumático de turismo. Sin embargo, estos valores son orientativos, aplicables en condiciones normales de circulación y no se puede considerar de forma absoluta como un valor definitivo, debido a que se ha de ver condicionado por un número importante de factores como la velocidad, la carga, etc.

Por ejemplo, si después de un accidente de tránsito se observa una cantidad elevada de agua en la calzada, existe la posibilidad de que haya ocurrido el fenómeno de

aquaplaning (Cfr. Infra). De verificarse que se dio este fenómeno no se podría aplicar el valor de adherencia en asfalto mojado para posibles análisis. Este efecto de la combinación del agua con la velocidad puede observarse en la figura 1.6.

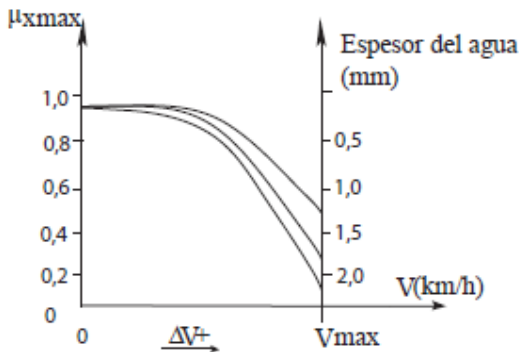


Figura 1.6. Efecto de la velocidad y el espesor de la capa de agua sobre el coeficiente de adherencia longitudinal.

De la figura 1.6 podemos comprobar la manera en la que afecta la capa de agua en la calzada a la adherencia a determinada velocidad, resultando notable a una mayor cantidad de agua en la calzada menor será la adherencia.

1.7. FENÓMENO DE AQUAPLANING.

Una de las funciones principales de un neumático es la de evacuar el agua que se encuentra en la calzada permitiendo así el contacto entre la banda de rodadura y la carretera y no ver disminuida su capacidad dinámica.

“Si la capa de agua, generalmente por encima de los 2mm de espesor, y las condiciones operativas son tales que la acción conjunta de las acanaladuras de la banda de rodadura y la macro-textura es insuficiente para descargar toda la masa de agua de la huella de contacto, se puede producir el fenómeno conocido como aquaplaning” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 80).

Al circular sobre una superficie con agua, en la huella de contacto entre neumático y superficie de la calzada se presentan tres zonas. La primera, en la parte delantera del neumático, la cantidad de agua que ingresa por la banda de rodadura es tal que no existe contacto entre la banda de rodadura y el suelo; en la segunda zona el agua es evacuada hacia los lados por el dibujo de la banda de rodadura y en la tercera se produce el contacto prácticamente seco que asegura un buen nivel de adherencia entre el neumático y la calzada. La pérdida de control se producirá cuando se

presente únicamente la primera zona, esto puede suceder por un exceso de velocidad, por un mal estado del neumático, presión del neumático, etc. Esta pérdida de control se puede producir tanto con la rueda girando como bloqueada.

La pérdida de contacto se produce por el empuje vertical (sentido ascendente) de la cuña de fluido. Este empuje aumenta con el incremento de la velocidad relativa entre el agua y la periferia del neumático, siendo superior cuando la rueda gira (F_{zh}), por el arrastre hacia el interior de la cuña, que cuando está bloqueado (F_{zh}'). Cuando la fuerza de empuje de la cuña supera la carga vertical que gravita sobre la rueda, se produce la pérdida total de contacto.

“Una de las expresiones que mas frecuentemente se utilizan para determinar la velocidad minima a partir de la cual aparecera el fenomeno de aquaplaning” (Mezquita & Dols, 2006, pág. 89) esta dada por:

$$v = 65 \cdot P$$

Ec. 1.2

Donde:

v : Velocidad de desplazamiento (km/h).

P : Presión de inflado (kg/cm^2).

1.8. DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA VÍA.

Las formulaciones matemáticas para el diseño geométrico de la vía muchas veces parten de hipótesis relacionadas a la velocidad de proyecto, tiempo de reacción, distancia de visibilidad y otros parámetros. Estas hipótesis, aunque no se adaptan a un peritaje de siniestros de automóviles si pueden modificar sustancialmente los parámetros de diseño. Esto puede afectar a muchos aspectos como son el tiempo de reacción de las personas implicadas, las velocidades reales de circulación o las visibilidades disponibles en el instante del accidente.

“El diseño geométrico de una vía, es la relación existente entre los elementos físicos del terreno, con las características de operación como el volumen de tráfico, la velocidad de diseño, la reglamentación vigente definida por las entidades que regulan el transporte y tránsito en el país, etc.” (Universidad de Tolima).

En base al libro “Handbook of Road Safety Measures” (Elvih & Vaa, 2009), se presentan a continuación algunas de las conclusiones más interesantes para este estudio:

- Aumentar el radio de curvatura, ya que el número de accidentes se reduce cuando se reducen las curvas con radios inferiores a 200m.
- Eliminar las curvas de radios inferiores que aparecen sorpresivamente después de amplias zonas rectas o de menor curvatura.
- Reducir las zonas con cambios de rasante, para evitar problemas asociados a la disminución de la visibilidad disponible.
- Eliminar las obstrucciones visuales en las zonas laterales de la vía.

1.8.1. DISEÑO DE VÍAS. RECTAS.

El trazado de una vía comprende el diseño antes de su construcción, está compuesto por una sucesión de tramos rectos enlazados por alineaciones curvas. La recta es una alineación caracterizada por un rumbo constante y curvatura nula, es decir un radio de curvatura infinita.

Para evitar problemas relacionados con el cansancio debido a la monotonía de la vía, deslumbramientos por parte de vehículos en sentido adverso, excesos de velocidad, etc., es deseable limitar las longitudes máximas de las rectas y para que se produzca una adaptación a la conducción es deseable establecer unas longitudes mínimas de las alineaciones rectas. La longitud de las rectas no debe pasar máximos de 500 a 2000m, ni ser inferior a mínimos de 50 a 200m, en función del tipo de vía.

1.8.2. DISEÑO DE VÍAS. CURVAS.

Las rectas se caracterizan por su longitud y dirección, mientras que las curvas se caracterizan por su radio de curvatura y ángulo de peralte.

Las curvas pueden presentar radios de curvatura constante (curvas circulares) o variables (curvas de transición). Las curvas de transición evitan un cambio brusco en la aceleración transversal o radial y en el control de la dirección del vehículo.

Las curvas circulares se caracterizan por presentar una variación lineal del rumbo con el espacio recorrido y presentando al mismo tiempo una curvatura constante, esto implica que el radio de curvatura es constante.

Al recorrer una trayectoria curva aparece una aceleración radial o normal en función con la velocidad de avance y de la curvatura del camino seguido.

De forma complementaria, un vehículo está siempre sometido a la acción del peso propio, que actúa verticalmente (g).

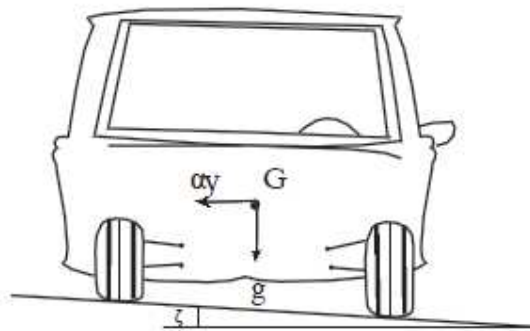


Figura 1.8. Aceleraciones en un vehículo circulando por una curva peraltada.

Las curvas son uno de los principales lugares donde ocurren los accidentes, “estimándose que el número de estos sea de 1,5 a 4 veces mayor que en los tramos rectos” (Gouvea & Tamayo, 2005). Entre los tipos de accidentes que pueden ocurrir en curva se tienen los vuelcos, las colisiones frontales y laterales, los choques contra obstáculos situados en las laterales de la vía, etc.

“La frecuencia y la severidad de los accidentes en curvas horizontales están asociadas al grado de curvatura, la extensión de la curva, la presencia de curvas de transición, la adopción de peralte y ensanche, la longitud de las tangentes y la textura del pavimento” (Gouvea & Tamayo, 2005).

La Norma de Trazado de la Instrucción de Carretera de España, indica que el peralte (p), expresado en % se establecerá de acuerdo con el tipo de vía y el radio de curvatura.

Tabla 1.4 % de peralte en relación al radio y tipo de vía (Fuente: véase tabla de tablas).

	R (m)	p (%)
Autopistas, autovías, vías rápidas y carreteras C-100	250 < R < 700	p = 8
	700 < R < 5000	$p = 8 - 7.3(1 - \frac{700}{R})^{\frac{1}{3}}$
	5000 < R < 7500	p = 2
	7500 < R	-
Carreteras C - 20, Carreteras C - 60 y Carreteras C - 40,	50 < R < 350	p = 7
	350 < R < 2500	$p = 7 - 6.8(1 - \frac{350}{R})^{\frac{1}{3}}$
	2500 < R < 3500	p = 2
	3500 < R	-

VISIBILIDAD Y CAMPO DE VISIÓN.

Como se dijo anteriormente un proceso adecuado de conducción necesita información, mucha de esta información proviene del exterior como señalización de los elementos generales del camino (márgenes, etc.), información obtenida de los sistemas de señalización e información relativa a la configuración general de la vía y su entorno (tráfico, peatones, etc.).

Por lo que, se puede decir que la mayoría de la información que se utiliza para el manejo proviene de estímulos visuales. La visibilidad disponible vendrá limitada por las siguientes funciones:

- Rasantes: “Línea de una calle, camino o carretera, considerada en su inclinación respecto del plano vertical” (R.A.E, 2012).
- Planta: curvas, obstáculos visuales, etc.
- Obstrucción visual de accesorios del vehículo: puntos ciegos del vehículo, accesorios agregados como parasoles, etc.
- Iluminación: deslumbramientos solares, deslumbramiento de otros vehículos, etc.
- Clima: lluvias intensas, neblina, etc.

1.9.1. DISTANCIA DE PARADA.

Se considera como distancia de parada a la distancia recorrida por un vehículo forzado a detenerse tan pronto como le sea posible, medida desde el punto en que apareció el motivo para aplicar los frenos hasta su detención total.

$$D_p = \left(\frac{v \cdot t_{PDR}}{3.6} \right) + \left[\frac{v^2}{254 \cdot (\mu_x + i)} \right]$$

Ec. 1.3

Donde:

v : Velocidad de circulación (km/h).

i : Inclinación de la rasante (%)

1.9.2. VISIBILIDAD DE PARADA.

Se considera como visibilidad de parada a la distancia que existe entre un elemento inmóvil en la vía (obstáculo, disco PARE, etc.) y un automóvil dirigiéndose hacia dicho elemento, en ausencia de vehículos intermedios, en el momento en que el conductor puede divisarlo sin que luego desaparezca de su vista hasta llegar al mismo.

“La visibilidad de parada será igual o superior a la distancia de parada mínima, siendo deseable que supere la distancia de parada calculada con la velocidad de proyecto incrementada 20km/h” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 118).

1.9.3. VISIBILIDAD DE ADELANTAMIENTO.

Se considera como visibilidad de adelantamiento la distancia que existe entre el vehículo que efectúa la maniobra de adelantamiento y el vehículo que circula en sentido opuesto, en el momento en que puede divisarlo sin que luego desaparezca de su vista hasta finalizar el adelantamiento.

Tabla 1.5 Distancias mínimas de visibilidad (m) recomendables.

	Velocidades específicas (km/h)							
	30	40	50	60	70	80	100	120
Distancias de visibilidad de parada en horizontal	25	35	55	75	100	120	180	250
Distancias de visibilidad de adelantamiento en calzadas de dos carriles	150	200	250	350	450	500	600	600
Distancias de visibilidad de adelantamiento en calzadas de tres carriles	-	-	-	250	300	350	400	400

1.9.4. VISIBILIDAD DE CRUCE.

Se considera visibilidad de cruce, la distancia que necesita ver un conductor para cruzar a otra vía que interseca su trayectoria. Está determinada por la condición de que el conductor del vehículo de la vía preferente pueda ver si otro vehículo se dispone a cruzar sobre dicha vía.

1.9.5. VISIBILIDAD EN CURVAS CIRCULARES.

Se considera como el valor del despeje necesario para disponer de una adecuada visibilidad en una curva circular.

$$h = R - (R + b) \cdot \cos\left(\frac{31.83 \cdot D}{R + b}\right)$$

Ec. 1.4

Siendo:

h : La distancia mínima del obstáculo al borde de la calzada más próxima a él (m).

R : Radio del borde de la calzada más próximo al obstáculo (m).

b : Distancia del punto de vista del conductor al borde de la calzada más próximo del obstáculo (m).

D : La visibilidad (m)

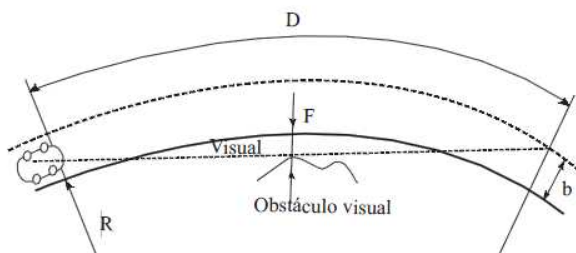


Figura 1.9. Visibilidad en curvas circulares.

CAPÍTULO II

2. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE LA CIRCULACIÓN DEL VEHÍCULO LIVIANO EN RECTA Y EN CURVA PARA REALIZAR LA MECÁNICA DE LA COLISIÓN.

La investigación de un accidente de tránsito se basa en el análisis de su evolución espacio-temporal, que viene determinado por variables cinemáticas tales como posiciones, trayectorias, velocidades y aceleraciones. Al ser la aceleración el principal efecto que genera las fuerzas que intervienen un accidente, la investigación en general, se fundamenta en una estructura dinámica, para determinar las aceleraciones a las que están sometidos los cuerpos implicados. En la circulación normal del vehículo se presentaran 2 escenarios:

- Circulación en recta: En donde se asume una trayectoria sin afecciones de esfuerzos laterales.
- Circulación en curva: En donde se presentan esfuerzos laterales.

2.1. CIRCULACIÓN EN RECTA.

2.1.1. FUERZAS LONGITUDINALES.

De acuerdo a la ley de Newton, el rumbo y movimiento de un cuerpo (en este caso un vehículo) en la dirección x con velocidad \dot{x} y aceleración \ddot{x} , tienen que ser soluciones de la ecuación del movimiento:

$$m \cdot \ddot{x} = F_{\Sigma}$$

Ec. 2.1

Donde:

m : Masa del vehículo.

F_{Σ} : Fuerza resultante de todas las fuerzas actuando en el vehículo en dirección x .

Algunas de las fuerzas más comunes que son incluidas en la resultante, son la tracción entre los neumáticos y el suelo (torque del motor o frenado), resistencia a la rodadura, fuerzas aerodinámicas y fuerzas de choque. Estas fuerzas varían con el

tiempo, por lo que $F_{\Sigma} = F_{\Sigma}(t)$ y la ecuación 2.1 debe ser integrada para obtener la velocidad y el desplazamiento.

$$m \cdot \ddot{x} = F_t - F_f - R_x$$

Ec. 2.2

Donde:

F_t : Suma de las fuerzas de tracción.

F_f : Suma de las fuerzas de frenado.

R_x : Resultante de fuerzas de factores externos.

$$R_x = F_{xa} + F_r + F_{xr} + F_{xp} + F_m + F_v$$

Ec. 2.3

R_x , contempla fuerzas como:

- Fuerzas de resistencia a la rodadura (F_r).
- Fuerzas de resistencias mecánicas (F_m).
- Otras resistencias F_v .
- Fuerzas aerodinámicas (F_{xa}).
- Fuerzas gravitatorias del vehículo (F_{xp}).
- Fuerzas gravitatorias de masas arrastradas (F_{xr}).

Por lo general la fuerza de resistencias mecánicas, suele ser despreciable en la mayoría de casos ya que posee una magnitud muy inferior al resto.

Dentro de otras resistencias (F_v), se contemplan resistencias adicionales que en el caso de un accidente de tránsito puede ser el arrastre de un objeto bajo el automóvil en movimiento.

2.1.1.1. FUERZAS GRAVITATORIAS.

Las fuerzas producidas por la masa, tienen valor únicamente cuando el vehículo se encuentra circulando por una cuesta en donde tendrá signo negativo cuando $\theta > 0$, y positivo cuando $\theta < 0$. Esto debido a que en el primer caso el vehículo se opone al movimiento y en el segundo la superficie ayuda al movimiento

$$F_{xp} = P \cdot \text{sen}(\theta) = m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta)$$

Ec. 2.4

Para remolques:

$$F_{xr} = P_r \cdot \text{sen}(\theta)$$

Ec. 2.5

2.1.1.2. FUERZAS DE RESISTENCIA AERODINÁMICA.

Esta fuerza está en función del vehículo (forma), del entorno (condiciones meteorológicas) y condiciones de circulación como velocidades, trayectorias, etc. En esta fuerza la velocidad juega el papel principal a tal punto que cuando se circula a bajas velocidades este valor se lo suele despreciar.

$$F_{xa} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot v^2$$

Ec. 2.6

Donde:

ρ : Densidad del aire.

C_x : Coeficiente aerodinámico del vehículo.

A_f : Área frontal del vehículo.

v : Velocidad de circulación.

En la mayoría de casos los coeficientes aerodinámicos propios del vehículo son proporcionados por el fabricante por diversos medios como revistas, catálogos, etc.

2.1.1.3. FUERZAS DE RESISTENCIA A LA RODADURA.

En la interacción del neumático con la calzada se genera una fuerza que se opone al avance del vehículo, a esta fuerza se le denomina resistencia a la rodadura. Su magnitud depende de las características del neumático como su superficie de contacto y de las condiciones de circulación, sin embargo esta resistencia no varía de forma considerable con el aumento de la velocidad.

$$F_r = f_r \cdot F_z$$

Donde:

f_r : Coeficiente de resistencia a la rodadura.

F_z : Fuerza normal de reacción del suelo en el neumático.

Este coeficiente suele encontrarse generalmente en tablas para cada tipo de vehículo.

2.1.2. ACELERACIÓN UNIFORME.

Reemplazando $F_\Sigma/m = a$, donde a , es una constante, la integración de la ecuación 2.1 nos da la velocidad en función del tiempo:

$$\dot{x}(t) = v_0 + a \cdot t$$

Ec. 2.8

Integrando la ecuación 2.8 obtenemos el desplazamiento:

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t + a \cdot t^2/2$$

Ec. 2.9

Otra relación entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración procede del cambio de la energía cinética de un vehículo en movimiento. El cambio de la energía cinética debe ser igual al del trabajo hecho por la fuerza resultante externa. Cuando un vehículo se mueve sobre una distancia $x - x_0$, con un cambio de velocidad $v - v_0$, y con una aceleración constante a , el trabajo principal de energía nos da:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot \dot{x}^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 = m \cdot a \cdot (x - x_0)$$

Ec. 2.10

Colocando esto en una forma más común nos permite el cálculo de la velocidad en términos de la posición:

$$\dot{x}(x) = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot a \cdot (x - x_0)}$$

Ec. 2.11

Si un vehículo realiza una parada completa con una desaceleración uniforme $a = -f \cdot g$, desde una velocidad inicial v_0 , sobre una distancia $x - x_0 = d$, después de resolver esta ecuación para d , la ecuación 2.12 nos queda:

$$d = \frac{v_0^2}{2 \cdot a} = \frac{v_0^2}{2 \cdot f \cdot g}$$

Ec. 2.12 (a)

Adicionalmente, resolviendo para v_0 , obtenemos:

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot f \cdot g \cdot d}$$

Ec. 2.12 (b)

Las ecuaciones 2.12 (a) y 2.12 (b) tienen una gran importancia ya que con estas se puede estimar la distancia de frenado de un vehículo con coeficiente de fricción f , o la velocidad para una distancia de frenado dada.

Algunas veces el tiempo es necesario para un cambio de velocidad dado. De la ecuación 2.8, el tiempo t , para alcanzar una velocidad \dot{x} , es:

$$t = (\dot{x} - v_0)/a$$

Ec. 2.13

Otra ecuación para el tiempo puede ser obtenida de la ecuación 2.9:

$$t = -\frac{v_0}{a} \pm \sqrt{\left(\frac{v_0}{a}\right)^2 + \frac{2 \cdot (x - x_0)}{a}}$$

Ec. 2.14

2.1.3. ÁNGULO Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN EQUIVALENTE.

Cuando el vehículo se encuentra circulando por un grado positivo (cuesta arriba), la gravedad mejora el frenado, y cuando se encuentra circulando en un ángulo negativo (cuesta abajo), la gravedad contrarresta el frenado. Siguiendo esto es posible establecer un coeficiente de fricción equivalente f_{eq} , para representar este efecto. Esto es, la aceleración debido al frenado en un ángulo uniforme es $a = -f_{eq} \cdot g$, donde:

$$a = \frac{F_{\Sigma}}{m} = -g \cdot (f \cdot \cos(\theta) + \text{sen}(\theta))$$

$$f_{eq} = f \cdot \cos(\theta) + \text{sen}(\theta)$$

Ec. 2.15

Donde

θ : Ángulo en grados.

f : Coeficiente de fricción para un ángulo cero.

Es común la medición de la rampa o la pendiente de un camino en un porcentaje (%).

En este caso el ángulo se calcula por la expresión:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\text{valor de la rampa en \%}}{100}\right)$$

Ec. 2.16

2.1.4. MOVIMIENTO DE AVANCE DEL VEHÍCULO.

En algunos vehículos la potencia del motor la transfiere las ruedas delanteras (FWD), en otros las posteriores (RWD), y algunos otros a través de todas las ruedas (4WD). La fuerza normal de los neumáticos delanteros y posteriores difiere con la distribución del peso del vehículo y su aceleración. La distribución del peso desde la parte delantera hacia la trasera, puede ser importante cuando ocurre un fallo mecánico. Si los frenos delanteros o posteriores fallan o si el coeficiente de fricción de los neumáticos delanteros difiere de los posteriores las ecuaciones de aceleración constante presentadas anteriormente no serán aplicables.

2.1.4.1. FUERZA DE TRACCIÓN.

“La fuerza de tracción máxima que puede desarrollar un vehículo depende de características intrínsecas, como el par motor, rendimiento de la transmisión, etc., y de características extrínsecas, como es el caso de la adherencia disponible en el contacto entre las ruedas y la superficie de rodadura, pendiente de la carretera, etc.” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 130)

2.1.4.1.1. FUERZA DE TRACCIÓN EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS.

El par de tracción se genera en el motor y varía a lo largo del camino hacia las ruedas. En cada marcha de la transmisión se proporciona un diferente par a las ruedas de tracción, este valor se ve reducido mientras más alta es la marcha.

$$F_{t_m} = \frac{\sigma_m \cdot \eta_t \cdot M_m \cdot i_c \cdot i_d}{r_c}$$

Ec. 2.17

Donde:

M_m : Par motor.

η_t : Rendimiento de la transmisión.

σ_m : Coeficiente de minoración por masas en rotación.

i_c : Relación de transmisión de la caja de cambios.

i_d : Relación de transmisión del diferencial.

En todo el proceso de transmisión del par a las ruedas motrices, este se ve reducido por consumos de funcionamiento como el que produce el rozamiento en rodamientos, bujes, etc. Para cuantificar el valor total de este consumo se utiliza un “factor de eficacia η_t ” (Mezquita & Dols, 2006, pág. 206), cuyos valores varían entre 0.85 a 0.9 para la marcha más corta y entre 0.9 a 0.95 para la más larga, teniendo en cuenta que a menor longitud de la marcha mayor es el rendimiento.

El consumo de las inercias se representa por un coeficiente de minoración del par σ_m , el cual está en función de la marcha seleccionada, su valor varía entre 0.6 y 0.9 para la marcha más baja y de 1 para la más alta.

En caso de tener el dato de la velocidad en km/h, a un determinado número de revoluciones rpm, la expresión de la fuerza de tracción es.

2.1.4.1.2. FUERZA DE TRACCIÓN EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS EXTRÍNSECAS.

La fuerza de tracción se encuentra en función de la fuerza vertical que gravita sobre las ruedas motrices y adherencia máxima disponible en el contacto.

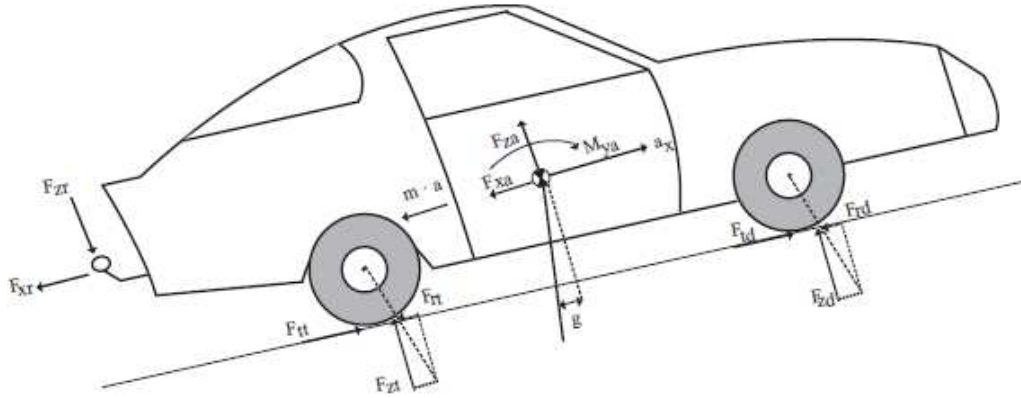


Figura 2.1 Diagrama de cuerpo libre de un vehículo en tracción.

Para el cálculo de la fuerza vertical en las ruedas motrices se supone una suspensión rígida para despreciar los efectos del cabeceo y mediante la fig. 2.1 se procede a una sumatoria de momentos con respecto a los puntos de contacto de las ruedas con el suelo.

Sumatoria de momentos en punto de contacto posterior:

$$\left(\frac{P}{g} \cdot a + F_{xa} + P \cdot \text{sen}(\theta)\right) \cdot h + F_{xr} \cdot h_r + F_{zr} \cdot l_r + (F_{rt} \cdot r_{ct} + F_{rd} \cdot r_{cd}) - (P \cdot \text{cos}(\theta) - F_{za}) \cdot l_2 + F_{zd} \cdot B - M_{ya} - I_d \dot{\omega}_d - I_t \dot{\omega}_t = 0$$

Ec. 2.18

Sumatoria de momentos en punto de contacto delantero:

$$\left(\frac{P}{g} \cdot a + F_{xa} + P \cdot \text{sen}(\theta)\right) \cdot h + F_{xr} \cdot h_r + F_{zr} \cdot (l_r + B) + (F_{rt} \cdot r_{ct} + F_{rd} \cdot r_{cd}) + (P \cdot \text{cos}(\theta) - F_{za}) \cdot l_1 - F_{zt} \cdot B - M_{ya} - I_d \dot{\omega}_d - I_t \dot{\omega}_t = 0$$

Ec. 2.19

De las ecuaciones 2.18 y 2.19 se obtiene despejando la carga normal F_{zr} y F_{zt} , respectivamente:

$$F_{zd} = \frac{P \cdot l_2 \cdot \text{cos}(\theta) - \left(\frac{P}{g} \cdot a + F_{xa} + P \cdot \text{sen}(\theta)\right) \cdot h - F_{xr} \cdot h_r - F_{zr} \cdot l_r - F_{za} \cdot l_2 - (F_{rt} \cdot r_{ct} + F_{rd} \cdot r_{cd}) + M_{ya} + I_d \dot{\omega}_d + I_t \dot{\omega}_t}{B}$$

Ec. 2.18.1

$$F_{zt} = \frac{P \cdot l_1 \cdot \cos(\theta) + \left(\frac{P}{g} \cdot a + F_{xa} + P \cdot \text{sen}(\theta) \right) \cdot h + F_{xr} \cdot h_r + F_{zr} \cdot (l_r + B) + (F_{rt} \cdot r_{ct} + F_{rd} \cdot r_{cd}) - F_{za} \cdot l_1 - M_{ya} - I_d \dot{\omega}_d - I_t \dot{\omega}_t}{B}$$

Ec. 2.19.1

Si de las ecuaciones 2.18.1 y 2.19.1 se considera que $\cos(\theta) = 1$ (ángulo de rampa mínimo), $h = h_r$ y si se desprecia los momentos a la resistencia a la rodadura, inercia de masas rotativas y acciones aerodinámicas de sustentación y cabeceo debido a su mínimo valor frente a las otras magnitudes tenemos;

$$F_{zd} = \frac{P \cdot l_2}{B} - \left(\frac{P}{g} \cdot a + F_{xa} + P \cdot \text{sen}(\theta) + F_{xr} \right) \cdot \frac{h}{B} - \frac{F_{zr} l_r}{B}$$

Ec. 2.18.2

$$F_{zt} = \frac{P \cdot l_1}{B} + \left(\frac{P}{g} \cdot a + F_{xa} + P \cdot \text{sen}(\theta) + F_{xr} \right) \cdot \frac{h}{B} + \frac{F_{zr} (l_r + B)}{B}$$

Ec. 2.19.2

De las ecuaciones 2.18.2 y 2.19.2, eliminando el arrastre de masa se tiene:

$$F_{zd} = \frac{P \cdot l_2}{B} - \left(\frac{P}{g} \cdot a + F_{xa} + P \cdot \text{sen}(\theta) \right) \cdot \frac{h}{B}$$

Ec. 2.18.3

$$F_{zt} = \frac{P \cdot l_1}{B} + \left(\frac{P}{g} \cdot a + F_{xa} + P \cdot \text{sen}(\theta) \right) \cdot \frac{h}{B}$$

Ec. 2.19.3

En ambas ecuaciones el primer término representa la carga estática sobre las ruedas, y el segundo representa la transferencia de carga por la aceleración.

Teniendo en cuenta la ecuación de la dinámica longitudinal en x :

$$m \cdot a_x + F_{xa} + P \cdot \text{sen}(\theta) = F_{td} - F_{rd} + F_{tt} - F_{rt} = F_t - F_r$$

Se puede reemplazar esta igualdad en las ecuaciones 2.18.3 y 2.19.3, teniendo:

$$F_{zd} = \frac{P \cdot l_2}{B} - (F_t - F_r) \cdot \frac{h}{B}$$

Ec 2.18.4

y

$$F_{zt} = \frac{P \cdot l_1}{B} + (F_t - F_r) \cdot \frac{h}{B}$$

Ec. 2.19.4

Donde:

F_t : Fuerza de tracción total.

F_r : Fuerza de resistencia a la rodadura total.

Obtenida ya la fuerza vertical en las ruedas motrices se procede a calcular la fuerza de tracción máxima limitada por la adherencia

En un vehículo con tracción delantera se tiene:

$$F_{t\mu\text{m}\acute{a}x} = \mu \cdot F_{zd} = \mu \left[\frac{P \cdot l_2}{B} - \frac{h}{B} \cdot (F_{t\text{m}\acute{a}x} - F_r) \right]$$
$$F_{t\mu\text{m}\acute{a}x} = \frac{\mu \cdot P \cdot (l_2 + h \cdot f_r)}{B + \mu \cdot h}$$

Ec. 2.20

En un vehículo con tracción posterior:

$$F_{t\mu\text{m}\acute{a}x} = \mu \cdot F_{zt} = \mu \left[\frac{P \cdot l_1}{B} + \frac{h}{B} \cdot (F_{t\text{m}\acute{a}x} - F_r) \right]$$
$$F_{t\mu\text{m}\acute{a}x} = \frac{\mu \cdot P \cdot (l_1 - h \cdot f_r)}{B - \mu \cdot h}$$

Ec. 2.21

En un vehículo con tracción a las cuatro ruedas, se elimina se elimina la transferencia de carga, teniendo:

$$F_{t\mu\text{m}\acute{a}x} = \mu \cdot P \cdot \cos(\theta)$$

Ec. 2.22

2.1.5. DISTANCIA DE PARADA.

La distancia de parada es la distancia requerida por un conductor para llevar un vehículo con movimiento hacia adelante y en sentido recto a una detención total

mediante el frenado e incluye la distancia recorrida durante el tiempo del proceso de percepción-decisión-reacción (PDR) del conductor antes del frenado real.

La distancia de frenado es la distancia recorrida desde que se aplican los frenos, por lo que la distancia de frenado es una parte de la distancia de parada. “Un tiempo usual del proceso PDR correspondiente a un frenado de emergencia de un vehículo liviano tiene un rango de 0.5 a 2.5 segundos” (Branch & Branch, 2011, pág. 59).

2.1.5.1. DISTANCIA A PARTIR DE LA VELOCIDAD.

Utilizando la ecuación 2.12 (a) para la distancia recorrida durante el frenado y adicionando el término de la distancia recorrida durante el tiempo de PDR del conductor, obtenemos:

$$d_s = v_0 \cdot t_{PDR} + \frac{v_0^2}{2 \cdot f \cdot g}$$

Ec 2.23

El correspondiente tiempo de parada es:

$$t_s = t_{PDR} + \frac{v_0}{f \cdot g}$$

Ec. 2.24

2.1.5.2. VELOCIDAD A PARTIR DE LA DISTANCIA.

En este caso la distancia de parada se encuentra en la ecuación 2.23. Utilizando la fórmula cuadrática, esta ecuación puede ser resuelta para la velocidad:

$$v_0 = f \cdot g \left(-t_{PDR} + \sqrt{t_{PDR}^2 + \frac{2 \cdot d_s}{f \cdot g}} \right)$$

Ec. 2.25

2.1.6. MOVIMIENTO CON ACELERACIÓN NO UNIFORME.

Por lo general, la aceleración de tracción o frenado real de un vehículo no es uniforme.

Para determinar el tiempo que demora un vehículo, en alcanzar una velocidad v , cuando acelera desde v_0 :

$$\int_{v_0}^v \frac{dv}{a(v)} = \int_{t_0}^t dt$$

Ec. 2.26

En lo que se refiere a la distancia que necesita recorrer un vehículo para incrementar su velocidad entre v_0 y v :

$$\int_{v_0}^v \frac{v \cdot dv}{a(v)} = \int_{x_0}^x dx$$

Ec. 2.27

En la desaceleración la formulación es la misma que para la tracción, Considerando, que se determina la aceleración en función de la adherencia y las características técnicas del vehículo, tenemos:

$$a = \frac{-F_f - (F_{xa} + F_r + F_{xp})}{m}$$

$$= \frac{-F_f - \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot v^2 + f_r \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta)\right)}{m}$$

Ec. 2.28

Resolviendo la ecuación 2.27 y sustituyendo en la ecuación 2.28, se obtiene la ecuación:

$$x_{v_0-v} = -m \cdot \int_{v_0}^v \frac{v \cdot dv}{F_f + m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) + f_r \cdot m \cdot g + 0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot v^2}$$

Ec. 2.29

Suponiendo que la fuerza de frenado y la resistencia a la rodadura son independientes de la velocidad se llega a:

$$x_{v_0-v} = \frac{m \cdot \sigma_f}{\rho \cdot C_x \cdot A_f} \cdot \ln \left(\frac{F_f + m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) + f_r \cdot m \cdot g + 0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot v_0^2}{F_f + m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) + f_r \cdot m \cdot g + 0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot v^2} \right)$$

Ec. 2.30

Considerando $v = 0$ (parada total), y $F_f = \eta_f \cdot \mu \cdot P$, se tiene que la distancia recorrida desde la velocidad de circulación v_0 , hasta la detención total es:

$$x_{v_0-v} = \frac{m}{\rho \cdot C_x \cdot A_f} \cdot \ln \left(1 + \frac{0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot v_0^2}{m \cdot g \cdot \eta_f \cdot \mu + m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) + f_r \cdot m \cdot g} \right)$$

Ec. 2.31

De la ecuación 2.31, conociendo x_{v_0-v} , debido a evidencias marcas de frenada, puede calcularse la velocidad inicial del proceso de frenado v_0 .

$$v_0 = \sqrt{\left(e^{\frac{\rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot x_{v_0-v}}{m}} - 1 \right) \cdot \frac{m \cdot g \cdot (\eta_f \cdot \mu + \text{sen}(\theta) + f_r)}{0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f}}$$

Ec. 2.32

Conociendo la desaceleración, se obtiene el tiempo de frenada a partir de la ecuación:

$$t_{v_0-v} = \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{a}$$

$$= -m \cdot \sigma_f \cdot \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{F_f + m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) + f_r \cdot m \cdot g + 0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot v^2}$$

Ec. 2.33

Obteniendo el tiempo necesario para desacelerar entre dos velocidades:

$$A = [0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot (F_f + m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) + f_r \cdot m \cdot g)]^{\frac{1}{2}}$$

$$B = \left(\frac{0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f}{F_f + m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) + f_r \cdot m \cdot g} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$t_{v_0-v} = \frac{m}{A} \cdot (tg^{-1}(B \cdot v_0) - tg^{-1}(B \cdot v))$$

Ec. 2.34

Despreciando los efectos aerodinámicos se obtiene de la ecuación 2.34:

$$t_{v_0-v} = m \cdot \frac{1}{F_f + m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) + f_r \cdot m \cdot g} \cdot (v_0 - v)$$

Ec. 2.35

2.2. CIRCULACIÓN EN CURVA.

En este apartado se opto por trabajar con coordenadas polares debido a su simpleza para describir trayectorias, velocidades y aceleraciones a comparación del eje cartesiano. “Las direcciones positivas de las coordenadas r y θ son definidas por los vectores unitarios \vec{u}_r y \vec{u}_θ respectivamente” (Hibbeler, Mecánica Vectorial para Ingenieros: Dinámica, 2004, pág. 62).

En base a lo mencionado anteriormente, la ecuación de la velocidad será:

$$\vec{v}(t) = \frac{dr(t)}{dt} \cdot \vec{u}_r + r(t) \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} \cdot \vec{u}_\theta$$

Ec. 2.36

Y la ecuación general de la aceleración será:

$$\vec{a}(t) = \left[\frac{d^2r(t)}{dt^2} - r(t) \cdot \left(\frac{d\theta(t)}{dt} \right)^2 \right] \cdot \vec{u}_r + \left[r(t) \cdot \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} - 2 \frac{dr(t)}{dt} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} \right] \cdot \vec{u}_\theta$$

Ec. 2.37

En donde:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t) = \text{Velocidad angular.}$$

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{d\omega(t)}{dt} = \alpha(t) = \text{Aceleración angular.}$$

2.2.1. MOVIMIENTO CIRCULAR.

En el caso en que el radio permanezca constante se tiene un movimiento circular, que se caracteriza por ser la trayectoria una circunferencia centrada al origen. En este sistema es apropiado trabajar con los ángulos expresados en radianes.

$$r(t) = R \rightarrow \frac{dr(t)}{dt} = \frac{d^2r(t)}{dt^2} = 0$$

Ec. 2.38

Con esto se simplifican las ecuaciones 2.36 y 2.37 quedando:

$$\vec{v}(t) = R \cdot \omega(t) \cdot \vec{u}_\theta$$

Ec. 2.39

y

$$\vec{a}(t) = -R \cdot \omega^2(t) \cdot \vec{u}_r + R \cdot \alpha(t) \cdot \vec{u}_\theta$$

Ec. 2.40

Para el caso en que la velocidad angular sea constante, tenemos que $\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t) = \omega \rightarrow \alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = 0$, con lo que las ecuaciones 2.39 y 2.40 quedan:

$$\vec{v}(t) = R \cdot \omega \cdot \vec{u}_\theta$$

Ec. 2.41

y

$$\vec{a}(t) = -R \cdot \omega^2 \cdot \vec{u}_r + R \cdot \alpha \cdot \vec{u}_\theta$$

Ec. 2.42

Expresando la velocidad en función de la velocidad angular y del radio ($v = \omega \cdot R$), de la ecuación 2.41 y 2.42 tenemos:

$$\vec{v}(t) = v \cdot \vec{u}_\theta$$

Ec. 2.43

y

$$\vec{a}(t) = -\frac{v^2}{R} \cdot \vec{u}_r + R \cdot \alpha \cdot \vec{u}_\theta$$

Ec. 2.44

Despejando el tiempo de la ecuación de la velocidad angular en función del ángulo recorrido por unidad de tiempo, tenemos:

$$t = \frac{\theta}{\omega}$$

Ec. 2.45

La longitud del arco recorrido S , en función del radio R , y del ángulo θ , debe corresponder con la recorrida en función a la velocidad

$$S = \theta \cdot R = v/3.6 \cdot t$$

Ec. 2.46

Retomando la aceleración esta posee dos componentes, el primero es la aceleración tangencial a_t , y el segundo, la aceleración normal a_n .

$$\vec{a}(t) = a_t(t) \cdot \vec{u}_t + a_n(t) \cdot \vec{u}_n$$

Ec. 2.47

La aceleración tangencial viene dada por la ecuación:

$$a_t(t) = \frac{dv(t)}{dt}$$

Ec. 2.48

Mientras que la aceleración normal por la ecuación:

$$a_n(t) = \frac{v^2(t)}{R}$$

Ec. 2.49

Suponiendo que la velocidad es constante $a_t(t) = \frac{dv(t)}{dt} = 0$.

Quedando la ecuación 2.49 para una velocidad y radio constante:

$$a_n(t) = \frac{\left(\frac{v}{3.6}\right)^2}{R}$$

Ec. 2.50

2.2.2. MOVIMIENTO CIRCULAR CON DESACELERACIÓN.

Para un vehículo que recorriendo una trayectoria curva de radio constante, aplicase los frenos, genera una desaceleración a_f , teniendo una componente normal (ecuación 2.49), y una componente tangencial (ecuación 2.48) la cual tendrá signo negativo debido a la desaceleración siendo $a_t(t) = -a_f$, quedando la ecuación 2.47 de la forma:

$$\vec{a}(t) = -a_f \cdot \vec{u}_t + a_n \cdot \vec{u}_n$$

Ec. 2.51

Siendo la aceleración total:

$$a = |\vec{a}(t)| = \sqrt{a_f^2 + a_n^2}$$

Ec. 2.52

2.2.3. DERRAPE Y VUELCO EN CURVA.

Para este apartado las ecuaciones para determinar la aceleración y velocidad límite para que se produzca el derrape o el vuelco serán las mismas ya que estas ecuaciones se basan en el punto en donde el vehículo pierde el control.

Expuesto anteriormente un vehículo que circule a una velocidad constante por una trayectoria curva va a presentar solo una componente normal de aceleración, siendo eliminada la componente tangencial. Retomando la ecuación 2.49 y planteando una correspondencia para la aceleración máxima antes de que se produzca el derrape $a_{límite}$, tenemos:

$$a_n(t) = \frac{v^2(t)}{R} = \frac{v^2}{R} \geq a_{límite}$$

Ec. 2.53

De la ecuación 2.53 se logra obtener la velocidad mínima para producir el derrape en una curva dada:

$$v \geq v_{límite} = \sqrt{a_{límite} \cdot R}$$

Ec. 2.54

Hablando únicamente de derrape, en el caso en que se apliquen los frenos, aparece la componente tangencial de la aceleración. De la ecuación 2.52 podemos deducir que:

$$a = \sqrt{a_f^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2} \geq a_{límite_derrape}$$

Ec. 2.55

De la ecuación 2.55 obtenemos la velocidad límite para que se produzca el derrape mientras se aplican los frenos:

$$v \geq \sqrt{R \cdot \sqrt{a_{límite_derrape}^2 - a_f^2}}$$

Ec. 2.56

2.2.3.1. VELOCIDAD LIMITE DE DERRAPE.

Existen varias formas en las que se puede producir un derrape, como pérdida de control debido a una maniobra brusca, pérdida de control debido a contaminantes en la vía y para nuestro estudio el tipo de forma en el cual nos vamos a centrar en la pérdida de control lateral circulando en una trayectoria curva debido a un exceso de velocidad.

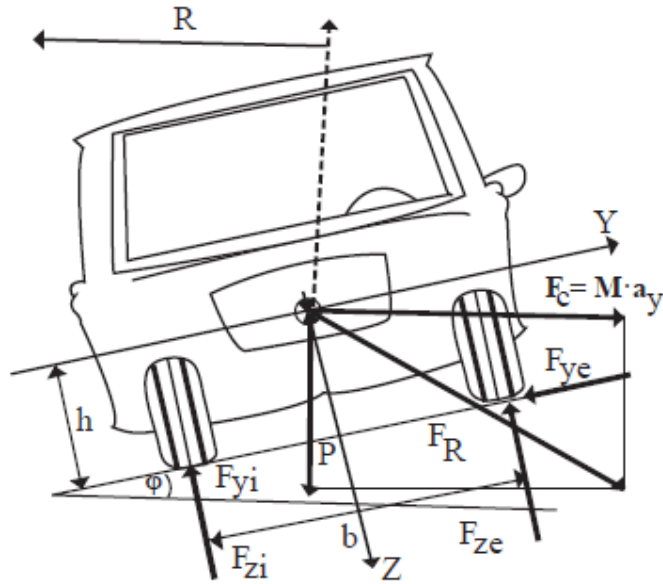


Figura 2.2 Fuerzas que actúan sobre un vehículo circulando en curva.

Retomando la segunda ley de Newton y aplicándola al sistema de fuerzas de la figura 11.12, tenemos:

$$\sum F_y = m \cdot a_y \rightarrow -F_{ye} - F_{yi} - P \cdot \text{sen}(\zeta) = m \cdot a_y \cdot \cos(\zeta)$$

Ec. 2.57

y

$$\sum F_z = m \cdot a_z \rightarrow -F_{ze} - F_{zi} + P \cdot \cos(\zeta) = m \cdot a_y \cdot \text{sen}(\zeta)$$

Ec. 2.58

Teniendo presente que la adherencia es igual en el neumático interior y exterior $(F_{ze} + F_{zi}) \cdot \mu = F_{ye} + F_{yi}$, y que $a_y = \frac{v^2}{R}$, reemplazamos estas expresiones en las ecuaciones 2.57 y 2.58 e igualándolas, tenemos:

$$\left(P \cdot \cos(\zeta) + \frac{P}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \text{sen}(\zeta) \right) \cdot \mu_y = -P \cdot \text{sen}(\zeta) + \frac{P}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos(\zeta)$$

Ec. 2.59

A la ecuación 2.59, simplificándola, agrupando términos y despejando la velocidad v , y si el coeficiente de rozamiento μ , alcanza el máximo valor posible $\mu_y = \mu_{y_max}$ tenemos:

$$v_{\text{límite_derrape}} = \sqrt{g \cdot R \cdot \frac{\mu_{y_max} + \tan(\zeta)}{1 - \mu_{y_max} \cdot \tan(\zeta)}}$$

Ec. 2.60

2.2.3.2. VELOCIDAD LIMITE DE VUELCO.

El vuelco lateral ocurre cuando F_R (fuerza resultante sobre centro de gravedad), corta a la superficie de rodadura del neumático exterior, en el punto de la huella de contacto (punto A, figura 11.12). Para este caso las componentes de F_R , se pueden expresar como:

$$F_z = P \cdot \cos(\zeta) + F_c \cdot \text{sen}(\zeta)$$

Ec. 2.61

y

$$F_y = -P \cdot \text{sen}(\zeta) + F_c \cdot \cos(\zeta)$$

Ec. 2.62

La condición de vuelco se obtiene de la relación:

$$\frac{F_z}{F_y} = \frac{F_c \cdot \cos(\zeta) - P \cdot \text{sen}(\zeta)}{P \cdot \cos(\zeta) + F_c \cdot \text{sen}(\zeta)} \cong \frac{b/2}{h}$$

Ec. 2.63

Teniendo en cuenta la expresión de la fuerza centrífuga $F_c = \frac{P}{g} \cdot \frac{v^2}{R}$, sustituyendo F_c , en la ecuación 2.63, y despejando la velocidad, tenemos:

$$v_{\text{límite_vuelco}} = \sqrt{g \cdot R \cdot \frac{\frac{b/2}{h} + \tan(\zeta)}{1 - \frac{b/2}{h} \cdot \tan(\zeta)}}$$

2.2.3.3. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD LÍMITE DE VUELCO EN DESLIZAMIENTO LATERAL.

Un vehículo que se encuentra en estado de derrape se encuentra con un obstáculo rígido, este hace que frene el deslizamiento, produciendo un detenimiento del vehículo o su vuelco.

“La relación entre la velocidad de deslizamiento y la de rotación se obtiene aplicando el teorema de conservación del momento angular.” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 253)

$$I_P \cdot \dot{\varphi}_P = m \cdot v_y \cdot h$$

Ec. 2.65

Donde:

I_P : Momento de inercia de toda la masa respecto al punto de contacto entre la rueda y el obstáculo.

La condición límite para que se produzca el vuelco en este caso será que la energía cinética debe ser mayor que la energía potencial en el instante de impacto, teniendo:

$$\frac{1}{2} \cdot I_P \cdot \dot{\varphi}_P^2 \geq m \cdot g \cdot \left[\sqrt{h_s^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - h \right]$$

Ec. 2.66

El momento de inercia en el punto de contacto vendrá dado por la expresión:

$$I_P = I_{cdg} + m_s \cdot \left[\left(\frac{b}{2}\right)^2 + h^2 \right]$$

Ec. 2.67

En donde:

$$I_{cdg} = a \cdot m_s \cdot \left[\left(\frac{b}{2}\right)^2 + h^2 \right]$$

Ec. 2.68

Donde a , es un coeficiente adimensional el cual toma un valor de “0.404” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 254) para la mayoría de vehículos.

Combinando la ecuación 2.65 con la ecuación 2.66, reemplazando I_p, I_{cdg} , y despejando la velocidad tenemos:

$$v_{\text{límite_vuelco}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (a + 1) \cdot h_s \cdot \left[1 + \left(\frac{b}{2 \cdot h} \right)^2 \right] \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2 \cdot h} \right)^2} - 1 \right]}$$

Ec. 2.69

2.2.3.4. ADHERENCIA LATERAL EN CIRCULACION EN CURVA.

Se debe tener en cuenta que el valor de μ_{y_max} , dependerá de las consideraciones analizadas en el Capítulo 1 de este estudio, tales como tipo de calzada, presencia de agua en la calzada, etc.

Además, hasta el momento se ha considerado que todos los neumáticos giran con el mismo ángulo de deriva. “En general los ángulos de deriva serán diferentes para cada neumático” (Aparicio, Vera, & Diaz, 2001, pág. 354), lo que ocasiona que en condición de derrape, el neumático con el ángulo más pronunciado haya empezado el deslizamiento antes que es resto.

Por último se debe tener en cuenta que la fuerza centrífuga F_c , actúa en dirección de y , siendo compensada en cada neumático, soportando empujes y_1, y_2, y_3 y y_4 , que no coinciden con la dirección transversal de las ruedas mencionadas.

2.2.4. CAIDA AL VACIO.

En el caso en donde el vehículo que circula a una velocidad v_0 , sale de la vía y cae al vacío, se puede tratar como un movimiento parabólico, posibilitando utilizar las ecuaciones características de este movimiento, resultando $a_x = 0$ y $a_y = g$.

La ecuación de las componentes de la velocidad se obtienen integrando la aceleración en X , $v_x(t) = v_0 \cdot \cos(\theta)$ y en Y , $v_y(t) = v_0 \cdot \text{sen}(\theta) - g \cdot t$, e integrando nuevamente estas ecuaciones obtenemos las ecuaciones que expresan la posición en un tiempo específico:

$$x(t) = v_0 \cdot t \cdot \cos(\theta)$$

Ec. 2.70

y

$$y(t) = v_0 \cdot t \cdot \sin(\theta) - \frac{1}{2}g \cdot t^2$$

Ec. 2.71

Reemplazando con respecto al tiempo la ecuación 2.70 en la ecuación 2.71 se obtiene la ecuación que define el movimiento parabólico del vehículo, de la cual se puede obtener en base al despeje la velocidad al momento de despegue, tiempo de caída y posiciones en ambos ejes:

$$y = x \cdot \tan(\theta) - \frac{g}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2(\theta)} \cdot x^2$$

Ec. 2.72

Para este estudio el común denominador será una vía horizontal, por lo que $\theta = 0 \rightarrow \sin(\theta) = 0, \cos(\theta) = 1$.

La velocidad final del vehículo tiene una componente v_x , y v_y , en donde v_x , permanece constante, mientras que v_y , está en función del tiempo de caída.

$$v_x(t) = v_0 \cdot \cos(\theta) = v_0 \cdot \cos(0) = \frac{v_0}{3.6}$$

Ec. 2.73

y

$$v_y(t) = v_0 \cdot \sin(\theta) - g \cdot t = -g \cdot t$$

Ec. 2.74

Formulando la suma de los vectores v_x y v_y , el modulo de la velocidad total estará dado por la ecuación:

$$v_{total} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

Ec. 2.75

2.3. ANALISIS CINEMATICO Y DINAMICO DE LA CIRCULACION VEHICULAR EN LA RECONSTRUCCION DE ACCIDENTES DE TRANSITO.

Todo accidente de tránsito posee una etapa de pre-colisión que estará caracterizada por velocidades iniciales, trayectorias y aceleraciones. Estas variables son el punto a determinar de toda esta investigación por lo tanto en el siguiente capítulo se deberá al final hacer una retroalimentación de este capítulo para enlazar las ecuaciones y determinar la evolución espacio-temporal del accidente. Para una mayor comprensión véase Anexo B.

CAPÍTULO III

3. PROPUESTA DE UN MODELO PARA PERITAJE DE SINIESTROS DE VEHICULOS LIVIANOS.

Mediante nuestra experiencia personal en reconstrucción de siniestros y en base a formulaciones matemáticas de varios autores que se detallara posteriormente, se ha creado un modelo de peritaje de siniestros para vehículos livianos, el cual no puede ser tomado como ley para todos los casos debido a que las colisiones no siempre se rigen por los mismos parámetros, por ejemplo una colisión a baja velocidad no se podrá analizar de la misma forma que una a exceso de velocidad.

Este estudio, para conseguir datos fiables será aplicable en colisiones con velocidades comprendidas entre 40 a 90 km/h, en donde no exista un desprendimiento de masa considerable y tampoco existan masas arrastradas como remolques. No es aplicable este estudio para colisiones entre tres o más vehículos.

Siempre partiremos de una o varias hipótesis sobre qué fue lo que sucedió. El fin de esta investigación es tratar de comprobar nuestra hipótesis o refutarla.

3.1. LEVANTAMIENTO DE LA ESCENA DEL ACCIDENTE.

En un siniestro automotriz tendremos tres posibles escenarios:

El primero será una investigación en la escena del accidente, con los vehículos, objetos, peatones, etc., sin haber sido retirados de su lugar. Este escenario si bien es el ideal para realizar un peritaje, es el menos común debido a que al momento de presentarse una colisión, una de las últimas instancias es la de la investigación de los hechos, siendo esta precedida por las acciones de los grupos de emergencia, acciones legales, etc.



Fotografía 3.6 Escena del accidente sin retirar elementos de la vía.

Como segundo escenario tendremos una escena dividida, por un lado se tendrán los vehículos involucrados en la colisión, los cuales ya no se encuentran en el lugar de los hechos y por otro lado la escena del accidente, con lo que se puede obtener evidencias como marcas en la calzada, testimonios de testigos ajenos a los vehículos, lugar de impacto en la vía, etc.



Fotografía 3.7 Escena de accidente dividida (vehículo).



Fotografía 3.8 Escena de accidente dividida (lugar de los hechos).

Como ultimo escenario se tendrá un caso en el que únicamente dispondremos del o los vehículos siniestrados. Este escenario si bien es el menos ideal, es el más común.,

teniendo como única evidencia la deformación residual de los vehículos, aparte de los testimonios de las personas implicadas.

Sin importar el tipo de escenario con el que nos encontremos siempre debemos tener acceso a un factor común que será el o los vehículos implicados. Por experiencia nuestra, los testimonios de las personas implicadas no siempre serán fiables ya que por lo general no existe un testimonio objetivo de la ocurrencia del siniestro, pero esta declaración puede ayudar a guiar nuestra investigación.

Esta investigación se basara en los dos últimos escenarios mencionados anteriormente ya que se considera al primer caso descrito como irreal debido a sus características. Por ejemplo los cuerpos de emergencia no van a esperar a que se realice la investigación de la escena para luego retirar a las personas afectadas.

3.1.1. RECOLECCION DE EVIDENCIA A PARTIR DE LA ESCENA DEL ACCIDENTE.

En el caso de tener acceso a la escena del accidente debemos tener claro que nos vamos a encontrar con una cantidad de evidencia incompleta, debido a que en el transcurso del tiempo desde el accidente hasta la investigación de campo, los grupos de limpieza, el viento, la lluvia, los vehículos ocupantes de la vía, etc., borrarán gran parte de la escena del accidente.

Entre las acciones más importantes a tener en cuenta al acudir a la escena del accidente tenemos:

- Recopilar la mayor cantidad de información posible sobre la ocurrencia del accidente, ya sea de partes policiales, declaraciones verbales o escritas de los implicados, artículos de prensa, etc.
- Obtener información sobre el estado meteorológico al momento del accidente, en base a esto podemos establecer con certeza los coeficientes de resistencia a la rodadura, como también se puede plantear o eliminar la hipótesis del fenómeno de aquaplaning.
- Realizar un reconocimiento de la zona del accidente para así delimitar el área que será motivo de investigación.

- Realizar un levantamiento fotográfico de toda el área de investigación, incluidos los elementos que consideremos evidencias del siniestro, tomando las medidas de los elementos de mayor interés.

Un aspecto importante que se debe tomar en cuenta es que por lo general existe un registro fotográfico de la escena del accidente instantes después de ocurrido, ya sea por parte de la prensa o de las personas implicadas, de existir este registro debemos tomarlo con mucha importancia ya que si bien suele ser muy general, nos ayudara a corroborar varios resultados a obtener, aparte de enfocar de mejor manera nuestra investigación.

Luego de haber establecido los parámetros anteriores se procederá por identificar evidencia específica. Entre las evidencias más comunes en la escena de un accidente automotriz podemos citar:

- Acumulaciones de aceite o refrigerante en la calzada que indicarán la posición final de los vehículos. Esta posición final no define la dirección del vehículo, solo el punto en que $v = 0$.



Fotografía 3.9 Marcas de aceite en la calzada.

- Restos de elementos desprendidos de los automóviles, con los que tendremos una idea del lugar en la vía en donde se produjo la colisión. Con esta evidencia se debe tener un cuidado especial ya que se deberá diferenciar entre los elementos dentro de la zona de colisión y los elementos que salieron “disparados” por la colisión. Por lo general los elementos “disparados” por la colisión se encuentran con grandes distancias de separación entre ellos a comparación de elementos de la zona de colisión que se encontrarán reunidos. Entre los restos más comunes tenemos vidrios y polímeros.



Fotografía 3.10 Restos del vehículo en la calzada.

- Marcas de impacto en la calzada. Este tipo de rastros se presentan cuando existe volcamiento y se caracteriza por presentar ralladura en la calzada.



Fotografía 3.6 Marcas de ralladura en la calzada.

- Marcas de impacto en objetos fijos de la escena del accidente como barreras contenedoras, postes, arboles, etc.



Fotografía 3.7 Marcas de impacto en objetos fijos.

- Marcas de neumáticos, que suelen ser las más comunes y las que más perduran en el tiempo.



Fotografía 3.8 Marcas de neumáticos.

3.1.2. RECOLECCION DE EVIDENCIA A PARTIR DE LOS VEHICULOS SINIESTRADOS.

A diferencia de la evidencia en la escena del accidente que se pierde con el tiempo, la evidencia en los vehículos siniestrados perdura en el tiempo, salvo obvias excepciones como que se repare la parte afectada. Estas evidencias serán primordialmente de las deformaciones residuales en los vehículos, y es de vital importancia identificar con qué tipo de siniestro nos encontramos (colisión frontal, volcamiento, etc.). Mediante esta deformación podemos plantear las siguientes hipótesis:

- Trayectoria del vehículo al momento del impacto, por ejemplo una deformación en la parte lateral nos permite crear una hipótesis de que el vehículo circulaba por una intersección.



Fotografía 3.9 Impacto lateral.

- En caso de no poseer información completa, la deformación nos brinda una idea clara del elemento con el que se pudo producir el impacto, por ejemplo

el impacto entre dos vehículos deja deformaciones amplias, mientras que el impacto contra un poste deja una deformación concentrada en un punto.



Fotografía 3.10 Impacto contra un objeto fijo e indeformable.



Fotografía 3.11 Impacto contra otro vehículo.

- Ralladura en los costados o deformación en la parte superior del vehículo nos dan una idea de que se produjo un volcamiento.



Fotografía 3.12 Marcas de volcamiento.

3.2. RECONSTRUCCION DEL SINIESTRO VEHICULAR.

El principal objetivo de la reconstrucción del siniestro vehicular será determinar las velocidades a las que los vehículos circulaban y su trayectoria. Los resultados que obtengamos no podrán ser considerados como exactos sino más bien con estos resultados se planteará un rango de valores que se acercaran a la realidad de los sucesos.

3.2.1. RECONSTRUCCION MATEMATICA DEL ACCIDENTE EN BASE A LA DEFORMACION PERMANENTE.

Como bien se sabe, la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Teniendo en cuenta este principio podemos formular la hipótesis de que la energía cinética en la colisión es similar a la energía de deformación de los vehículos implicados

Haciendo referencia a la tercera ley de Newton (ley de acción y reacción) se pueden plantear dos etapas en una colisión, la primera etapa, la compresión, en la que se deforman los elementos del vehículo y la segunda etapa, la repulsión, en la que se restituyen dichos elementos y se repelen los vehículos u objetos implicados en la colisión. Esta restitución no siempre será completa debido a que la energía de impacto se transforma en deformación permanente de los materiales, calor, etc.

En base a esta deformación permanente o no permanente se pueden determinar parámetros como la variación de la velocidad entre el momento pre-colisión y post-colisión, la energía cinética de la colisión, etc.

Sin embargo estos datos no serán 100% exactos ya que muchos valores que se emplearán serán obtenidos a partir de tablas generales, estimaciones, etc. Por lo que se debe tener mucho cuidado al momento de la reconstrucción matemática del accidente ya que podemos fallar con un margen de error inaceptable, solo por una mala estimación.

En una colisión se presentan dos fases de energía, la inicial que incluirá energía cinética y potencial y la final que aparte de tener energía cinética tendrá energías disipadas ya sea por medio de la deformación, fricciones, etc. De manera que la ecuación de la energía final, será:

$$E_{final} = E_{cinetica_final} + E_{deformacion} + E_{friccion} + E_{termica} + E_{acustica}$$

Ec. 3.1

Para el caso de dos vehículos (A y B) en los que no se modifican las masas, esto quiere decir que no hay un desprendimiento de elementos considerable, y sin modificación de momentos de inercia, la energía inicial se puede expresar de la siguiente manera:

$$E_{inicial} = E_{cinetica_inicial}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot m_A \cdot v_{inicial_A}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_A \cdot \omega_{inicial_A}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_B \cdot v_{inicial_B}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_B \cdot \omega_{inicial_B}^2$$

Ec. 3.2

Mientras que la ecuación de la energía cinética final será:

$$E_{cinetica_final} = \frac{1}{2} \cdot m_A \cdot v_{final_A}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_A \cdot \omega_{final_A}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_B \cdot v_{final_B}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_B \cdot \omega_{final_B}^2$$

Ec. 3.3

Para este estudio se debe tener presente el coeficiente de restitución C_R , que tomará valores entre 0 y 1, representando el valor máximo de 1, una colisión perfectamente elástica en donde no existen deformaciones, conservando toda la energía cinética inicial, y representado el valor mínimo de 0, una colisión perfectamente plástica en donde no existirá la repulsión del vehículo una vez ocurrido el choque, transformando la energía cinética inicial en otros tipos de energía como calorífica, acústica, etc.

Un accidente perfectamente plástico o perfectamente elástico no engloban la realidad de un accidente que por lo general conserva una parte de energía cinética inicial y a su vez transforma esta energía, denotando este caso como colisión electro-plástica $0 < C_R < 1$.

Por lo tanto esta diferencia de energía se puede expresar como:

$$\Delta E_{cinetica} = E_{cinetica_inicial} - E_{cinetica_final}$$

$$= \left(\frac{1}{2} \cdot m_A \cdot v_{inicial_A}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_A \cdot \omega_{inicial_A}^2 \right) - \left(\frac{1}{2} \cdot m_B \cdot v_{final_B}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_B \cdot \omega_{final_B}^2 \right)$$

Ec. 3.4

3.2.1.1. COLISION CENTRADA.

Este tipo de colisión engloba todos los impactos que se producen entre dos vehículos o un vehículo y un objeto fijo, en donde sus centros de gravedad coinciden en la misma línea de impacto.

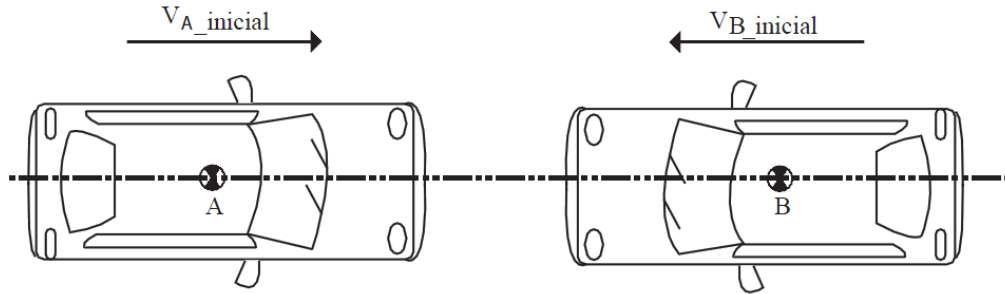


Figura 3.1 Colisión centrada.

En este tipo de colisiones el valor de C_R , vendrá dado por la ecuación:

$$C_R = -\frac{v_{B_final} - v_{A_final}}{v_{B_inicial} - v_{A_inicial}}$$

Ec. 3.5

Obteniendo las velocidades a partir de las ecuaciones:

$$v_{A_final} = v_{A_inicial} + (1 + C_R) \cdot m_B \cdot \frac{v_{B_inicial} - v_{A_inicial}}{m_A + m_B}$$

Ec. 3.6

$$v_{B_final} = v_{B_inicial} - (1 + C_R) \cdot m_A \cdot \frac{v_{B_inicial} - v_{A_inicial}}{m_A + m_B}$$

Ec. 3.7

La velocidad inicial vendrá de estimaciones, hipótesis, declaraciones de testigos, etc.

Obteniendo de esta manera Δv , que vendrá dado por la ecuación:

$$\Delta v_A = v_{A_inicial} - v_{A_final}$$

Ec. 3.8

$$\Delta v_B = v_{B_inicial} - v_{B_final}$$

Ec. 3.9

En caso de una colisión contra un objeto fijo e indeformable la ecuación 3.5 se reduce a:

$$C_R = -\frac{v_{A_final}}{v_{A_inicial}}$$

Ec. 3.10

Este escenario es común para determinar mediante colisiones controladas, el coeficiente de restitución C_R .

3.2.1.2. COLISION DESCENTRADA.

A diferencia del tipo de colisión centrada, este engloba los impactos ocasionados por dos vehículos o un vehículo y un objeto fijo, en donde sus centros de gravedad no se encuentran en la misma línea de impacto. Este tipo de colisión es el más común ya que engloba una mayor cantidad de posibilidades.

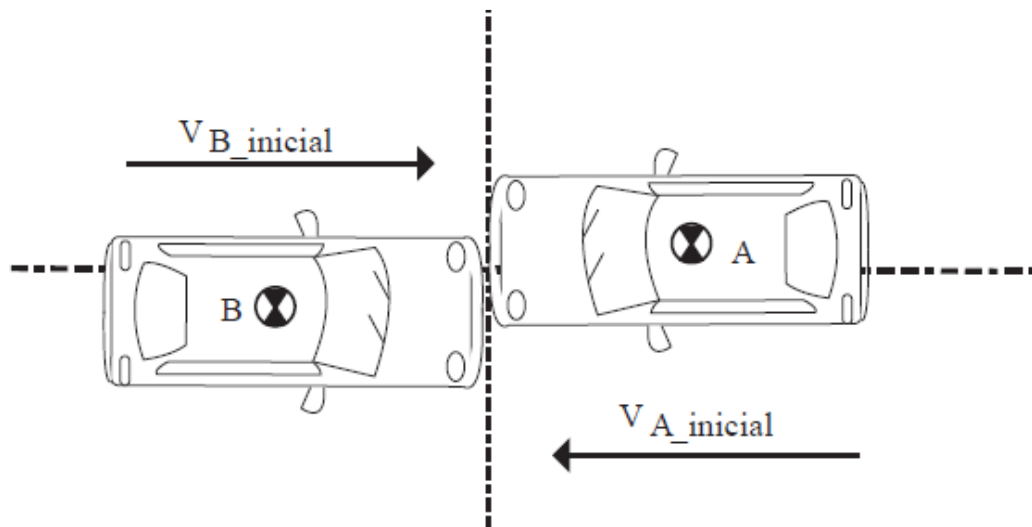


Figura 3.2 Colisión descentrada.

En este tipo de colisiones aparece una componente normal y tangencial, produciendo una deformación estructural y una variación en su movimiento. Resulta conveniente aislar cada vehículo para su estudio y considerar una resultante de las fuerzas por el impacto con un punto de aplicación.

3.2.1.3. COEFICIENTE DE RESTITUCION C_R .

“El coeficiente de restitución que expresa la relación entre las velocidades normales en el impacto, se determinara en función de las componentes normales de los centroides (punto C) de cada vehículo” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 276).

$$C_R = - \frac{(\vec{v}_{CB_final})_n - (\vec{v}_{CA_final})_n}{(\vec{v}_{CB_inicial})_n - (\vec{v}_{CA_inicial})_n}$$

Ec. 3.10

El coeficiente de restitución se obtiene a partir de colisiones controladas. Este valor será propio para cada vehículo ya que para cada vehículo a una misma velocidad y trayectoria será un valor diferente puesto que variaran las características del vehículo como son la masa, el área frontal, etc.

Este coeficiente tiene relación directa con la velocidad de impacto, a mayor velocidad menor será este coeficiente mientras que a muy baja velocidad se puede producir una colisión perfectamente plástica.

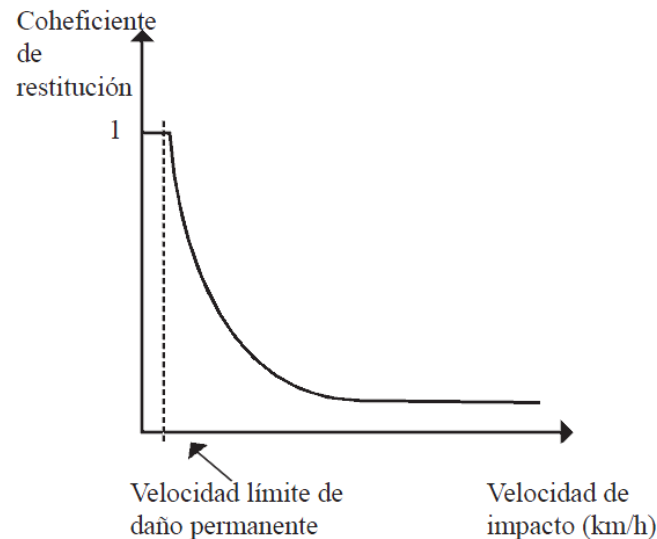


Figura 3.3 Relación entre el coeficiente de restitución y la velocidad.

Como referencia a una colisión frontal con un objeto fijo e indeformable, a velocidades entre 48.3 km/h a 56.3 km/h, en la que se ve afectada toda la longitud frontal, C_R , tomará un valor promedio de 0.112 con una variación de 0.028. Otros valores de C_R para diferentes casos encontraremos en Anexo A.

3.2.1.4. COEFICIENTE DE RESTITUCION EQUIVALENTE.

En un accidente frontal entre dos vehículos, cada uno tendrá un valor de coeficiente de restitución frontal, por lo que los valores indicados anteriormente no tendrán validez para en este tipo de colisión. Es por esto que es necesario un coeficiente de restitución equivalente que represente ambos coeficientes (véase Anexo A)

A partir de la deformación del vehículo se puede plantear la ecuación:

$$C_K = \frac{C_{R_B}^2 \cdot K_A + C_{R_A}^2 \cdot K_B}{K_A + K_B}$$

Ec. 3.11

Donde:

K_A y K_B : rigidez de los vehículos A y B, respectivamente.

C_{R_A} y C_{R_B} : coeficientes de restitución a partir de ensayos contra barrera.

La ecuación 3.11 supone que las deformaciones de ambos vehículos son casi iguales lo que no siempre es cierto en una colisión, por lo que es necesario plantear una ecuación en función a las masas de los vehículos, teniendo:

$$C_m = \sqrt{\frac{C_{R_B}^2 \cdot m_A + C_{R_A}^2 \cdot m_B}{m_A + m_B}}$$

Ec. 3.12

La ecuación 3.12 no puede ser tomada como ley ya que asume que las energías de deformación serán iguales en ambos vehículos cosa que tampoco siempre es cierta por lo que según el caso se debe variar entre las ecuaciones 3.11 y 3.12.

3.2.1.5. RELACION ENTRE ENERGIA ABSORBIDA Y DEFORMACION PERMANENTE.

Partiendo de la tesis de Kenneth Campbell, que propone que “la energía absorbida en un impacto de dos objetos es proporcional a la magnitud y forma de la deformación permanente” (Garcia, 2005), se puede estimar la energía absorbida como trabajo de deformación permanente en una colisión. La ecuación que expresara la energía de

deformación $E_{def_plastica}$, con deformación permanente C_i , será la ecuación diferencial:

$$dE_i = \left(K_{1i} \cdot C_i + \frac{1}{2} \cdot K_{2i} \cdot C_i^2 + K_{3i} \right) \cdot dw$$

Ec. 3.13

Donde:

K_{1i} y K_{2i} : Coeficientes empíricos obtenidos a partir de ensayos de impacto contra barrera.

K_{3i} : Relación entre K_{1i} y K_{2i} .

La integración de la ecuación de energía se realiza en forma gráfica, dividiendo el ancho de la zona deformada en cinco zonas de igual ancho $L/5$. La deformación media de cada zona será el promedio de la deformación en los extremos de la zona considerada. De tal manera que $C_1 = 1/2 \cdot (D_1 + D_2)$, $C_2 = 1/2 \cdot (D_2 + D_3)$, ..., etc.

Resolviendo la integral en la forma discontinua propuesta, se obtiene la expresión de la deformación media C , la cual es:

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

Ec. 3.14

De la ecuación 3.14 se obtiene la expresión desarrollada de la energía cinética absorbida en el impacto en forma de trabajo de deformación, la cual será:

$$E_{def_plastica} = \frac{L}{5} \cdot \left[\frac{A}{2} \cdot (C_1 + 2 \cdot C_2 + 2 \cdot C_3 + 2 \cdot C_4 + 2 \cdot C_5 + C_6) + \frac{B}{6} \cdot (C_1^2 + 2 \cdot C_2^2 + 2 \cdot C_3^2 + 2 \cdot C_4^2 + 2 \cdot C_5^2 + C_6^2 + C_1 \cdot C_2 + C_2 \cdot C_3 + C_3 \cdot C_4 + C_4 \cdot C_5 + C_5 \cdot C_6) + \frac{5 \cdot A^2}{2 \cdot B} \right]$$

Ec. 3.15

Donde:

K_1 : Fuerza máxima por unidad de ancho que no produce deformación permanente.

K_2 : Rigidez por unidad de ancho.

Los parámetros K_1 y K_2 se obtienen a partir de ensayos de impacto contra barrera.

El valor de C_i , será la profundidad de la deformación con respecto al valor original.

Una manera práctica de realizar esta medición es tomar las medidas en el vehículo siniestrado y luego realizar un bosquejo en dos dimensiones con los valores recopilados.



Fotografía 3.13 Medición de la deformación residual.

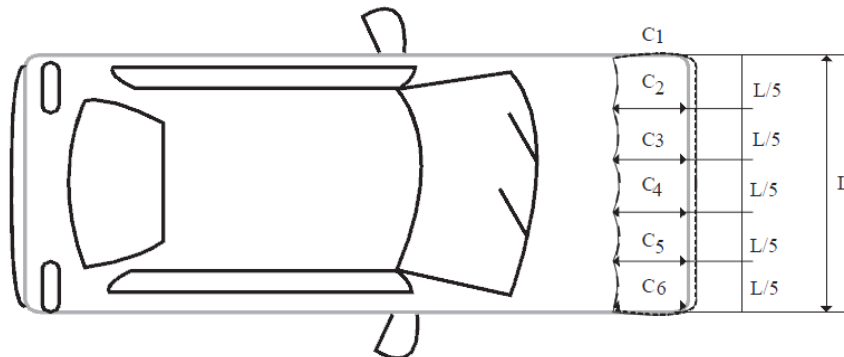


Figura 3.4 Bosquejo en dos dimensiones.

3.2.1.6. DIRECCION PRINCIPAL DE LA FUERZA DE COLISION.

Del impacto entre dos vehículos podemos deducir un impulso de la fuerza F_c , igual y opuesto para cada vehículo, el cual será un promedio temporal y espacial de las fuerzas internas de la colisión en los vehículos. Esta fuerza se mueve por una línea colineal para ambos vehículos, conocida como “dirección principal de la fuerza (PDOF)” (Branch & Branch, 2011, pág. 228)

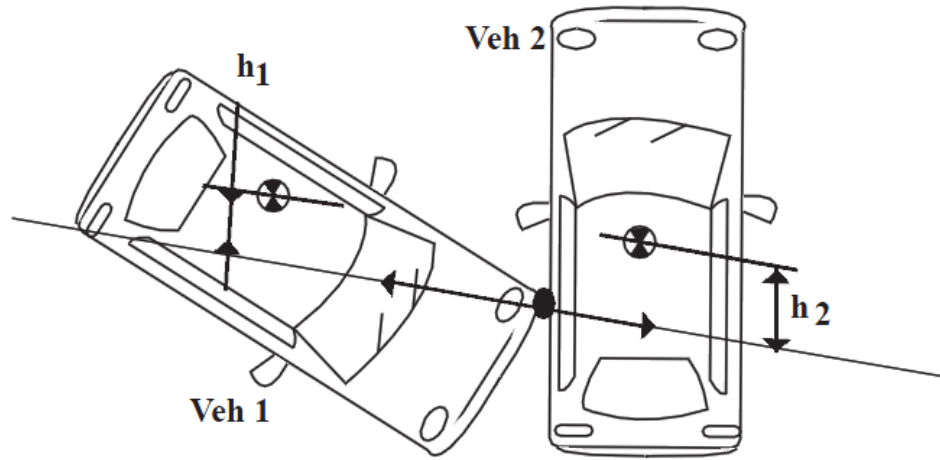


Figura 3.5 Dirección principal de la fuerza de colisión.

En el caso de tener una colisión en la que la dirección de esta fuerza no es colineal con los centros de gravedad de los vehículos presentara un ángulo de desviación φ , el cual será calculado en base a la escena del accidente, evidencias, etc., y además presentará una distancia h , entre la línea PDOF y el centro de gravedad de cada vehículo.

Para este escenario en que la fuerza no es colineal con el centro de masa de los vehículos, se presenta a parte de la deformación lineal, una deformación angular por lo que se debe hacer un ajuste en este escenario al resultado de la ecuación 3.15 mediante la ecuación:

$$E_{def_angular} = (1 + \tan^2(\varphi)) \cdot E_{def_plastica}$$

Ec. 3.16

Continuando con el escenario de una colisión des centrada, habiendo mencionado anteriormente que se presenta una deformación lineal y angular, se deduce que también se presenta una variación en el movimiento lineal y angular de ambos vehículos. Esta variación de movimiento se evaluara mediante un “factor de mayoración de la masa (γ)” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 298), el cual tiene como ecuación:

$$\gamma = \frac{r_z^2}{r_z^2 + h^2}$$

Ec. 3.17

La fuerza F_c , se ubicará en el centroide de colisión que tendrá coordenadas x_c, y_c . El cálculo de estas coordenadas estará en función del centro geométrico de cada una de las 5 zonas deformadas ya establecidas con su respectiva área, mediante la ecuación:

$$y_c = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 + A_3 \cdot y_3 + A_4 \cdot y_4 + A_5 \cdot y_5}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}$$

Ec. 3.18a

$$x_c = \frac{A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3 + A_4 \cdot x_4 + A_5 \cdot x_5}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}$$

Ec. 3.18b

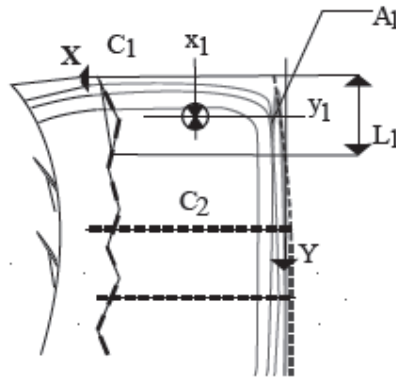


Figura 3.6 Determinación del centroide de colisión.

3.2.1.7. ENERGIA DE DEFORMACION TOTAL.

Expuesto anteriormente la energía cinética inicial $E_{cinetica_inicial}$, se transformara al momento de la colisión en varios tipos de energía, conocido este conjunto como energía disipada $E_{disipada}$, (ruido, calor, deformación permanente, etc.), y mantendrá un remanente de la energía cinética inicial siendo esta la energía cinética final $E_{cinetica_inicial}$.

Para este estudio asumiremos que la energía total disipada es únicamente la consumida como deformación permanente, resultando la ecuación:

$$E_{disipada} = E_{deformacion_total} = E_{def_A} + E_{def_B}$$

Ec. 3.19

3.2.1.8. *Delta-v* (Δv) Y VELOCIDAD INICIAL.

Por lo general se considera la severidad de un accidente de tráfico en base a los daños materiales o personales y proclaman al principal elemento en la gravedad de una colisión a la velocidad, pero no es la velocidad en si la que produce el mayor daño si no la variación de esta entre la fase pre-colisión y post-colisión, a esta variación se le conoce como *Delta-v* (Δv).

“Se denomina Δv a la variación de la velocidad del centro de gravedad de un vehículo por efecto de una colisión” (Luque & Mantaras, 2007, pág. 293).

Para este estudio en el que estamos considerando colisiones con un coeficiente de restitución $0 < C_r < 1$ (comportamiento elasto-plástico), Δv vendrá definido por la ecuación:

$$\Delta v = (1 + C_R) \cdot v_{inicial}$$

Ec. 3.20

Esta variación de velocidad se presenta en las dos etapas mencionadas anteriormente, la compresión y la restitución, denotados por $\Delta v'$ y $\Delta v''$ respectivamente. El primer término analiza el cambio de la velocidad inicial hasta el punto máximo de compresión y el segundo analiza el cambio de velocidad desde el punto máximo de compresión hasta el final del contacto, teniendo la expresión:

$$\Delta v = \Delta v' + \Delta v''$$

Ec. 3.21

Para una colisión entre dos vehículos el cambio de velocidad para la fase de compresión vendrá dado por la ecuación:

$$\Delta v'_A = \frac{m_B}{m_A + m_B} \cdot (v_{B_inicial} - v_{A_inicial})$$

Ec. 3.22a

$$\Delta v'_B = \frac{m_A}{m_A + m_B} \cdot (v_{B_inicial} - v_{A_inicial})$$

Ec. 3.22b

Mientras la variación de velocidad en la fase de repulsión expresan las ecuaciones:

$$\Delta v_A'' = \frac{C_R \cdot m_B}{m_A + m_B} \cdot (v_{B_inicial} - v_{A_inicial})$$

Ec. 3.23a

$$\Delta v_B'' = -\frac{C_R \cdot m_A}{m_A + m_B} \cdot (v_{B_inicial} - v_{A_inicial})$$

Ec. 3.23b

Operando para la velocidad las ecuaciones 3.22 a, 3.22b, 3.23a y 3.23b con sus semejantes y expresando en función de la energía disipada, incluyendo el coeficiente de restitución y de mayoración, se plantea las siguiente ecuaciones:

$$v_{inicial_A} = (1 + C_m) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{def_plastica_A} \cdot \gamma_A}{m_A}}$$

Ec. 3.24a

$$v_{inicial_B} = (1 + C_m) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{def_plastica_B} \cdot \gamma_B}{m_B}}$$

Ec. 3.24b

3.2.1.9. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD INICIAL.

1. Obtener las dimensiones de los vehículos A y B, antes de la colisión, así como su masa m . Estos datos se los pueden obtener a partir de bases de datos, mediciones de otros vehículos iguales o de una estimación en base al vehículo siniestrado.
2. Establecer el valor del coeficiente de restitución C_r , a partir de tablas, datos experimentales, etc., para cada vehículo.
3. Establecer los valores de los coeficientes de rigidez A y B a partir de tablas, datos experimentales, etc., para cada vehículo.
4. Calcular el coeficiente de restitución equivalente C_k o C_m , mediante la ecuación 3.11 o ecuación 3.12 según sea el caso.
5. Establecer la ubicación de los centros de gravedad C_g , de los vehículos antes de la colisión.
6. Determinar el radio de giro r_z , con respecto al eje z, en ambos vehículos.

7. Determinar los momentos de inercia I_z , con respecto al eje z , de ambos vehículos.
8. Delimitar la zona de impacto de ambos vehículos siendo esta la zona de estudio con un ancho de L .
9. Establecer la posición de 6 puntos en ambos vehículos, para medir la profundidad de la deformación con un espacio entre cada uno de $L/5$.
10. Determinar la energía de deformación $E_{def_plastica}$, de los 2 vehículos a partir de la deformación permanente en base a los de 6 puntos ya establecidos mediante la ecuación 3.15.
11. Establecer la dirección principal (PDOF) de la fuerza de colisión F_c , a partir del análisis de la escena del accidente y de las evidencias en los vehículos, siendo este valor común para ambos vehículos.
12. En el caso de que la fuerza de colisión F_c , no es centrada con el plano medio longitudinal del vehículo, teniendo un ángulo φ , de descentramiento, se deberá realizar un ajuste a la energía de deformación E_{def} , mediante la ecuación 3.16, de la energía de deformación angular $E_{angular}$, para cada vehículo.
13. Determinar la distancia h_c , existente entre el centro de gravedad y la línea de acción de la fuerza de colisión.
14. Determinar el factor de mayoración de la masa γ , para ambos vehículos, mediante la ecuación 3.17.
15. Determinar la ubicación geométrica del centroide del área de la colisión (x_c, y_c) en ambos vehículos, según las ecuaciones 3.18a y 3.18b.
16. Calcular la energía disipada $E_{disipada}$, mediante la ecuación 3.19.
17. Determinar la velocidad inicial al instante de la colisión, para el vehículo A y B, mediante las ecuaciones 3.24a y 3.24b respectivamente.

3.2.2. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD A PARTIR DE HUELLAS DE NEUMATICOS.

Este cálculo tiene como criterio base una relación entre la velocidad inicial del vehículo y la energía consumida en el deslizamiento. La clave en este cálculo es identificar según la marca del neumático a qué tipo de fenómeno nos encontramos, por ejemplo, una marca de frenada en comparación con una de derrape en avance tendrá distintos valores de velocidad consumida en el deslizamiento.

Se debe tener presente que las marcas de los neumáticos en la calzada indican una parte de la distancia que el vehículo se ha deslizado, esto debido a que existe un intervalo de tiempo desde que el conductor acciona el pedal del freno hasta que el neumático empieza a dejar marca. Por tanto la velocidad obtenida será menor a la real del vehículo. Además se debe tener en cuenta que existe una variedad de condiciones que afectan este cálculo como un bloqueo total o parcial de los neumáticos, un bloqueo en intervalos de los neumáticos, etc.

3.2.2.1. TIPOS DE MARCAS DE NEUMATICOS EN LA CALZADA.

Entre las más comunes tenemos:

Marcas de frenado: se caracterizan por ser uniformes en grosor y color, además poseen estrías longitudinales en la misma dirección de la huella. Su ancho es igual al del neumático.



Fotografía 3.14 Marcas de frenada.

Marcas de aceleración: iguales a las anteriores salvo que estas terminan con un tono de color más difuminado. Se caracterizan por ser de corta longitud.



Fotografía 3.15 Marcas de aceleración.

Marcas de derrape: las estrías de esta marca no siguen el sentido longitudinal del neumático y su tono es más oscuro en la parte exterior. Por lo general se presentan en circulación en curva y su grosor puede ser mayor, menor o igual al grosor del neumático.



Fotografía 3.16 Marcas de derrape.

Se debe tener presente que la marca del neumático se puede transformar de un tipo a otro en su avance, por ejemplo podemos hallar una marca de frenado que en su recorrido da inicio a una de derrape.



Fotografía 3.17 Marcas combinadas frenada-derrape.

3.2.2.2. CALCULO DE LA VELOCIDAD A PARTIR DE MARCAS DE NEUMATICOS.

Una vez identificado el tipo de marca del neumático sobre la calzada podemos realizar el respectivo cálculo para obtener una estimación de la velocidad inicial. Para este cálculo existe gran cantidad de ecuaciones que ofrecen estimar la velocidad inicial a partir de las marcas en la calzada, para este apartado adoptaremos las más generales que posean menor porcentaje de error.

Para el autor Raymond M. Branch, en caso de tener una marca de derrape se puede obtener el valor límite de la velocidad para que produzca una marca en la calzada mediante la ecuación:

$$v_{limite} = \sqrt{\mu \cdot g \cdot R}$$

Ec. 3.26

Donde:

R : Radio de la circunferencia circunscrita.

Según el autor Stannard Baker, se puede estimar la velocidad inicial del vehículo mediante las marcas en la calzada en una situación de frenado en línea recta y con las cuatro ruedas bloqueadas, mediante la ecuación:

$$v = 15.9 \cdot \sqrt{d \cdot (\mu \pm f)}$$

Ec. 3.27

Donde:

d : Longitud de la marca más larga en la calzada.

f : Pendiente en tanto por uno.

3.3. RECONSTRUCCION DE LA EVOLUCION ESPACIO-TIEMPO DEL ACCIDENTE.

Una vez realizado el levantamiento de la escena del siniestro y analizada la evidencia junto con los testimonios se procederá por elaborar un esquema grafico el cual indicara de manera comprensiva nuestra hipótesis de la sucesión de los hechos. En

este punto se incluirán los datos definidos en el capítulo II y III como velocidades iniciales, trayectorias, aceleraciones y todo valor que hayamos podido deducir a partir del análisis de la evidencia. Resulta práctico elaborar un modelo de esquema en dos dimensiones con una vista superior para fines ilustrativos. Véase Anexo B.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Existe una estrecha relación entre la velocidad inicial y la deformación residual de un vehículo luego de un accidente, mediante esta relación se puede determinar la velocidad inicial al momento de la colisión, sustentando de manera técnica dicho resultado.
- Si bien la tasa de accidentes se ha reducido por la aplicación de las leyes vigentes, todavía existe una gran cantidad de siniestros que se dan por el exceso de velocidad.
- El presente estudio pretende complementar y ayudar a validar resultados ya que ningún estudio de reconstrucción de accidentes de tránsito es 100% exacto, lo que debemos tratar siempre al momento de realizar la reconstrucción de los hechos es minimizar el margen de error. Por lo general un error aceptado tiene un $\pm 10\%$ de margen.
- Este estudio no es aplicable para colisiones múltiples (tres o más vehículos) o para colisiones contra peatones o animales debido a que los coeficientes de rigidez A y B son calculados por colisiones controladas entre un vehículo contra una barrera fija o entre dos vehículos.
- Un punto crítico será conocer los valores de los coeficientes de rigidez A y B así como del coeficiente de restitución C_R . Para cada vehículo será un valor diferente y en varios casos por más que los vehículos sean similares sus coeficientes tendrán una gran diferencia y es este valor el que más influencia tiene sobre el resultado final.
- Una de las aplicaciones de este estudio es en el área de las compañías aseguradoras en donde existen vehículos que en la póliza no poseen cobertura de amparo patrimonial, esta clausula indica que “cubre los daños que sufra el vehículo asegurado cuando el chofer desatienda cualquier señal o norma de tránsito, siempre y cuando el autorizado se encuentre legalmente apto para conducir vehículos de la clase y condiciones estipuladas en la presente póliza, inclusive si se encuentra bajo la influencia de bebidas alcohólicas, estupefacientes o sustancias psicotrópicas, salvo si media dolo o culpa grave del solicitante o del asegurado indicado en la presente póliza”. Por lo tanto este estudio podría ayudar a aceptar o negar reclamos con esta característica.

BIBLIOGRAFIA

A.N.T. (Diciembre de 2012). *Agencia Nacional de Tránsito*. Recuperado el 7 de Enero de 2013, de Agencia Nacional de Tránsito: <http://www.ant.gob.ec/index.php/descargables/category/80-accidentes>

Aparicio, F., Vera, C., & Diaz, V. (2001). *Teoría de los vehículos automóviles*. Madrid: Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales UPM.

Asamblea Nacional Constituyente. (25 de 07 de 2012). *lexis*. Recuperado el 22 de 09 de 2012, de lexis: <http://www.lexis.com.ec>

Branch, R., & Branch, M. (2011). *Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods*. Pennsylvania: SAE International.

Diario Extra. (31 de 07 de 2012). *Diario Extra*. Recuperado el 24 de 09 de 2012, de Diario Extra: <http://m.extra.ec/ediciones/2012/08/01/cronica/exceso-de-velocidad-destrozo-a-tres-familias/>

Elvih, H., & Vaa, S. (2009). *Handbook of Road Safety Measures*. Reino Unido: Emerald Group.

Garcia, A. (05 de 2005). *Peritos en Argentina*. Recuperado el 08 de 12 de 2012, de Peritos en Argentina: <http://www.perarg.com.ar/docs/asist-per/herramientas/ESTIMACION-DE-ENERGIA-POR-DEFORMACION.pdf>

Gouvea, V., & Tamayo, A. (2005). *Instituto Militar de Engenharia*. Recuperado el 28 de 09 de 2012, de [http://aquarius.ime.br/~webde2/prof/vania/pubs/\(1\).pdf](http://aquarius.ime.br/~webde2/prof/vania/pubs/(1).pdf)

Hibbeler, R. (2004). *Mecánica Vectorial para Ingenieros: Dinámica*. México: PEARSON.

Hibbeler, R. (2004). *Mecánica Vectorial para Ingenieros: Estática*. Mexico: Pearson.

Lisper, H., & Laurell, H. (1973). *Effects of Experience of the Driver on Heart-rate Respiration-rate, and Subsidiary Reaction Time in a Three Hours Continuous Driving Task*. Uppsala: Department of Psychology.

Luque, P., & Mantaras, D. (2007). *Investigación de Accidentes de Tráfico*. La Coruña: Netbiblo.

Mezquita, J., & Dols, J. (2006). *Tratado Sobre Automoviles: La Dinámica del Automovil*. Valencia: UPV.

Ministerio de Obras Publicas. (02 de 02 de 2000). *Gobierno de España*. Recuperado el 17 de 10 de 2012, de Gobierno de España: <http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/7CDCD3E7-850A-4A9C-813D-B87FAEDE1A7A/55858/0510100.pdf>

Municipio de Cuenca. (25 de 10 de 2012). *Maneja Consciente*. Cuenca, Azuay, Ecuador.

Orovio, M. (2010). *Tecnología del Automovil*. Madrid : Paraninfo.

Prieto, J. (16 de 11 de 1984). *Papeles del Psicologo*. Recuperado el 15 de 10 de 2012, de Papeles del Psicologo: <http://www.papelesdelpsicologo.es/vernumero.asp?id=179>

R.A.E. (2012). *Real Academia Española*. Recuperado el 30 de 09 de 2012, de <http://buscon.rae.es/drae/srv/search?val=rasante>

Tinguall, & Haworth. (1999). *European Commission*. Recuperado el 24 de 09 de 2012, de European Commission: http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/speed/speed_limits/traffic_conditions.htm

Universidad de Tolima. (s.f.). *Universidad de Tolima*. Recuperado el 18 de 10 de 2012, de Universidad de Tolima: http://trabajossuelos.galeon.com/index_archivos/page0001.htm

ANEXOS

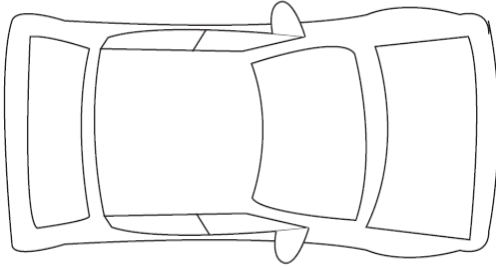
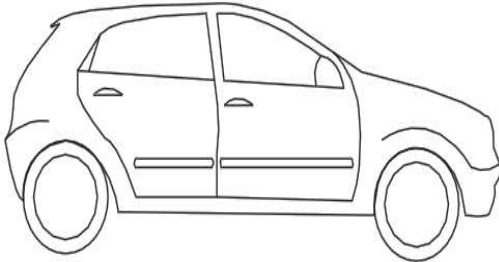
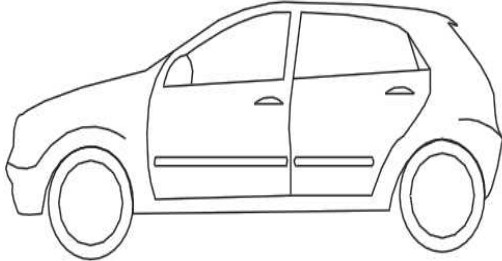
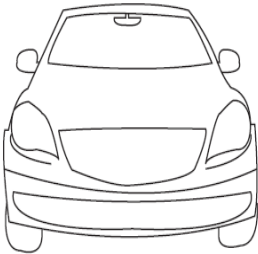

ANEXO A

MODELOS PARA LA INSPECCION

HOJA 1.1 MODELO PARA INSPECCION DE VEHICULOS LIVIANOS.

MODELO PARA INSPECCION DE VEHICULOS LIVIANOS										
DIA	MES	AÑO	HORA	PROVINCIA	CIUDAD	DIRECCION DEL LUGAR DE INSPECCION				
DATOS GENERALES										
SOLICITANTE DE LA INSPECCION						TELEFONOS				
PROPIETARIO DEL VEHICULO						C.C/ RUC				
DIRECCION						TELEFONOS				
DATOS DEL VEHICULO										
PLACA		MARCA		CLASE		MODELO		AÑO	Nº PAS	COLOR
TIPO DE SERVICIO		PARTIC. <input type="checkbox"/>	PUBLICO <input type="checkbox"/>	ESPECIAL <input type="checkbox"/>	DIPLOM. <input type="checkbox"/>	TEMPORAL <input type="checkbox"/>		ESTATAL <input type="checkbox"/>		
TIPO DE COMBUSTIBLE		GASOLINA <input type="checkbox"/>	DIESEL <input type="checkbox"/>	GLP <input type="checkbox"/>	HIBRIDO <input type="checkbox"/>	DISP. RASTREO SATELITAL SI() NO()				
ESTADO GENERAL DEL VEHICULO										
ELEMENTO	ESTADO			OBSERVACIONES	VIDRIO	BUENO	MALO	MARCA	REFERENCIA	% VIDA UTIL
	BUENO	REGULAR	MALO							
CARROCERIA GENERAL										
CAPOT										
MASCARILLA										
GUARDAFANGO DEL. RH										
GUARDAFANGO DEL. LH										
GUARDACHOQUE DELT.										
GUARDACHOQUE POST.										
FARO DEL. RH										
FARO DEL. LH										
FARO POST. RH										
FARO POST. LH										
PUERTA DEL. RH										
PUERTA DEL. LH										
PUERTA POST. RH										
PUERTA POST. LH										
PUERTA DEL BAUL										
PARABRISAS DEL.										
PARABRISAS POST.										
ESPEJO RH										
ESPEJO LH										
NEUMATICO DEL. RH										
NEUMATICO DEL. LH										
NEUMATICO POST. RH										
NEUMATICO POST. LH										
AIRBAG CONDUCTOR										
AIRBAG COPILOTO										
AIRBAG LATERALES										
OTROS										
MOTOR, CAJA Y TRANSMISION										
FUGAS DE ACEITE SI() NO()				UBICACION						
FUGAS DE AGUA SI() NO()				UBICACION						

HOJA 1.2 MODELO PARA INSPECCION DE VEHICULOS LIVIANOS.

DESCRIPCION GRAFICA DEL VEHICULO SINISTRADO	
VISTA SUPERIOR	
VISTA LATERAL RH	
VISTA LATERAL LH	
VISTA FRONTAL	VISTA POSTERIOR
	
OBSERVACIONES Y COMENTARIOS	CONSTANCIA DE LA INSPECCION

	RESPONSABLE DEL VEHICULO INSPECTOR

HOJA 2 MODELO PARA INSPECCION DE LA ESCENA DEL SINIESTRO.

MODELO PARA INSPECCION DE LA ESCENA DEL SINIESTRO						
DIA	MES	AÑO	HORA	PROVINCIA	CIUDAD	DIRECCION DEL LUGAR DE INSPECCION
SOLICITANTE DE LA INSPECCION					TELEFONOS	
DATOS GENERALES DEL SINIESTRO						
DIA	MES	AÑO	HORA	TIPO DE SINIESTRO		
DOCUMENTOS SOPORTE	PARTE POL. <input type="checkbox"/>	DENUNCIA <input type="checkbox"/>	DECLARACIONES <input type="checkbox"/>	FOTOGRAFIAS <input type="checkbox"/>	REPORTAJES <input type="checkbox"/>	OTROS <input type="checkbox"/>
TIPO DE VIA	MATERIAL DE LA CALZADA		ESTADO DEL MATERIAL DE LA CALZADA NUEVO () VIAJADO ()			
			SEÑALIZACION DE LA VIA OPTIMA () MINIMA () INEXISTENTE ()			
LLUVIA SI () NO ()	INTENSIDAD BAJA () MEDIA () ALTA ()		NEBLINA SI () NO () INTENSIDAD BAJA () MEDIA () ALTA ()			
EVIDENCIA DE LA ESCENA						
ELEMENTO	SI	NO	OBSERVACIONES			
RESTOS DE ACEITE Y/O REFRIGERANTE						
RESIDUOS DE PARTES DEL VEHICULO						
MARCAS IMPACTO EN LA CALZADA						
MARCAS IMPACTO EN OBJETOS FIJOS				TIPO DE OBJETO		
MARCAS DE NEUMATICOS				TIPO DE MARCA		
OTROS						
DESCRIPCION GRAFICA DE LA ESCENA DEL SINIESTRO						
OBSERVACIONES Y COMENTARIOS				CONSTANCIA DE LA INSPECCION		

				REMITENTE	INSPECTOR	

ANEXO B

EJEMPLOS PRACTICOS DE LA RECONSTRUCCION DE SINIESTROS

EJEMPLO 1: COLISION FRONTAL CENTRADA.

En un escenario en el que poseemos únicamente los vehículos siniestrados como evidencia, determinar la posible velocidad inicial de ambos cuerpos implicados, sabiendo que la parte afectada en ambos vehículos es todo el ancho de su parte frontal y teniendo de partida los siguientes datos:

VHA	FORD BRONCO			AÑO 1989			VHB	CHEVROLET BLAZER			AÑO 1990			
DISTANCIA TOTAL 4,03 m			DIST. ENTRE EJES 2,4 m			DISTANCIA TOTAL 4,5 m			DIST. ENTRE EJES 2,72 m					
ANCHO 1,73 m		ALTO 1,917 m		MASA: 1450 kg		ANCHO 1,67 m		ALTO 1,63 m		MASA: 1530 kg				
CR 0,036	A 63863,82 N/m			B 725568,1 N/m			CR 0,109	A 73631,91 N/m			B 806922,18 N/m			
C1(m)	C2 (m)	C3 (m)	C4 (m)	C5 (m)	C6 (m)	C1 (m)	C2 (m)	C3 (m)	C4 (m)	C5 (m)	C6 (m)			
0,284	0,306	0,311	0,311	0,323	0,297	0,253	0,233	0,233	0,233	0,243	0,257			

Los valores de dimensiones, masas, coeficientes de restitución y coeficientes de rigidez fueron tomados de tablas. Véase Anexo C.

SOLUCION.

Empezaremos por calcular un coeficiente de restitución equivalente para ambos vehículos. Analizando las profundidades de las deformaciones C, podemos identificar una deformación similar para ambos vehículos por lo que usaremos la ecuación 3.12.

$$C_m = \sqrt{\frac{C_{R_B}^2 \cdot m_A + C_{R_A}^2 \cdot m_B}{m_A + m_B}}$$

$$C_m = \sqrt{\frac{0.109^2 \cdot 1450kg + 0.036^2 \cdot 1530kg}{1450kg + 1530kg}} = \mathbf{0.08}$$

A continuación calcularemos el centroide de colisión (x, y) de cada vehículo con su respectiva área mediante las ecuaciones 3.18 a y 3.18b. En el caso de que la sección a analizar no asemeje a un rectángulo se la tratara como un trapecio, utilizando las formulas características de esta figura.

Trapecio:

$$A_i = \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \cdot L_i \qquad x_i = \frac{C_i + C_{i+1}}{4}$$

Como se indico en el Capítulo III, L_i , será la longitud de la parte afectada para el numero de secciones a analizar. En este estudio para obtener valores más certeros hemos planteado 5 secciones a analizar de manera estándar. Por lo que:

$$L_{iA} = \frac{1.73 \text{ m}}{5} = 0.346 \text{ m} \quad y \quad L_{iB} = \frac{1.67 \text{ m}}{5} = 0.334 \text{ m}$$

De esta manera para el vehículo A tenemos:

$$A_1 = \frac{0.284 + 0.306}{2} \cdot 0.346 = 0.102 \text{ m}^2 \quad x_1 = \frac{0.284 + 0.306}{4}$$

$$= 0.148 \text{ m}$$

$$A_2 = \frac{0.306 + 0.311}{2} \cdot 0.346 = 0.107 \text{ m}^2 \quad x_2 = \frac{0.306 + 0.311}{4}$$

$$= 0.154 \text{ m}$$

$$A_3 = 0.311 \cdot 0.346 = 0.108 \text{ m}^2 \quad x_3 = \frac{0.311}{2} = 0.156 \text{ m}$$

$$A_4 = \frac{0.311 + 0.323}{2} \cdot 0.346 = 0.11 \text{ m}^2 \quad x_4 = \frac{0.311 + 0.323}{4} = 0.159 \text{ m}$$

$$A_5 = \frac{0.323 + 0.297}{2} \cdot 0.346 = 0.107 \text{ m}^2 \quad x_5 = \frac{0.323 + 0.297}{4}$$

$$= 0.155 \text{ m}$$

De igual manera para el vehículo B tenemos:

$$A_1 = \frac{0.253 + 0.233}{2} \cdot 0.334 = 0.081 \text{ m}^2 \quad x_1 = \frac{0.253 + 0.233}{4}$$

$$= 0.122 \text{ m}$$

$$A_2 = 0.233 \cdot 0.334 = 0.078 \text{ m}^2 \quad x_2 = \frac{0.233}{2} = 0.117 \text{ m}$$

$$A_3 = 0.233 \cdot 0.334 = 0.078 \text{ m}^2 \quad x_3 = \frac{0.233}{2} = 0.117 \text{ m}$$

$$A_4 = \frac{0.233 + 0.243}{2} \cdot 0.334 = 0.079 \text{ m}^2 \quad x_4 = \frac{0.233 + 0.243}{4}$$

$$= 0.119 \text{ m}$$

$$A_5 = \frac{0.243 + 0.257}{2} \cdot 0.334 = 0.084 \text{ m}^2 \quad x_5 = \frac{0.243 + 0.257}{4}$$

$$= 0.125 \text{ m}$$

Empleando las ecuaciones 3.18a y 3.18b para ambos vehículos, tenemos:

VHA

$$x_c = \frac{0.102 \cdot 0.148 + 0.107 \cdot 0.154 + 0.108 \cdot 0.156 + 0.11 \cdot 0.159 + 0.107 \cdot 0.155}{0.102 + 0.107 + 0.108 + 0.11 + 0.107}$$

$$y_c = \frac{0.102 \cdot 0.173 + 0.107 \cdot 0.519 + 0.108 \cdot 0.865 + 0.11 \cdot 1.211 + 0.107 \cdot 1.557}{0.102 + 0.107 + 0.108 + 0.11 + 0.107}$$

Centroide de colisión vehículo A (**0.155; 0.873**) m

VHB

$$x_c = \frac{0.081 \cdot 0.122 + 0.078 \cdot 0.117 + 0.078 \cdot 0.117 + 0.079 \cdot 0.119 + 0.084 \cdot 0.125}{0.081 + 0.078 + 0.078 + 0.079 + 0.084}$$

$$y_c = \frac{0.081 \cdot 0.167 + 0.078 \cdot 1.004 + 0.078 \cdot 1.338 + 0.079 \cdot 1.672 + 0.084 \cdot 2.006}{0.081 + 0.078 + 0.078 + 0.079 + 0.084}$$

Centroide de colisión vehículo B (**0.12; 1.241**) m

A continuación calcularemos la energía de la deformación plástica para cada vehículo mediante la ecuación 3.15, teniendo:

VHA

$$E_{\text{def_plastica_A}} = \frac{1.73}{5} \cdot \left[\frac{63863.82}{2} \cdot (0.284 + 2 \cdot 0.306 + 2 \cdot 0.311 + 2 \cdot 0.311 + 2 \cdot 0.323 + 0.297) + \frac{725568.1}{6} \cdot (0.284^2 + 2 \cdot 0.306^2 + 2 \cdot 0.311^2 + 2 \cdot 0.311^2 + 2 \cdot 0.323^2 + 0.297^2 + 0.284 \cdot 0.306 + 0.306 \cdot 0.311 + 0.311 \cdot 0.311 + 0.311 \cdot 0.323 + 0.323 \cdot 0.297) + \frac{5 \cdot 63863.82^2}{2 \cdot 725568.1} \right] = \mathbf{98684.83 Nm}$$

VHB

$$E_{\text{def_plastica_B}} = \frac{1.67}{5} \cdot \left[\frac{73631.91}{2} \cdot (0.253 + 2 \cdot 0.233 + 2 \cdot 0.233 + 2 \cdot 0.233 + 2 \cdot 0.243 + 0.257) + \frac{806922.18}{6} \cdot (0.253^2 + 2 \cdot 0.233^2 + 2 \cdot 0.233^2 + 2 \cdot 0.233^2 + 2 \cdot 0.243^2 + 0.257^2 + 0.253 \cdot 0.233 + 0.233 \cdot 0.233 + 0.233 \cdot 0.233 + 0.233 \cdot 0.243 + 0.243 \cdot 0.257) + \frac{5 \cdot 73631.91^2}{2 \cdot 806922.18} \right] = \mathbf{73588.41 Nm}$$

Al ser una colisión centrada se deduce de la ecuación 3.17, que:

$$h = 0 \quad \gamma = 1$$

Reemplazando los valores obtenidos en las ecuaciones 3.24a y 3.24b tenemos para cada vehículo que:

VHA

$$v_{inicial_A} = (1 + C_m) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{def_plastica_A} \cdot \gamma_A}{m_A}}$$

$$v_{inicial_A} = (1 + 0.08) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 98684.83Nm \cdot 1}{1450kg}} = 12.6 \frac{m}{s}$$

VHB

$$v_{inicial_B} = (1 + C_m) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{def_plastica_B} \cdot \gamma_B}{m_B}}$$

$$v_{inicial_B} = (1 + 0.08) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 73588.41Nm \cdot 1}{1530kg}} = 10.6 \frac{m}{s}$$

RESULTADO FINAL

$$v_{inicial_A} = 45.36km/h \quad v_{inicial_B} = 38.13km/h$$

EJEMPLO 2: COLISION LATERAL DESCENTRADA.

En un accidente de tránsito, el conductor del vehículo B expresa que el vehículo A circulaba a exceso de velocidad (alrededor de 90 km/h), razón por la cual sucedió el accidente ya que él, antes de realizar la maniobra de incorporación a la vía considero al vehículo A, a una distancia lejana. Sin contar con su exceso de velocidad se incorporo a la vía produciéndose el accidente. Por otro lado el conductor del vehículo A indica que él circulaba por debajo del límite de velocidad (60km/h para dicha vía), y reitera que el conductor del vehículo B no se percato de su presencia e ingreso imprudentemente a la vía.

El párrafo anterior corresponde a un resumen de la declaración verbal de una colisión lateral. En base a las deformaciones residuales en ambos vehículos y analizando la evidencia obtenida, reconstruir los hechos y determinar que conductor tiene la razón.

Para este caso tenemos una escena dividida en la que por un lado tendremos la escena del accidente y por otro los vehículos siniestrados.

FOTOGRAFIAS DE LA ESCENA DEL ACCIDENTE



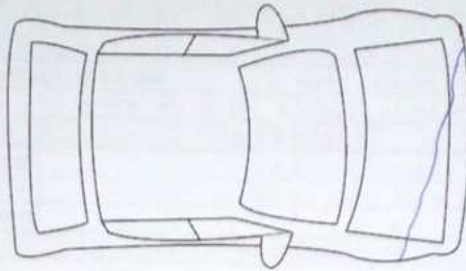
HOJAS DE INSPECCION

VEHÍCULO A

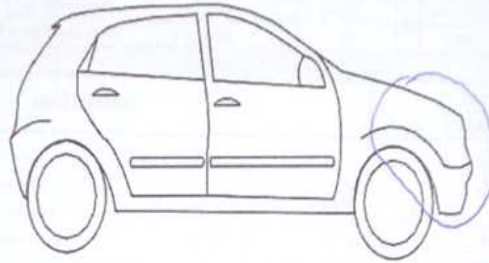
MODELO PARA INSPECCION DE VEHICULOS LIVIANOS							
DIA	MES	AÑO	HORA	PROVINCIA	CIUDAD	DIRECCION DEL LUGAR DE INSPECCION	
13	12	2012	11:00	AZUAY	CUENCA	AV. 10 DE AGOSTO 347	
DATOS GENERALES							
SOLICITANTE DE LA INSPECCION			XXX-XXX-XXX-XXX			TELEFONOS	XXX/XXX
PROPIETARIO DEL VEHICULO			XXX XXX XXX XXX			C.C/ RUC	XXXXXXXX
DIRECCION			XXXX XX			TELEFONOS	XXXXX
DATOS DEL VEHICULO							
PLACA	MARCA	CLASE	MODELO	AÑO	Nº PAS.	COLOR	
XXX-XXX	CHEVROLET	SEDAN	AVERO F	2005	5	BLANCO	
TIPO DE SERVICIO	PARTIC <input checked="" type="checkbox"/>	PUBLICO <input type="checkbox"/>	ESPECIAL <input type="checkbox"/>	DIPLOM. <input type="checkbox"/>	TEMPORAL <input type="checkbox"/>	ESTATAL <input type="checkbox"/>	
TIPO DE COMBUSTIBLE	GASOLINA <input checked="" type="checkbox"/>	DIESEL <input type="checkbox"/>	GLP <input type="checkbox"/>	HIBRIDO <input type="checkbox"/>	DISP. RASTREO SATELITAL SI () NO(X)		
ESTADO GENERAL DEL VEHICULO							
ELEMENTO	ESTADO			OBSERVACIONES	VIDRIO	BUENO	MALO
	BUENO	REGULAR	MALO				
CARROCERIA GENERAL		X					
CAPOT		X		DEFORMADO			
MASCARILLA			X	ROTA			
GUARDAFANGO DEL. RH		X		DEFORMADO			
GUARDAFANGO DEL. LH	X						
GUARDACHOQUE DEL. T.			X	ROTO			
GUARDACHOQUE POST.	X						
FARO DEL. RH			X	ROTO			
FARO DEL. LH			X	BASES ROTAS			
FARO POST. RH	X						
FARO POST. LH	X						
PUERTA DEL. RH	X					X	
PUERTA DEL. LH	X					X	
PUERTA POST. RH	X					X	
PUERTA POST. LH	X					X	
PUERTA DEL. BAUL	X						
PARABRISAS DEL.	X						
PARABRISAS POST.	X						
ESPEJO RH	X						
ESPEJO LH	X						
NEUMATICO DEL. RH	X			GOODYEAR	REFERENCIA	155/80 R13	80
NEUMATICO DEL. LH	X			GOODYEAR		155/80 R13	80
NEUMATICO POST. RH	X			GOODYEAR		155/80 R13	80
NEUMATICO POST. LH	X			GOODYEAR		155/80 R13	80
AIRBAG CONDUCTOR	X						
AIRBAG COPILOTO	X						
AIRBAG LATERALES							
OTROS							
MOTOR, CAJA Y TRANSMISION							
FUGAS DE ACEITE SI () NO(X)			UBICACION				
FUGAS DE AGUA SI(X) NO ()			UBICACION RADIADOR				

DESCRIPCION GRAFICA DEL VEHICULO SINISTRADO

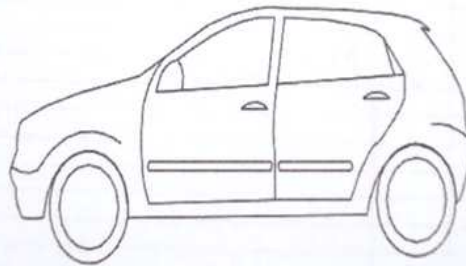
VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL RH



VISTA LATERAL LH



VISTA FRONTAL



VISTA POSTERIOR



OBSERVACIONES Y COMENTARIOS

CONSTANCIA DE LA INSPECCION

AL MOMENTO DE LA INSPECCION EL
CAPOT SE ENCONTRABA DESMONTADO
DEL VEHICULO

XXXXX

XXXXX

RESPONSABLE DEL VEHICULO

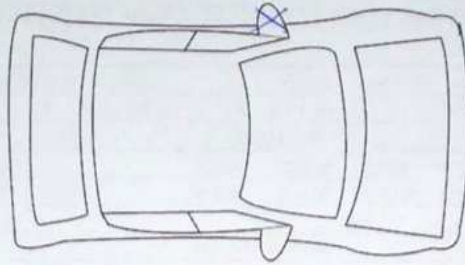
INSPECTOR

VEHÍCULO B

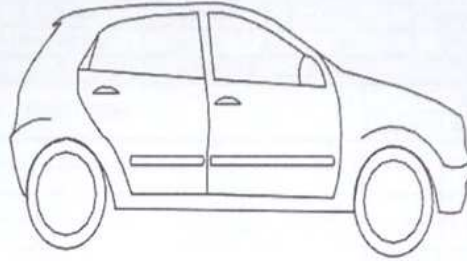
MODELO PARA INSPECCION DE VEHICULOS LIVIANOS							
DIA	MES	AÑO	HORA	PROVINCIA	CIUDAD	DIRECCION DEL LUGAR DE INSPECCION	
14	12	2012	17:30	AZUAY	CUINCA	AV GONZALES SUAREZ 4-87	
DATOS GENERALES							
SOLICITANTE DE LA INSPECCION				XXX XXX XXX XXX		TELEFONOS	XXX
PROPIETARIO DEL VEHICULO				XXX XXX XXX XXX		CC/RUC	XXXX
DIRECCION				XXXX XXX		TELEFONOS	XXX
DATOS DEL VEHICULO							
PLACA	MARCA	CLASE	MODELO	AÑO	Nº PAS.	COLOR	
XXX-XXX	TOYOTA	SEDAN	YARIS	2007	5	VINDO	
TIPO DE SERVICIO	PARTIC. <input checked="" type="checkbox"/>	PUBLICO <input type="checkbox"/>	ESPECIAL <input type="checkbox"/>	DIPLOM <input type="checkbox"/>	TEMPORAL <input type="checkbox"/>	ESTATAL <input type="checkbox"/>	
TIPO DE COMBUSTIBLE	GASOLINA <input checked="" type="checkbox"/>	DIESEL <input type="checkbox"/>	GLP <input type="checkbox"/>	HIBRIDO <input type="checkbox"/>	DISP. RASTRO SATELITAL SI () NO (X)		
ESTADO GENERAL DEL VEHICULO							
ELEMENTO	ESTADO			OBSERVACIONES	VIDRIO	BUENO	MALO
	BUENO	REGULAR	MALO				
CARROCERIA GENERAL		X					
CAPOT	X						
MASCARILLA	X						
GUARDAFANGO DEL. RH	X						
GUARDAFANGO DEL. LH			X	DEFORMADO			
GUARDACHOQUE DELT.	X						
GUARDACHOQUE POST.	X						
FARO DEL. RH	X						
FARO DEL. LH	X						
FARO POST. RH	X						
FARO POST. LH	X						
PUERTA DEL. RH	X						
PUERTA DEL. LH			X	DEFORMADA		X	
PUERTA POST. RH	X					X	
PUERTA POST. LH			X	DEFORMADA		X	
PUERTA DEL BAUL	X						
PARABRISAS DEL.	X						
PARABRISAS POST.	X						
ESPEJO RH	X						
ESPEJO LH			X	ROTO			
NEUMATICO DEL. RH	X			MICHELIN	REFERENCIA	155/80R13	Nº VIDA UTIL 50
NEUMATICO DEL. LH	X			MICHELIN	REFERENCIA	155/80R13	Nº VIDA UTIL 50
NEUMATICO POST. RH	X			MICHELIN	REFERENCIA	155/80R13	Nº VIDA UTIL 50
NEUMATICO POST. LH	X			MICHELIN	REFERENCIA	155/80R13	Nº VIDA UTIL 50
AIRBAG CONDUCTOR	X						
AIRBAG COPILOTO	X						
AIRBAG LATERALES							
OTROS							
MOTOR, CAJA Y TRANSMISION							
FUGAS DE ACEITE SI () NO (X)				UBICACION			
FUGAS DE AGUA SI () NO (X)				UBICACION			

DESCRIPCION GRAFICA DEL VEHICULO SINISTRADO

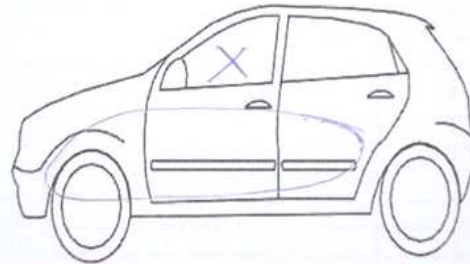
VISTA SUPERIOR



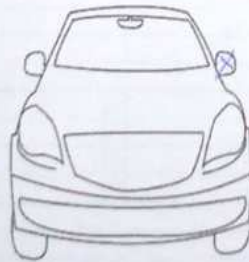
VISTA LATERAL RH



VISTA LATERAL LH



VISTA FRONTAL



VISTA POSTERIOR



OBSERVACIONES Y COMENTARIOS

CONSTANCIA DE LA INSPECCION

RESPONSABLE DEL VEHICULO INSPECTOR

ESCENA DEL ACCIDENTE

MODELO PARA INSPECCION DE LA ESCENA DEL SINIESTRO						
DIA	MES	AÑO	HORA	PROVINCIA	CIUDAD	DIRECCION DEL LUGAR DE INSPECCION
20	12	2012	12:30	AZUAY	GUENCA	VIA OLHOA LEON KM 5
SOLICITANTE DE LA INSPECCION					TELEFONOS	
xxx xxx xxx xxx					xxx x	
DATOS GENERALES DEL SINIESTRO						
DIA	MES	AÑO	HORA	TIPO DE SINIESTRO		
08	12	2012	15:00	COLISION ENTRE 2 VEHICULOS		
DOCUMENTOS SOPORTE						
PARTE POL.	DENUNCIA	DECLARACIONES	FOTOGRAFIAS	REPORTAJES	OTROS	
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
TIPO DE VIA		MATERIAL DE LA CALZADA		ESTADO DEL MATERIAL DE LA CALZADA		
CARRETERA RURAL		ASFALTO		NUEVO () VIAJADO <input checked="" type="checkbox"/>		
SEÑALIZACION DE LA VIA						
OPTIMA () MINIMA <input checked="" type="checkbox"/> INEXISTENTE ()						
LLUVIA SI () NO <input checked="" type="checkbox"/>			INTENSIDAD BAJA () MEDIA () ALTA ()		NEBLINA SI () NO <input checked="" type="checkbox"/>	
EVIDENCIA DE LA ESCENA						
ELEMENTO	SI	NO	OBSERVACIONES			
RESTOS DE ACEITE Y/O REFRIGERANTE		<input checked="" type="checkbox"/>				
RESIDUOS DE PARTES DEL VEHICULO	<input checked="" type="checkbox"/>		VIDRIOS			
MARCAS IMPACTO EN LA CALZADA		<input checked="" type="checkbox"/>				
MARCAS IMPACTO EN OBJETOS FUJOS		<input checked="" type="checkbox"/>				
MARCAS DE PNEUMATICOS		<input checked="" type="checkbox"/>				
OTROS		<input checked="" type="checkbox"/>				
DESCRIPCION GRAFICA DE LA ESCENA DEL SINIESTRO						
<p>The diagram shows a road layout with a vertical line representing a road edge. A horizontal line represents a 'PORTON' (gate). To the right of the porton, there is a curved line labeled 'INGRESO A DOMICILIO'. A circle with a cross inside is labeled 'RESTOS DE VIDRIOS'. Red arrows indicate directions: two pointing down on the left side, and two pointing up on the right side. A label 'LINEA CONTINUA' points to a vertical line on the right side of the road.</p>						
OBSERVACIONES Y COMENTARIOS				CONSTANCIA DE LA INSPECCION		
LA UNICA SEÑALIZACION EN LA VIA ES LA PINTADA EN LA CALZADA				xxx	xxx	
				REMITENTE	INSPECTOR	

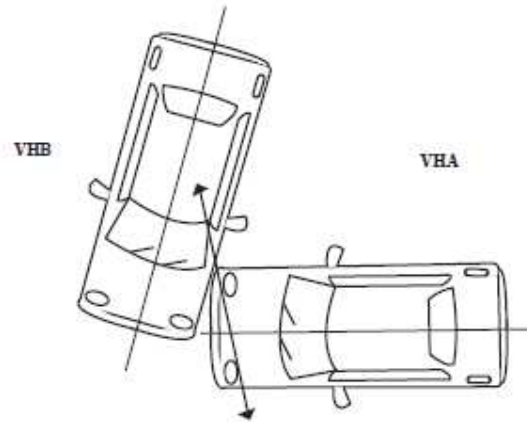
DATOS TECNICOS DE VEHICULOS

VHA			CHEVROLET A VEO SED.			AÑO 2005			VHB			TOYOTA YARIS SEDAN			AÑO 2007								
DISTANCIA TOTAL 4,24 m						DIST. ENTRE EJES 2,49 m						DISTANCIA TOTAL 4,31 m						DIST. ENTRE EJES 2,56 m					
ANCHO 1,68 m			ALTO 1,5 m			MASA: 1118 kg						ANCHO 1,71 m			ALTO 1,47 m			MASA: 1040 kg					
CR 0,106			A 78593 N/m			B 1204523 N/m						CR 0,112			A -12358 N/m			B 79493 N/m					
C1(m)		C2(m)		C3(m)		C4(m)		C5(m)		C6(m)		C1(m)		C2(m)		C3(m)		C4(m)		C5(m)		C6(m)	
0,541		0,516		0,351		0,287		0,135		0,122		0,076		0,401		0,343		0,17		0,084		0,127	

Datos técnicos de vehículos tomados de tablas. Véase Anexo D.

RESOLUCION

De la evidencia obtenida se plantea la siguiente posición vehicular al instante de empezar la colisión.



Al igual que en el ejercicio anterior empezaremos por calcular un coeficiente de restitución equivalente para ambos vehículos.

$$C_m = \sqrt{\frac{C_{R_B}^2 \cdot m_A + C_{R_A}^2 \cdot m_B}{m_A + m_B}}$$

$$C_m = \sqrt{\frac{0.112^2 \cdot 1118kg + 0.106^2 \cdot 1040kg}{1118kg + 1040kg}} = \mathbf{0.109}$$

A continuación calcularemos el centroide de colisión (x, y) de cada vehículo con su respectiva área.

$$L_{iA} = \frac{1.68 m}{5} = 0.336 m \quad y \quad L_{iB} = \frac{1.71 m}{5} = 0.342 m$$

Con lo que para el vehículo A tenemos:

$$A_1 = \frac{0.541 + 0.516}{2} \cdot 0.336 = 0.118 m^2 \quad x_1 = \frac{0.541 + 0.516}{4}$$

$$= 0.264 m$$

$$A_2 = \frac{0.516 + 0.351}{2} \cdot 0.336 = 0.146 \text{ m}^2 \\ = 0.207 \text{ m}$$

$$x_2 = \frac{0.516 + 0.311}{4}$$

$$A_3 = \frac{0.315 + 0.287}{2} \cdot 0.336 = 0.101 \text{ m}^2 \\ = 0.151 \text{ m}$$

$$x_3 = \frac{0.315 + 0.287}{4}$$

$$A_4 = \frac{0.287 + 0.135}{2} \cdot 0.336 = 0.071 \text{ m}^2 \\ = 0.106 \text{ m}$$

$$x_4 = \frac{0.287 + 0.135}{4}$$

$$A_5 = \frac{0.135 + 0.122}{2} \cdot 0.336 = 0.043 \text{ m}^2 \\ = 0.064 \text{ m}$$

$$x_5 = \frac{0.135 + 0.122}{4}$$

De igual manera para el vehículo B tenemos:

$$A_1 = \frac{0.076 + 0.401}{2} \cdot 0.342 = 0.082 \text{ m}^2 \\ = 0.12 \text{ m}$$

$$x_1 = \frac{0.076 + 0.401}{4}$$

$$A_2 = \frac{0.401 + 0.343}{2} \cdot 0.342 = 0.127 \text{ m}^2 \\ = 0.186 \text{ m}$$

$$x_2 = \frac{0.401 + 0.343}{4}$$

$$A_3 = \frac{0.343 + 0.17}{2} \cdot 0.342 = 0.088 \text{ m}^2 \\ = 0.128 \text{ m}$$

$$x_3 = \frac{0.343 + 0.17}{4}$$

$$A_4 = \frac{0.17 + 0.084}{2} \cdot 0.342 = 0.043 \text{ m}^2 \\ = 0.064 \text{ m}$$

$$x_4 = \frac{0.17 + 0.084}{4}$$

$$A_5 = \frac{0.084 + 0.127}{2} \cdot 0.342 = 0.036 \text{ m}^2 \\ = 0.053 \text{ m}$$

$$x_5 = \frac{0.084 + 0.127}{4}$$

Continuando con el procedimiento descrito en el ejemplo 1, tenemos:

VHA

$$x_c = \frac{0.118 \cdot 0.264 + 0.146 \cdot 0.207 + 0.101 \cdot 0.151 + 0.071 \cdot 0.106 + 0.043 \cdot 0.064}{0.118 + 0.146 + 0.101 + 0.071 + 0.043}$$

$$y_c = \frac{0.118 \cdot 0.168 + 0.146 \cdot 0.504 + 0.101 \cdot 0.84 + 0.071 \cdot 1.176 + 0.043 \cdot 1.512}{0.118 + 0.146 + 0.101 + 0.071 + 0.043}$$

Centroide de colisión vehículo A (**0.181; 0.682**) m

VHB

$$x_c = \frac{0.082 \cdot 0.12 + 0.127 \cdot 0.186 + 0.088 \cdot 0.128 + 0.043 \cdot 0.064 + 0.036 \cdot 0.053}{0.082 + 0.127 + 0.088 + 0.043 + 0.036}$$

$$y_c = \frac{0.082 \cdot 0.171 + 0.127 \cdot 0.513 + 0.088 \cdot 0.855 + 0.043 \cdot 1.197 + 0.036 \cdot 1.539}{0.082 + 0.127 + 0.088 + 0.043 + 0.036}$$

Centroide de colisión vehículo B (**0.131; 0.693**) m

Calculando la energía de la deformación plástica para cada vehículo, tenemos:

VHA

$$E_{\text{def_plastica_A}} = \frac{1.68}{5} \cdot \left[\frac{78593}{2} \cdot (0.541 + 2 \cdot 0.516 + 2 \cdot 0.351 + 2 \cdot 0.287 + 2 \cdot 0.135 + 0.122) + \frac{1204523}{6} \cdot (0.541^2 + 2 \cdot 0.516^2 + 2 \cdot 0.351^2 + 2 \cdot 0.287^2 + 2 \cdot 0.135^2 + 0.122^2 + 0.541 \cdot 0.516 + 0.516 \cdot 0.351 + 0.351 \cdot 0.287 + 0.287 \cdot 0.135 + 0.135 \cdot 0.122) + \frac{5 \cdot 78593^2}{2 \cdot 1204523} \right] = 167172.93 \text{ Nm}$$

VHB

$$E_{\text{def_plastica_B}} = \frac{1.71}{5} \cdot \left[\frac{-12358}{2} \cdot (0.076 + 2 \cdot 0.401 + 2 \cdot 0.343 + 2 \cdot 0.17 + 2 \cdot 0.084 + 0.127) + \frac{79493}{6} \cdot (0.076^2 + 2 \cdot 0.401^2 + 2 \cdot 0.343^2 + 2 \cdot 0.17^2 + 2 \cdot 0.084^2 + 0.127^2 + 0.076 \cdot 0.401 + 0.401 \cdot 0.343 + 0.343 \cdot 0.17 + 0.17 \cdot 0.084 + 0.084 \cdot 0.127) + \frac{5 \cdot (-12358)^2}{2 \cdot 79493} \right] = 1086.3 \text{ Nm}$$

Al ser una colisión descentrada no se podrá aplicar directamente el valor de energía de deformación plástica obtenido anteriormente, sino que se deberá aplicar la ecuación 3.16 para calcular la energía de deformación angular.

El ángulo de la dirección de la fuerza principal será determinado a partir de la evidencia que poseamos, además el valor de este ángulo será igual para cada vehículo. De acuerdo al bosquejo inicial podemos definir en este caso que $\varphi = 40^\circ$.

Con lo que tendremos para cada vehículo que:

VHA

$$E_{def_angular_A} = (1 + \tan^2(40)) \cdot 167172.93Nm = \mathbf{284877.42 Nm}$$

VHB

$$E_{def_angular_B} = (1 + \tan^2(40)) \cdot 1086.3Nm = \mathbf{1851.15 Nm}$$

En este caso a diferencia del anterior existirá una distancia h entre la dirección de la fuerza principal y el centro de gravedad por lo que ahora $\gamma \neq 1$, el valor h , se determinara a partir del bosquejo inicial coeficiente de mayoración será distinto a 1, por lo tanto se deberá aplicar la ecuación 3.17 para cada vehículo.

VHA

$$h_A = 0.84 m$$

$$\gamma_A = \frac{(1.611m)^2}{(1.611m)^2 + (0.84m)^2} = 0.786$$

VHB

$$h_B = 0.55 m$$

$$\gamma_B = \frac{(1.638m)^2}{(1.638m)^2 + (0.55m)^2} = 0.899$$

Reemplazando los valores obtenidos en las ecuaciones 3.24a y 3.24b tenemos para cada vehículo que:

VHA

$$v_{inicial_A} = (1 + C_m) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{def_plastica_A} \cdot \gamma_A}{m_A}}$$

$$v_{inicial_A} = (1 + 0.109) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 284877.42Nm \cdot 0.786}{1118kg}} = 22.2 \frac{m}{s}$$

VHB

$$v_{inicial_B} = (1 + C_m) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{def_plastica_B} \cdot \gamma_B}{m_B}}$$

$$v_{inicial_B} = (1 + 0.109) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1851.15Nm \cdot 0.899}{1040kg}} = 1.99 \frac{m}{s}$$

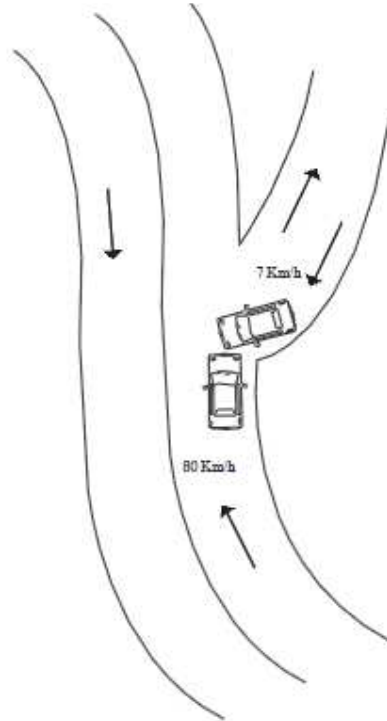
RESULTADO FINAL

$$v_{inicial_A} = \mathbf{79.92 km/h} \quad v_{inicial_B} = \mathbf{7.16 km/h}$$

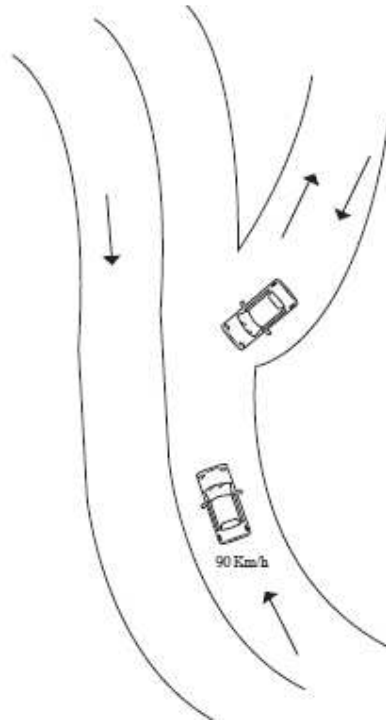
Según los valores obtenidos se concluye que el vehículo A circulaba a exceso de velocidad. Por lo que la declaración del conductor del VHB es la correcta.

RECONSTRUCCION GRAFICA DEL SINIESTRO

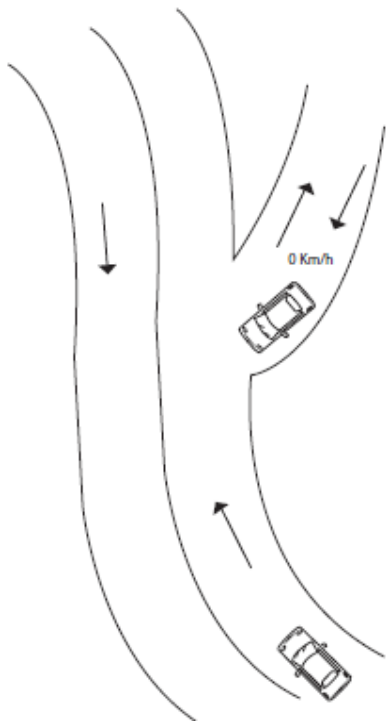
A)



B)



C)



ANEXO C

SOFTWARE PARA CÁLCULO DE VELOCIDAD

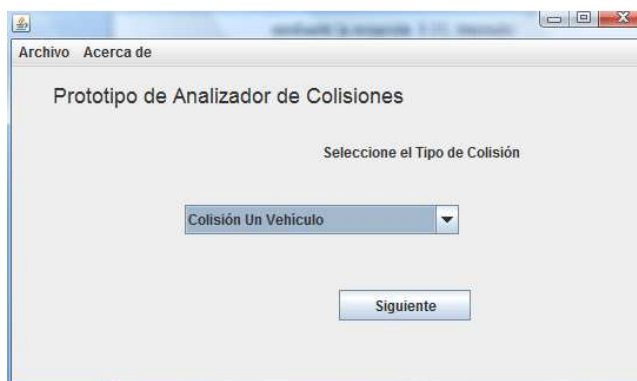
El siguiente software fue desarrollado de la mano con este estudio por lo que utilización será similar a lo visto anteriormente.

Su programación se desarrollo en lenguaje JAVA por lo que es compatible con cualquier sistema operativo que posea instalado este programa.

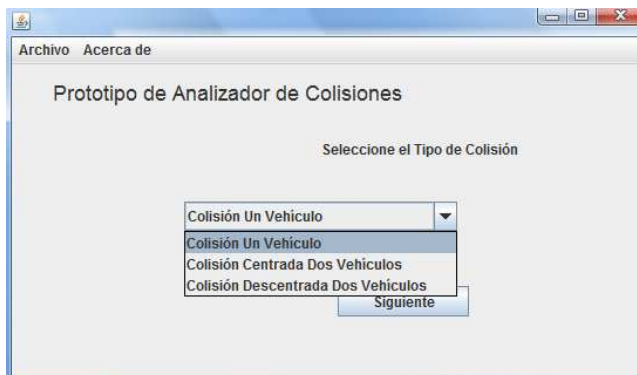
Gracias a las características de este lenguaje de programación se pudo hacer que este programa sea compatible con dispositivos móviles como celulares, tabletas, etc., lo que representa una gran ayuda en la investigación de campo, en la que por lo general únicamente se cuenta con tabletas electrónicas.

UTILIZACION DEL SOFTWARE

Al abrir el archivo ejecutable se nos presentara una ventana de presentación.



En esta ventana tendremos una pestaña en la que nos pide ingresar el tipo de colisión con el que nos encontramos. Como ya se indico anteriormente este estudio es únicamente valido para colisiones entre un vehículo o dos vehículos.



Una vez seleccionado el tipo de colisión con el que nos encontramos y habiendo oprimido el botón siguiete tendremos para cada caso una ventana en especial.

Para el caso de una colisión de un vehículo tendremos:

Colisión Un Vehículo

Ingrese los datos en la tabla

VHa Año

Distancia Total(m) Distancia entre ejes(m)

Ancho(m) Alto(m) Masa(kg)

CR A(N/m) B(N/m)

C1(m) C2(m) C3(m) C4(m) C5(m) C6(m)

Para el caso de una colisión centrada entre dos vehículo tendremos:

Colisión Dos Vehículos Centralizado

Ingrese los datos del Vehículo A en la tabla

VHa Año

Distancia Total(m) Distancia entre ejes(m)

Ancho(m) Alto(m) Masa(kg)

CR A(N/m) B(N/m)

C1(m) C2(m) C3(m) C4(m) C5(m) C6(m)

Ingrese los datos del Vehículo B en la tabla

VHb Año

Distancia Total(m) Distancia entre ejes(m)

Ancho(m) Alto(m) Masa(kg)

CR A(N/m) B(N/m)

C1(m) C2(m) C3(m) C4(m) C5(m) C6(m)

Y para el caso de una colisión descentrada entre dos vehículo tendremos:

Colisión Dos Vehiculos Descentrada

Ingrese los datos del Vehiculo A

VHa Año h

Distancia Total(m) Distancia entre ejes(m)

Ancho(m) Alto(m) Masa(kg) r

CR A(N/m) B(N/m2)

C1(m) C2(m) C3(m) C4(m) C5(m) C6(m)

Ingrese los datos del Vehiculo B

VHb Año h

Distancia Total(m) Distancia entre ejes(m)

Ancho(m) Alto(m) Masa(kg) r

CR A(N/m) B(N/m2)

C1(m) C2(m) C3(m) C4(m) C5(m) C6(m)

Una vez que se ingresen los valores solicitados el programa generara los resultados automáticamente según los datos ingresados.

De manera demostrativa colocaremos valores correspondiente a una colisión entre un vehículo contra un árbol.

1) Colocamos el tipo de colisión.

Archivo Acerca de

Prototipo de Analizador de Colisiones

Seleccione el Tipo de Colisión

2) Llenamos la tabla solicitada.

Colisión Un Vehículo

Ingrese los datos en la tabla

VHa	MAZDA 808	Año	1987		
Distancia Total(m)	3.8	Distancia entre ejes(m)	1.75		
Ancho(m)	1.69	Alto(m)	1.35	Masa(kg)	1120
CR	0.083	A(N/m)	79640	B(N/m)	908678
C1(m)	C2(m)	C3(m)	C4(m)	C5(m)	C6(m)
0.022	0.342	0.512	0.485	0.298	0.134

3) Presionamos calcular y obtenemos los resultados.

Presentación de Resultados

Velocidad Inicial del Vehículo

65.1758k/h

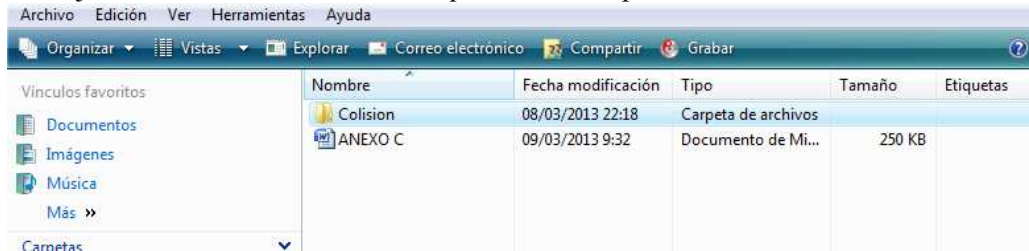
Centroide de Colisión

156494.6021Nm

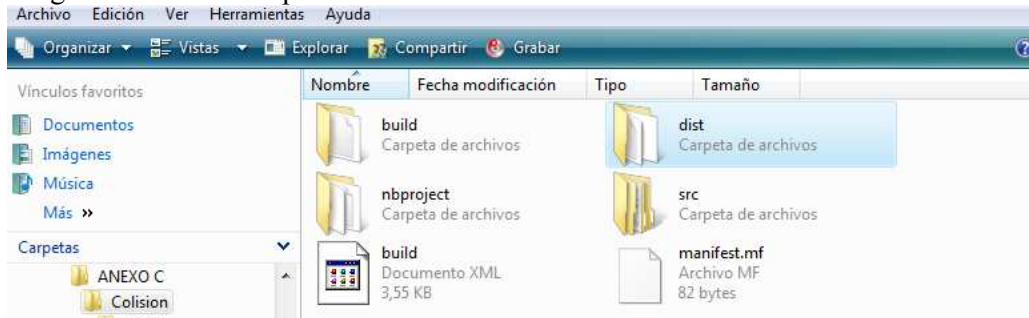
Energía de Deformación Plástica

A(0.1936, 0.1936)m

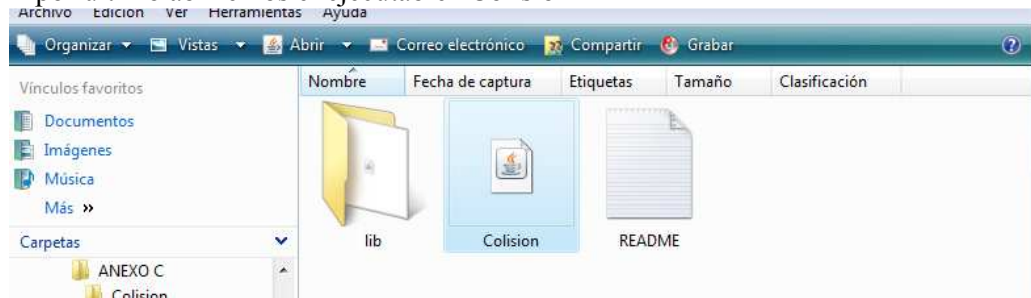
Para ejecutar el software tendremos que abrir la carpeta llamada “Colisión”



Luego abriremos la carpeta llamada “dist”.



Y por ultimo abriremos el ejecutable “Colisión”



ANEXO D

METODOS DE OBTENCION DE COEFICIENTES C_R , A Y B

Para la obtención de estos coeficientes la manera más eficaz de conseguirlos es a través de internet en donde se encuentra cualquier cantidad de tablas.

La pagina <http://www.visualstatement.com> proporciona de manera gratuita los coeficientes de rigidez para un sin número de vehículos.

The screenshot shows the website www.visualstatement.com/es/Resources/StiffnessCoefficient.aspx. The page features a navigation menu with options like 'Inicio', 'Productos', 'Soluciones', 'Soporte Técnico', 'Corporación', and 'Demostración en Vivo'. A prominent banner for 'Announcing EdgeFX' is displayed. Below the banner, there is a section titled 'Stiffness Coefficients' with 'Instructions' and a form for 'Lookup Vehicle'. The form includes dropdown menus for 'Vehicle Start Year', 'Vehicle Make', and 'Vehicle Model', along with a 'Lookup Vehicle' button. A sidebar on the right lists various resources such as 'Friction Tables', 'Sister & Clones List', and 'Stiffness Coefficients'.

Por otro lado la página <http://tecnoautos.com> proporciona de manera completa los datos de fichas técnicas de varios vehículos.

The screenshot shows the website tecnoautos.com/automoviles/fichas-tecnicas/ficha-tecnica-del-chevrolet-blazer-s10-ensamblado-en-1990/. The page features a navigation menu, a search bar, and a technical specification page for a Chevrolet Blazer S10. The page includes a header with the title 'Ficha técnica del carro marca Chevrolet Blazer S10' and a sub-header 'Ficha Técnica del Chevrolet Blazer S-10'. The main content area contains a list of technical specifications for the vehicle, including 'Fabricante: Chevrolet', 'Modelo: Blazer S10', 'Año de fabricación: 1990', 'Categoría: Offroad', 'Motor: 4300 ccm (261.08 pulgadas cúbicas)', 'Tipo de motor: en-línea, 6-cyl', 'Potencia máxima: 160.00 PS (117.41 kW or 157.21 HP) at 4000 Rev. por min.', 'Torque máximo: 312.00 Nm (31.64 kgf-m or 228.95 ft.lbs) at 2800 Rev. por min.', 'Diámetro pistón x longitud movimiento: 101.6 x 88.4 mm (3.98 x 3.5 pulgadas)', 'Combustible: Gasolina', 'Transmisión: Manual, 5-velocidades', and 'Relación potencia/peso: 0.1046 PS/kg'. The page also includes a sidebar with social media sharing options and a 'Publica tu carro GRATIS' advertisement.