



Facultad de Ingeniería
Universidad de Buenos Aires

Tesis de grado

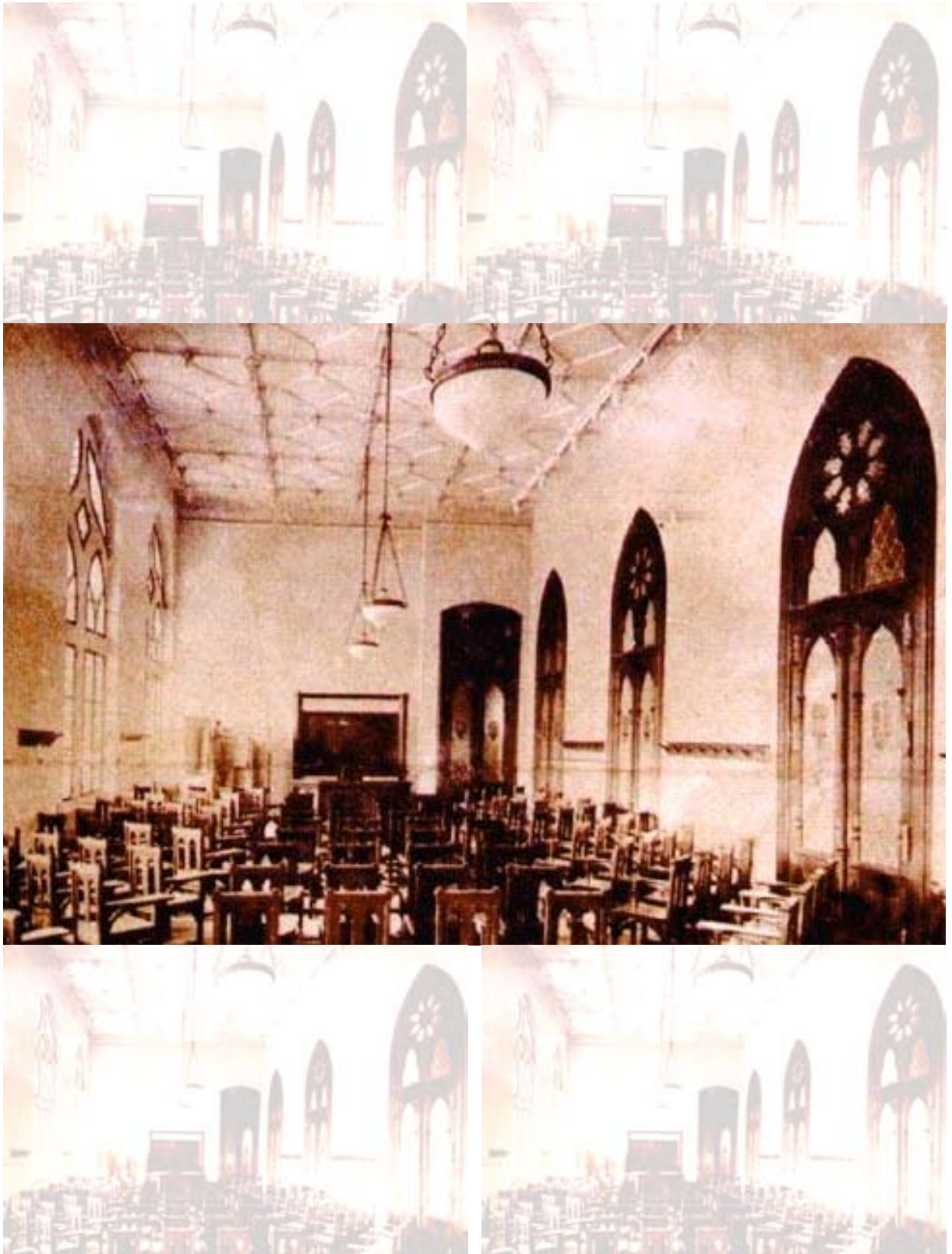
**Estudio de innovaciones factibles en el diseño de
la seguridad de impacto de un automóvil**

Mayo de 2004

Alumno: Gustavo Zini
Padrón: 68649
Carrera: Ingeniería Industrial
Tutor: Ing. Daniel Zambrano

Índice

1) Introducción	5
Contexto	7
Propuesta de trabajo	9
2) Accidentes de tránsito	15
Impacto económico y social de los accidentes	20
Estadísticas y tendencias generales	24
Responsabilidad del automóvil en la seguridad vial	33
3) Evolución del automóvil	45
Primeros vehículos	49
Satisfacción de las necesidades básicas	52
Satisfacción de las otras necesidades	57
4) Seguridad en vehículos modernos	67
Características generales del mercado automotor	73
Seguridad de información y control	79
Seguridad de impacto	88
Seguridad en desarrollo	100
5) Bases para los modelos de análisis	111
Modelos de simulación de colisiones	116
Mecanismos de daño al cuerpo	122
Resistencia biológica a impactos y aceleraciones	128
6) Evaluación de la protección actual	143
Patrones de accidentes viales	149
Bases de la seguridad en accidentes	156
Comportamiento de la estructura del automóvil moderno	163
Comportamiento de los dispositivos de sujeción	178
Análisis de resultados de programas de ensayo	195
7) Innovaciones factibles	207
Innovaciones en la estructura exterior del automóvil	212
Innovaciones en el habitáculo del automóvil	226
Innovaciones en los dispositivos de sujeción del automóvil	236
Innovaciones en la estructura interior del automóvil	243
Diseño integrado (habitáculo/estructura exterior/sujeción)	249
8) Venta de las innovaciones	267
Evaluación económica del desarrollo de las innovaciones	271
Posicionamiento y comercialización	283
9) Conclusión final	301
Una victoria pírrica	303
10) Anexos	313
Análisis de conceptos físicos relacionados	315
Análisis de choques elásticos e inelásticos	326
Automóviles no contaminantes	334
Organismos de seguridad	338
Índice de tablas y gráficos	341



1. Introducción

*"Demasiado corpóreo,
limitado,
compacto.
Tendré que abrir los poros
y disgregarme un poco.
No digo demasiado."*

Oliverio Girondo, *Restringido propósito*, en *Persuasión de los días* (1968).

-
- **Contexto**
 - **Propuesta de trabajo**

1.1. Contexto

Lo primero que debo confesar es que la realización de esta Tesis me ha llevado mucho más tiempo del que nunca hubiera pensado (hasta se podría decir que más del conveniente). Mi situación de estudiante y trabajador me ha en parte obligado, y en parte excusado, a terminar una carrera de seis años en el doble de ese tiempo. Y en casi todo ese período he dedicado algo de mi tiempo a pensar en el tema de la Tesis. Mis acercamientos posteriores al estudio de los accidentes de autos fueron muy intermitentes, y siempre estuvieron condicionados a la aprobación del resto de las materias de la carrera. Por eso recién al terminar de aprobarlas comencé a poner en orden el cúmulo de papeles e información dispersa recolectada en tantos años de investigación preliminar. Debo aclarar también, que yo no hubiese podido realizar esta Tesis hasta hace unos pocos años, ya que el acceso a la información que me ha dado Internet ha sido sin duda determinante para comprender y analizar la enorme mayoría de los conceptos aquí vertidos. El contexto del país no ayudó tampoco demasiado, desde la casi nula información disponible de parte de los organismos oficiales, hasta la enorme dificultad económica de comprar la bibliografía necesaria, pasando por lo laborioso que resulta encontrar material de estudio actualizado en las bibliotecas públicas (o inclusive en la misma Universidad).

Pero lo concreto es que desde hace un tiempo quiero investigar la manera de evitar las consecuencias desastrosas de los accidentes de auto. Desde el día de la frase que cambió todo. Aquella de 1993 ó 1994 al final del relato donde mi madre me contaba que recién habían anunciado en la radio que en un accidente en la provincia de Córdoba habían muerto instantáneamente todos los ocupantes de un Peugeot 405 al salirse de la ruta a más de 140 km/h e impactar contra un poste de luz. La violencia fue tal que, en palabras del locutor, el auto se "abrazó a la columna". Esa fue la frase que cambió todo. Desde ese día en que dos mujeres y tres niños murieron de manera horrible supe que se debía encontrar alguna manera de evitar tantas tragedias. Que algo estaba mal, y que había que investigar la manera de minimizar las consecuencias de los accidentes de tránsito. La Facultad de Ingeniería me dio la oportunidad y el pretexto de investigarlo a través de esta Tesis de grado. Es decir, que este trabajo no es un hito más en mi formación de ingeniero industrial, sino un desarrollo que responde a una vocación de investigación, en el único contexto razonablemente posible en un país hasta hace poco en llamas, realizado a los 34 años, durante los fines de semana y en el tiempo libre, después de trabajar desde hace más de doce años, 50 horas semanales.

Pasando a otro tema, como desde algún ámbito se ha cuestionado muy seriamente la incumbencia de la Ingeniería Industrial en un área que parece, a simple vista, un tema más apropiado para la Ingeniería Mecánica, me gustaría aclarar mi posición con respecto a esto. Creo firmemente que el tema, desde el punto de vista en que está encarado en este trabajo, es mucho más propio de un ingeniero industrial que de un ingeniero de otra especialidad. Por un lado, el vasto conocimiento acerca de los sistemas de producción, tanto desde los procesos de fabricación, como de las relaciones humanas o de los procedimientos de calidad y medio ambiente, nos permite tener una visión integral de todo el proceso productivo, desde el diseño hasta la post venta. Por el otro, la utilización de herramientas cuantitativas y de ingeniería económica nos habilita a evaluar desde un aspecto también ampliamente abarcativo el bien a producir y comercializar. Es bueno aclarar que ninguno de los aspectos mencionados está presente, con la intensidad que lo está en la currícula de Ingeniería Industrial, en las demás ramas de la Ingeniería. Además, en otros aspectos que tienen que ver con la utilización de herramientas matemáticas o físicas no hay diferencias entre las distintas especiali-

dades, ya que compartimos los contenidos de esas materias “duras” (Análisis Matemático, Álgebra, Física). Por último, si bien tenemos un conocimiento más bien general de la industria, no desconocemos en absoluto el resto de los temas que pertenecen al universo de automóvil, como los materiales –y sus resistencias y aplicaciones–, o como los dispositivos mecánicos, eléctricos e hidráulicos básicos (a través de materias como “Máquinas térmicas”, “Mecanismos”, “Electrotecnia general” o “Mecánica de los fluidos”).

Creo, en definitiva, que el poder de integración que se puede lograr con el conocimiento general de la industria que proveen las materias de la carrera de Ingeniería Industrial es determinante en cuanto a la ventaja de esta carrera, con respecto al resto, para analizar un fenómeno tan complejo como la seguridad en el automóvil. Que, como se verá más adelante, no se limita solamente al aspecto del diseño mecánico. Es tiempo entonces de disgregarse un poco –no demasiado– y pensar en la forma de realizar un trabajo que me permita integrar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, y que al mismo tiempo se constituya en un aporte distinto, innovador y útil en el campo de la Ingeniería. Con las limitaciones del caso. Basta recordar para esto uno de los famosos aforismos de Ernesto Esteban Etchenique:

"Tu me pides el cielo y las estrellas. Yo te pido que seas razonable".

Dejo un último párrafo para agradecer a la gran cantidad de personas que me han ayudado a llevar mi trabajo a buen puerto. He recibido una enorme colaboración de parte de: Adolfo Dorfman (mi primer tutor y guía en este proyecto), Aníbal Cofone (FIUBA), Cristina Speltini (FIUBA), Eduardo Bertotti (ISEV), Gabriel Reina (CESVI), Carol Whittaker (Henry Ford Museum), Annikki Spinen (VTT) y Veli-Pekka Karllerg (VTT). Tampoco puedo dejar de agradecer a quienes me han ayudado en este camino de otra manera. Estoy hablando de aquellos que han dudado todo el tiempo de la utilidad del tema de la Tesis o, mejor, que han dudado que yo podía aportar algún elemento útil a la terriblemente compleja problemática de los accidentes viales. Ya que por momentos se han convertido en el motor de, por lo menos, algunas de estas páginas –aunque más no sea de una manera involuntaria–. Por último quiero agradecer a quienes me han ayudado de la manera más valiosa. Amigos y compañeros que han sabido interpretar la importancia que este trabajo tiene para mí y que han contribuido con opiniones y sugerencias: Miguel Ángel Asturias, Fernando Zizzias, Laura Russo, Paula Bendersky, Matías Pujo, Mariela Dopacio Garilli, John O'Toole, Fernando Cattáneo, Jorge García Arias, Marcelo Biscay, y mis padres Mario y Livia. A todos, a unos y a otros, muchas gracias.

1.2. Propuesta de trabajo

La presente Tesis tiene como objetivo principal analizar qué tipos de innovaciones factibles se pueden introducir en un automóvil para mejorar su seguridad de impacto. El motivo de esta orientación se puede encontrar en las siguientes premisas que se van a explicar con mayor detalle a lo largo del trabajo:

- los accidentes de tránsito son el origen de una catástrofe económica y social de proporciones gigantescas.
- es prácticamente inevitable que el conductor de un automóvil se equivoque, provocando un accidente.
- es prácticamente imposible modificar la estructura vial existente de manera de remover todos los obstáculos potencialmente peligrosos.
- parece posible, sin embargo, introducir mejoras en los automóviles que aumenten la eficacia de la protección de los ocupantes cuando son expuestos a un impacto.

A partir de esas premisas, a lo largo del trabajo se van a demostrar las siguientes afirmaciones, que permitirán evaluar la conveniencia de continuar la investigación de las innovaciones propuestas, para desarrollar un vehículo que proteja de manera más eficaz a los ocupantes durante un impacto:

- el automóvil moderno es en esencia una evolución de los modelos de principios del siglo XX, donde la seguridad de impacto no era una necesidad básica a satisfacer.
- los automóviles actuales cuentan con más y mejores dispositivos de seguridad con respecto a los vehículos de algunas décadas atrás, que no alcanzan a compensar el aumento de energía cinética involucrada en un accidente (que tiene incidencia directa en el daño potencial a los ocupantes de los vehículos).
- para minimizar los daños al organismo, el conocimiento actual de la medicina indica que se deben evitar todos los impactos directos en cualquier lugar del cuerpo humano y las variaciones instantáneas de velocidad, si bien se pueden soportar altas aceleraciones durante períodos cortos de tiempo.
- los automóviles actuales no son capaces de proteger adecuadamente a sus ocupantes en muchos tipos de accidentes, y la mayoría de los vehículos ni siquiera lo pueden hacer en choques contra objetos fijos a 64 km/h, impacto que por otra parte es de menor gravedad que el más común de los accidentes de tránsito.
- existen innovaciones factibles desde el punto de vista tecnológico que pueden mejorar la seguridad de impacto (muchas ya desarrolladas desde hace años).
- invertir en seguridad puede generar retornos económicos considerables, inclusive utilizando cálculos prudentes.

Queda excluido de esta investigación el análisis profundo de otros aspectos importantes de los accidentes viales tales como las consecuencias (y maneras de evitarlas) a los ocupantes de otros vehículos que no sean automóviles, como motos, camiones, autobuses, y sólo se va a hacer una pequeña mención acerca de la manera de proteger mejor a los peatones y ciclistas. La propuesta de este análisis, en definitiva, se

puede resumir en el estudio de la combinación de un tipo de estructura y de algunos elementos de seguridad que permitan evitar las causas de lesiones graves en un accidente de tránsito. Para terminar, debido a la característica intrínseca de una Tesis de grado, la intención principal del trabajo es señalar algún campo que pueda ser desarrollado con detenimiento en los ámbitos correspondientes (organismos de seguridad, fabricantes de automóviles, etc.), y a través de los recursos adecuados (laboratorios, programas de simulación, ensayos con "dummies", etc.).

Primera parte

El gran Dios Auto

"Margaret. – ¡Los niños valientes de su mamá! (Ríe afectuosamente y pregunta luego, con curiosidad) ¿Quieren ustedes al señor Brown?

El mayor. – ¡Naturalmente! Es un buen hombre.

El segundo. – ¡Excelente!

El menor. – ¡Claro que sí!

Margaret. – (Casi hablando consigo misma) Papá asegura que el señor Brown le roba sus ideas.

El mayor. – (Con sonrisa tímida) Apostaría a que papá dijo eso... por decir.

El segundo. – El señor Brown no tiene necesidad de robar... ¿no te parece?

El menor. – ¡Naturalmente! ¡Es riquísimo!"

Eugene O'Neill, *El gran Dios Brown* (1925).



2. Accidentes de tránsito

"El auto rozó el terraplén central y el neumático delantero reventó, saliéndose de la rueda. Fuera de control, el auto atravesó el terraplén y trepó por la rampa de salida. Se acercaban tres automóviles, vehículos producidos en serie cuyos accesorios externos, modelo y color recuerdo aún con la dolorosa exactitud de una pesadilla inacabable. Eludí a los dos primeros apretando los frenos y pasando a duras penas entre ambos. Al tercero, donde viajaban una joven médica y su marido, lo choqué de frente. El hombre, un ingeniero químico empleado en una compañía norteamericana de productos alimenticios, saltó a través del parabrisas como disparado por un cañón de circo y murió instantáneamente sobre el capot de mi automóvil. La sangre atravesó el parabrisas roto y me cubrió la cara y el pecho. Los bomberos que me sacaron más tarde de la cabina aplastada pensaron que yo tenía una herida en el corazón y que estaba desangrándome."

J. G. Ballard, *Crash* (1973).

-
- **Impacto económico y social de los accidentes**
 - **Estadísticas y tendencias generales**
 - **Responsabilidad del automóvil en la seguridad vial**

2.1. Introducción y resumen del capítulo

Es difícil cuestionar los mitos (y el automóvil sin dudas lo es). A tal punto esto es así, que en general se prefiere pensar que darse cuenta de un defecto de un mito es consecuencia de una equivocación propia. Tal vez esa sea la razón por la cual es casi imposible leer o escuchar comentarios que parte de la responsabilidad de los accidentes de tránsito recaen en el automóvil. Es que es probable que muchos se sientan aliviados al culpar de tanta tragedia a los imperfectos seres humanos que conducen, elevando al automóvil a la condición de objeto cercano a la excelencia, como si fuera un Dios, el gran Dios Auto.

Pero lo cierto es que las consecuencias de los accidentes de tránsito en el ámbito económico son muy relevantes, y en el ámbito social son incalculables. Desde que se inventó el automóvil ha muerto, a causa de accidentes que involucran vehículos, un número de personas aproximadamente equivalente a la cantidad de víctimas de la Segunda Guerra Mundial (algo más de cincuenta millones de personas). La cantidad de heridos de gravedad que debieron –o deben– convivir con alguna discapacidad de tipo permanente probablemente supere en diez o veinte veces esa cifra. A lo que se suman la enorme y constante pérdida de bienes materiales e infraestructura, los costos que representa para la sociedad en su conjunto la atención médica de las víctimas y su rehabilitación, y los estragos que se generan en el seno de las familias y del entorno de las víctimas.

Resulta extraño, entonces, que la Humanidad sea incapaz de evitar –o al menos minimizar– tamaño tragedia. Una de las opiniones interesantes que pueden ayudar a entender mejor las razones de la evolución de la cantidad de heridos y muertos por accidentes de tránsito es la de Ralph Nader¹ quien reflexionaba en el siguiente párrafo escrito en la década de los '60 acerca de la posición de los responsables de minimizar las consecuencias de los accidentes de tránsito (1):

*"Algo ocurrió con la inteligencia humana cuando empezaron a utilizar vehículos. La muerte y las heridas ocasionadas por los accidentes se empezaron a llamar **actos de Dios, o mala suerte**. Librarse de una herida o de la muerte en un accidente es considerado **un milagro**. Aun la gente que por su formación intelectual debiera buscar una explicación racional cree que las fuerzas en juego en los accidentes de automóviles son demasiado grandes para que las soporte el cuerpo humano, sean cuales fueren las circunstancias. De manera **que se dedican a la prevención de accidentes y no a la prevención de las heridas cuando aquéllos ocurren.**"*

Así, como punto de partida de este trabajo de investigación, lo primero que se debe analizar es la magnitud del impacto de los accidentes viales, incluyendo un estudio de la responsabilidad que le cabe al automóvil en la tragedia cotidiana de la cual es uno de los principales protagonistas. De esta manera se puede tanto establecer la importancia de este fenómeno que acompaña a la Humanidad desde hace más de un siglo, como deducir, en función de las pérdidas económicas derivadas de los accidentes, la magnitud de los recursos que se podrían invertir en mejorar la seguridad vial a través de –entre otras cosas– el desarrollo de un automóvil más seguro que el actual.

¹ Renombrado defensor de los derechos del consumidor en los Estados Unidos.

Resumen del capítulo

Los aspectos relevantes del **impacto económico y social de los accidentes** son los siguientes:

- a pesar de que el costo económico de una muerte es difícil de establecer, algunas estimaciones indican que es probable que sea de un millón de dólares por cada víctima fatal.
- de esta manera, cada país pierde en promedio entre dos y tres puntos de su PBI cada año.
- la situación se complica más al intentar medir el impacto social de un fenómeno de amplias proporciones que (entre otras cosas) afecta especialmente a los jóvenes que son el grupo más expuesto –trastornando profundamente el seno de sus familias–. Además, los niños y jóvenes que pierden a sus padres también sufren una pérdida terrible que los afectará de por vida. A esto se suma que la sociedad en su conjunto debe hacerse cargo de la reinserción de las víctimas, adaptando la infraestructura general (edificios, hogares) a las nuevas necesidades de los cientos de miles de personas que cada año deben soportar alguna discapacidad permanente.

En cuanto a las **estadísticas y tendencias generales** de los accidentes de tránsito se puede destacar que:

- la cantidad de víctimas fatales por accidentes de tránsito es de aproximadamente un millón de personas por año.
- las estimaciones indican que se trata de un fenómeno que se agrava año tras año, y que para el año 2020 los accidentes de tránsito serán la tercera causa de muerte en el mundo.
- de acuerdo con el relevamiento hecho, la base de datos estadísticos más adecuada para el análisis es la de la NHTSA (Estados Unidos).
- en ese país, que representa la situación de los países desarrollados, la tasa de accidentes totales por kilómetro recorrido ha descendido en los últimos diez años.
- lo mismo sucede con la tasa de accidentes fatales por kilómetro recorrido.
- todo parece indicar, sin embargo, que si hay menos muertes por kilómetro recorrido es porque hay menos accidentes por kilómetro recorrido (tampoco hay transferencia de la cantidad de muertos hacia la cantidad de heridos).
- al mismo tiempo que baja la tasa de accidentes por kilómetro recorrido, aumenta la cantidad de kilómetros recorridos, por lo tanto la cantidad total de accidentes tiende a ser mayor, o en el mejor de los casos a permanecer constante.

Para terminar, el resumen de la **responsabilidad del automóvil en la seguridad vial** incluye los puntos que siguen:

- existen numerosos factores que afectan la seguridad vial, entre ellos algunos que influyen en la cantidad de accidentes que se producen, y otros que inciden en el resultado de los mismos.

- muchos expertos indican que resulta prioritario modificar la conducta de los automovilistas, sobre todo en lo que hace a la excesiva velocidad de circulación y a las imprudencias y errores al frente del volante.
- al mismo tiempo, se puede comprobar que el automóvil también es responsable de la alta velocidad de circulación, y que permite desarrollar velocidades mayores a aquellas donde puede proteger eficientemente a sus ocupantes.
- además, es un hecho comprobado que menores velocidades de circulación generan una menor cantidad de muertes (y de heridas que derivan en discapacidades permanentes), si bien es poco probable que los conductores acepten una reducción importante de la velocidad a la que viajan.
- en este contexto el automóvil sólo es capaz de proteger a los ocupantes en impactos contra objetos fijos, a velocidades inferiores a las que se permite circular por ley.

2.2. Impacto económico y social de los accidentes

Si bien es relativamente fácil estimar el impacto económico de los accidentes en términos de la pérdida de bienes materiales personales o de infraestructura vial y edilicia, es por otro lado casi utópico pensar en establecer una medida que indique el costo monetario de una muerte, o de una herida grave que derive en algún tipo de discapacidad permanente. También se puede hallar un número que represente la pérdida de capacidad de producción, o lo que cuesta el proceso de rehabilitación, entre otros aspectos, pero es solamente eso, apenas un número. Adicionalmente se debe tener en cuenta que las pérdidas de tipo económico no son las únicas que sufre la sociedad, y todo indica que no es nada sencillo representar lo que significa una muerte, para el entorno cercano a la víctima o para el resto de la comunidad, en cuanto a las implicancias sociales. De todas maneras lo que sigue consiste en un resumen de los aspectos más importantes que refleja la bibliografía consultada.

Estimación del impacto económico de los accidentes de tránsito

El costo económico de los accidentes de tránsito se puede segmentar en cinco grupos, de acuerdo a lo siguiente:

- a) pérdidas y daños materiales.
- b) gastos médicos directos.
- c) gastos administrativos.
- d) pérdidas de producción y consumo.
- e) daños morales y biológicos.

Los conceptos se encuentran ordenados de acuerdo a la dificultad de establecer ese costo. Algunos elementos de la lista son muy complejos de analizar y muchos investigadores disienten profundamente en la manera de hacer los cálculos. Los primeros tres elementos se pueden estimar a partir de muestreos de los accidentes (bases de datos de los informes policiales o de institutos dedicados a la problemática), de consultas en los hospitales, centros de atención especializados e institutos de rehabilitación, y del relevamiento de los gastos administrativos (policía, bomberos, poder judicial). Los últimos dos son los más difíciles de estimar y aquí es donde las diferencias de criterio se hacen más claras. De un informe del instituto finlandés de seguridad VTT (2) se pueden extraer las maneras más frecuentes de evaluar el impacto económico de los puntos d) y e):

- i) valor del PBI per cápita: se toma el PBI per cápita y se lo multiplica por los años que las víctimas hubieran vivido (de acuerdo a la expectativa de vida promedio).
- ii) valor de los seguros de vida: se considera el valor de cada vida de acuerdo al promedio de las pólizas de seguro de vida de los habitantes del país.
- iii) valor de las compensaciones judiciales: se asigna a la pérdida de vida o discapacidad el valor promedio de las compensaciones otorgadas por los jueces en el caso de demandas por accidentes de tránsito.

Es importante recordar que la utilidad de la valuación económica se circunscribe principalmente a indicar la conveniencia de invertir en la prevención de los accidentes, y

que todos los métodos buscan llegar a un valor aproximado. La NHTSA estima en su último informe al respecto (3) que **el costo económico de una muerte es de casi un millón de dólares**, y el de una herida grave es de aproximadamente cien mil dólares más. Todas estas consideraciones son importantes al tener en cuenta la complejidad de la estimación del impacto económico de los accidentes, tal como se puede deducir del detalle ampliado de los segmentos indicados anteriormente, de acuerdo a lo que indica el informe ya citado de la VTT:

a) pérdidas y daños materiales:

- *vehículos.*
- *cargas.*
- *infraestructura vial y urbana.*

b) gastos médicos directos:

- *costos de traslados y primeros auxilios.*
- *tratamiento hospitalario.*
- *tratamiento en el hogar.*

c) gastos administrativos:

- *costos policiales.*
- *costos del departamento de bomberos.*
- *costos judiciales.*

d) pérdidas de producción y consumo:

- *pérdida de la capacidad productiva de un individuo.*
- *pérdida del consumo de un individuo.*
- *pérdida del trabajo hogareño y voluntario.*
- *costo de reemplazo de un trabajador.*
- *transferencia de ingresos debido a la incapacidad de trabajar.*

e) daños morales y biológicos:

- *pérdida de expectativa de vida (muerte prematura).*
- *pérdida de salud futura (heridas no fatales).*
- *costos de rehabilitación, educación y conversión del medio operativo.*

De todas maneras no todos los expertos coinciden con esta apertura, y la diferencia de criterios para evaluar el impacto económico queda reflejada en el siguiente ejemplo: mientras que para unos investigadores (Kreisner y Leeth) el valor estadístico de una vida en 1991 era de alrededor de 600.000 dólares, en la opinión de otros expertos (Moore y Viscusi) era, en el año anterior, de 15.600.000 de dólares (2). Una diferencia de 26:1 parece exagerada y parece alcanzar para reflejar las diferencias entre las distintas opiniones. Otro ejemplo de las diferencias de criterio surge al comparar las estimaciones de gastos de Italia y de los Estados Unidos en atención médica directa a las víctimas de accidentes. Mientras que para el primero de los países el costo anual llega a los 500 millones de dólares, que representa casi el 2% del costo económico total de los accidentes de tránsito, para el segundo los gastos médicos directos son de 34.000 millones de dólares, o sea, cerca de un 15% del costo económico total. Éstas y otras diferencias se pueden analizar en siguiente cuadro que resume las estimaciones de costos derivados de los accidentes de tránsito para esos dos países, a lo que se agrega el total de gastos estimado para la Argentina:

costo económico total estimado de los accidentes de tránsito
[en millones de dólares]

rubro	Argentina ²	Italia ³	EE.UU. ⁴
pérdidas y daños materiales		10.500	59.000
pérdidas de producción y consumo		9.000	111.000
daños morales y biológicos		5.500	no considerado
gastos médicos directos		500	34.000
gastos administrativos		4.500	26.500
total	3.500	30.000	230.500
% PBI	2,5	2,4	2,3

tabla 2.1

Lo importante es que, más allá de las diferencias de criterios entre los expertos, y de las grandes asimetrías que existen en los tres países en términos de los aspectos viales, todas las estimaciones coinciden en un número cercano al 2,5% del PBI. Tomando un cierto margen de seguridad para estimar un valor aproximado, se puede entonces concluir que **el impacto económico que representan los accidentes de tránsito para cada país equivale aproximadamente a un valor de entre dos o tres puntos porcentuales del PBI de un país⁵.**

Comentarios sobre el impacto social de los accidentes de tránsito

No hay mucho material bibliográfico que analice el impacto social tanto de los automóviles en sí mismos como de los accidentes de tránsito. Se puede decir que como consecuencia de los accidentes de tránsito la sociedad debe pagar una serie de costos que no siempre son mensurables desde un punto de vista económico. Es que en el caso de los cientos de miles de discapacitados que generan los accidentes de tránsito año tras año, por citar un ejemplo, las consecuencias sociales no se limitan a la necesidad de proveerles protección y ayuda, de generar un sistema eficaz de rehabilitación, o de acondicionar las ciudades, para que las víctimas tengan las mismas oportunidades y comodidades que tenían antes de sufrir el accidente. Por el contrario, muchas veces la sociedad "paga" en términos de los trastornos al núcleo familiar derivado del nuevo escenario, del resentimiento de la víctima, o de la situación que coloca al discapacitado en un lugar cercano al de "estorbo" (sobre todo en una sociedad tan pendiente del éxito individual como la actual). En cuanto a las muertes la situación no es muy distinta. El filósofo francés Blaise Pascal proponía una equivalencia entre la movilidad y la vida misma. Es imposible pensar cómo se desenvolvería la sociedad moderna sin el automóvil, casi de la misma manera que no se puede concebir la idea de un mundo sin computadoras, sin internet, o sin teléfonos. Los seres humanos asumen que el hecho de estar vivos y de pertenecer a una sociedad implica una serie de riesgos que se deben correr para poder desempeñar sus funciones cotidianas. Enfrentan la muerte a diario, sometiéndose a riesgos de distinta naturaleza (quienes viven en las grandes ciudades saben que los peligros que corren son muy distintos a los de un habitante del campo) y entienden que la muerte acecha a todo el mundo en más de una forma. Pero tienen incorporada la idea de que los decesos ocurren de manera natural, o por enfermedades, y en mayor proporción a medida que envejecen. Por eso es importante

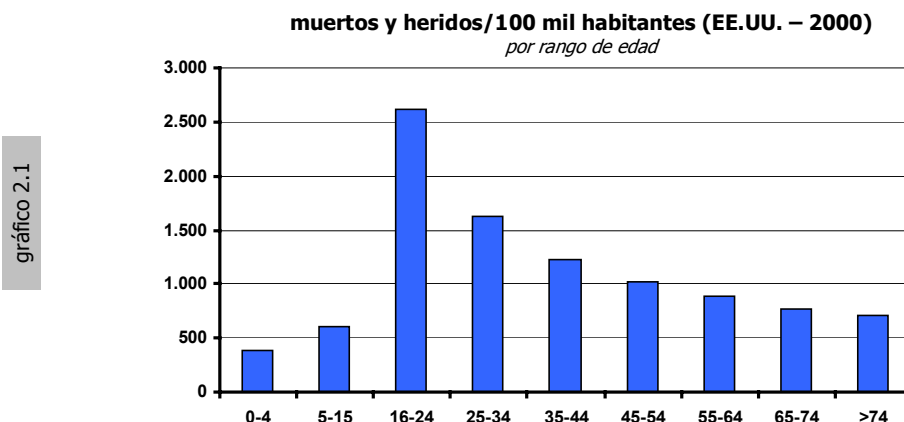
² Datos estimados para el año 2002 por el ISEV (4).

³ Datos del Corriere della Sera para el año 2001 (5).

⁴ Datos de la NHTSA correspondientes al año 2000 (3).

⁵ Un informe de la WHO (World Health Organization) (6) estima que el mundo pierde alrededor de un punto y medio de su PBI como consecuencia de los accidentes de tránsito.

tener en cuenta que la mayor parte de las víctimas de accidentes de tránsito son jóvenes. Por lejos el grupo que va desde los 16 a los 24 años es el más expuesto, tanto por sus hábitos –en general ocupan automóviles en los momentos más peligrosos, de noche los fines de semana, muchas veces bajo el efecto del alcohol o drogas– como por sus comportamientos –son los que circulan a mayor velocidad y los que conducen de manera más imprudente ya que sienten que nada puede dañarlos–. Las consecuencias de esos factores se reflejan en las estadísticas, tal como se puede observar en el siguiente gráfico (7):



La muerte de personas jóvenes afecta, con su carga brutal de sinsentido, a toda la familia. La culpa que genera en los padres es insostenible (¿por qué lo dejé ir?); los conflictos de la pareja se acentúan, y el dolor de la pérdida deja un vacío casi imposible de llenar, mientras todo se desmembra. En consecuencia, la sociedad no sólo pierde a la persona involucrada en el accidente, sino que generalmente pierde por un tiempo largo (a veces para siempre), y aunque sea parcialmente, **a su entorno más cercano**. Por último, la muerte de personas adultas también repercute en los jóvenes y en los niños que pierden a sus padres, afectándolos de por vida⁶.

⁶ Hay otro costo social más profundo, y a la vez oculto, y casi imposible de estimar por otro lado. Se puede pensar por un momento en que alguno de los adolescentes muertos en accidentes de tránsito sea una persona especial, de esas cuyo peso específico es tan grande que por sí mismas generan cambios en la sociedad. Si Albert Einstein hubiera muerto en un accidente de tránsito antes de postular su "Teoría de la relatividad", ¿sería la física moderna la misma que es hoy? Tampoco se puede estar seguro de que cada idea de Newton hubiera podido ser reemplazada por las de Leibniz, y la matemática moderna hubiera sufrido un retraso en su desarrollo de varias décadas o más. Probablemente la música moderna no sería la misma si John Lennon no hubiera sobrevivido hasta los cuarenta años, y tampoco sería la que es hoy, si estuviera vivo en el presente. Se puede imaginar una sociedad sin Galileo Galilei, sin Pasteur, sin Shakespeare, sin el Che Guevara, sin Mozart, sin Leonardo Da Vinci. Es difícil decir si sería mejor o peor, pero sin duda sería distinta a la actual. Las preguntas, entonces, que deben hacerse son: ¿cuántas de las personas que mueren anualmente a causa de accidentes de tránsito tienen el potencial de generar cambios culturales, económicos, sociales o de algún otro tipo? ; y ¿se está haciendo todo lo posible para evitar pagar ese costo? La primera pregunta es obviamente una conjetura casi sin respuesta, pero la segunda parece poder responderse, casi intuitivamente, de manera negativa.

2.3. Estadísticas y tendencias generales

El fenómeno de los accidentes de tránsito es de una complejidad tal que se hace difícil sintetizar en un espacio prudente sus características más importantes. Además, el análisis de las estadísticas puede ser una tarea ardua tanto para el que elabora las cifras y las conclusiones como para quien debe interpretarlas. Por eso en esta sección se resumen los indicadores más importantes, de acuerdo a lo que parece ser de utilidad para comprender la magnitud y evolución de los accidentes de tránsito, limitando la cantidad de información a lo estrictamente necesario.

Gravitación relativa de las causas de muerte en el mundo

En la década del '90 se realizó por primera vez un estudio a escala mundial para analizar las principales causas de muerte de la población mundial. En ese informe realizado por la Universidad de Harvard (8) se segmentaron esas causas en tres grupos. El grupo I incluía las enfermedades de transmisión congénita, las del período perinatal y los déficits nutricionales. En el grupo II se hallaban las enfermedades que no se transmiten (cáncer, enfermedades del corazón, etc.). Finalmente, el grupo III abarcaba las muertes por heridas traumáticas. De las algo más de cincuenta millones de muertes anuales estimadas para esa década, los decesos provocados por heridas representaban aproximadamente el 10%. Y de esos cinco millones de muertes por heridas, el 20%, o sea un millón de muertes por año, tenían como causa directa los accidentes de tránsito⁷. Integrando ambos resultados, se puede afirmar que en la década del '90 un **2% de las muertes en el mundo eran provocadas por los automóviles**. Las tendencias variaban si se consideraban los países desarrollados o los países en vías de desarrollo, tal como se puede observar en la siguiente tabla, cuyos valores están expresados en miles de personas:

tabla 2.2

rubro	países desarrollados	países en vías de desarrollo	total mundial
muertes por enfermedad (grupos I y II)	9.380	35.322	44.702
muertes por heridas (grupo III)	829	4.232	5.061
total de muertes	10.912	39.554	50.466
<i>muertes por accidentes de tránsito</i>	<i>222</i>	<i>777</i>	<i>999</i>
<i>% sobre las muertes del grupo III</i>	<i>26,8</i>	<i>18,4</i>	<i>19,7</i>

De la tabla se concluye que si se consideran las muertes por heridas, los accidentes de tránsito tienen mayor incidencia en los países desarrollados (26,8% de los decesos del grupo III) que en los países en vías de desarrollo (18,4% de las muertes del mismo grupo). Esto parece lógico, ya que tanto la cantidad de automóviles como los kilómetros recorridos son menores en los países menos desarrollados. Lo cual lleva a una reflexión inquietante. El desarrollo económico genera, entre tantas otras cosas, un mayor uso de los automóviles como medio de transporte personal, y por ende más muertos y heridos como consecuencia de los accidentes de tránsito. En el mismo informe citado anteriormente se estima que para el año 2020 las muertes de tránsito, que en la década del '90 representaban la novena causa, **serán la tercera causa de**

⁷ El informe de la WHO anteriormente citado estima que, en la actualidad, la cantidad de muertos anuales en el mundo alcanza el millón doscientas mil personas (6).

muerteres en el mundo. En la tabla que sigue se puede observar la evolución prevista para cada causa, con las muertes nuevamente expresadas en miles:

tabla 2.3

año 1990		posición			año 2020	
causa	muerteres				causa	
enfermedades del corazón	6.260	1		1	enfermedades del corazón	
enfermedades del cerebro	4.381	2		2	depresión del sistema nervioso	
infecciones respiratorias	4.300	3		3	<u>accidentes de tránsito</u>	
diarrea	2.940	4		4	enfermedades del cerebro	
complicaciones perinatales	2.361	5		5	complicaciones pulmonares	
complicaciones pulmonares	2.211	6		6	infecciones respiratorias	
tuberculosis	1.922	7		7	tuberculosis	
papera	1.058	8		8	guerras	
<u>accidentes de tránsito</u>	999	9		9	diarrea	
paludismo	856	10		10	HIV	
otros	23.178					
total de muertes	50.466					

De todas maneras, existen discrepancias entre estos datos y los recogidos en otras fuentes de información. Por ejemplo, un informe realizado por BMW (9) indica que las muertes por accidentes de tránsito representan el 0,8% de las muertes totales en Alemania en lugar del 2% que se indicaron anteriormente. Una explicación posible para las aparentes incompatibilidades entre los datos de diferentes países se encuentra en las distintas maneras en que cada país clasifica las muertes. A pesar de que el mismo informe explica que (según los analistas) el 97% de las muertes por accidentes de tránsito ocurre dentro de los treinta días de ocurrido el hecho, sólo algunos países consideran una muerte como deceso por accidente de tránsito si la víctima fallece dentro de los treinta días de haber sufrido el accidente. Estos países son, entre otros, Alemania, Estados Unidos, España y Austria. Pero Japón, Polonia y Turquía sólo consideran al accidente de tránsito como causa del fallecimiento si la persona muere en el mismo día. Grecia en tres días. Italia y Francia dentro de la semana. Años atrás, Estados Unidos computaba las muertes por accidente de tránsito si el fallecimiento ocurría hasta un año después del accidente, pero la incidencia de la probabilidad de que la víctima muriera por otra causa era tan alta que se cambió el período de un año por el de treinta días. Esto indica la poca utilidad de comparar datos de distintos países sin conocer las bases estadísticas que soportan esos datos, y que inclusive conociendo los criterios de cada uno, **las diferencias entre lo que cada uno considera muerte por accidente de tránsito hace muy difícil extrapolar resultados o establecer la diferencia en eficacia de las medidas adoptadas por cada país.**

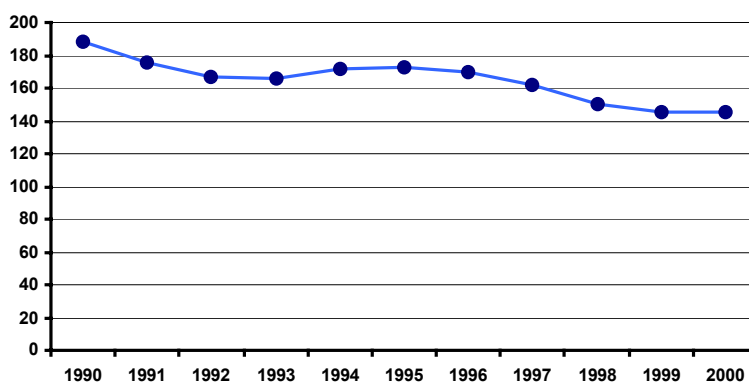
Evolución de la cantidad de accidentes viales

Son pocos los países que llevan un adecuado control de los accidentes viales. Además de existir diversos criterios al computar las muertes por accidentes, existen otras diferencias en lo que hace a los presupuestos asignados a este control. A mayor nivel de desarrollo corresponde un mayor gasto en prevención y análisis (para lo que es indispensable contar con datos estadísticos confiables) y por eso es necesario recurrir a la base de datos más completa disponible, que es la que la elabora la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) de los Estados Unidos (7). Lo útil de esta base, que no se encuentra en otras, es que se toman en cuenta todos los accidentes viales,

y no únicamente aquellos donde hay muertos o heridos. A esto último se le suma el hecho que la proporción de automóviles y el grado de utilización de los mismos son por mucho uno de los más altos del mundo, lo que resulta en una base de datos amplia, en un país que reúne prácticamente todos los climas, y cuya red vial incluye desde las más modernas autopistas de seis carriles por mano hasta pequeños caminos de campo. La primera conclusión importante del informe anual del año 2002 (que reúne datos hasta el 2000 inclusive) es que **en los últimos diez años la cantidad de accidentes de tránsito en los Estados Unidos se ha mantenido estable** en algo más de seis millones de accidentes anuales. Pero en ese mismo período han aumentado considerablemente los kilómetros recorridos. Si se toma entonces la tasa de accidentes por millón de kilómetros recorridos se observa una leve, pero constante, disminución, tal como refleja el siguiente gráfico:

gráfico 2.2

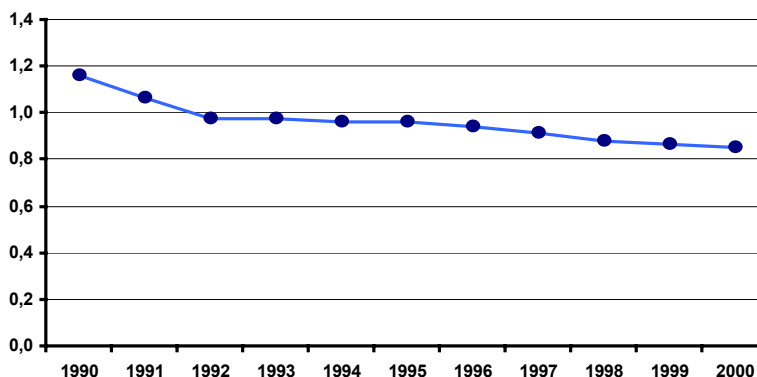
cantidad de accidentes/100 millones km. recorridos (EE.UU. – 1990/2000)



En otras palabras, los ocupantes de un automóvil sufren, en promedio, **un accidente cada 650.000 km recorridos**, con una tendencia que indica que de año en año se recorren más kilómetros de manera segura. Si además se considera que, también en promedio, cada conductor recorre unos quince o veinte mil kilómetros anuales, se puede concluir que se sufre aproximadamente **un accidente cada cuarenta años de conducción**. Se debe recordar que se trata de un accidente cualquiera, que puede incluir sólo daños materiales. La tasa de accidentes fatales (que incluyen por lo menos un muerto, sea ocupante o no de los vehículos involucrados) evolucionó, por otro lado, de acuerdo al siguiente gráfico:

gráfico 2.3

accidentes fatales/100 millones km. recorridos (EE.UU. – 1990/2000)



Esto indica que la disminución de la tasa de accidentes fatales por kilómetro recorrido repite la tendencia de la tasa de accidentes totales (medida en función del mismo parámetro). Lo que también puede dar una pista acerca de la evolución de la gravedad de los accidentes, que se analizará con mayor detalle a continuación.

Evolución de la cantidad de muertos y heridos

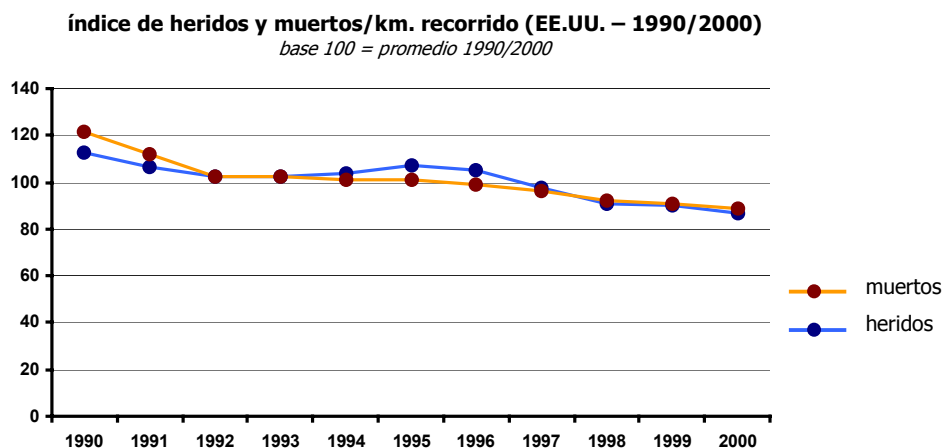
Es de esperar que, a medida que el parque automotor se renueve, exista una mayor proporción de vehículos con dispositivos de seguridad modernos. En consecuencia, se puede imaginar un escenario en donde las víctimas de los accidentes gozan de una mejor protección, y los índices de mortandad se reducen a lo largo de los años. Una buena manera de medir este fenómeno es a través del análisis de dos conjuntos de datos. Por un lado, analizando la evolución de la proporción de accidentes fatales en función de los accidentes totales, y por el otro lado, comparando la evolución de la cantidad de muertos y heridos por kilómetro recorrido. El primero de los indicadores ha evolucionado de la siguiente manera en los Estados Unidos (valores expresados en miles de accidentes):

tabla 2.4

tipo de accidente	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
fatales	40	37	35	36	36	37	37	37	37	37	37
totales	6.471	6.117	6.000	6.106	6.496	6.699	6.770	6.624	6.335	6.279	6.394
% fatales/totales	0,62%	0,60%	0,58%	0,59%	0,56%	0,56%	0,55%	0,56%	0,59%	0,59%	0,59%

De los datos se puede deducir que **la probabilidad de sufrir un accidente fatal** –dado que se ha sufrido un accidente de cualquier tipo– **permanece constante a lo largo de los diez años analizados**. Ese índice cercano al 0,6% no muestra una tendencia descendente, lo que implica que los accidentes entre 1990 y 2000 fueron igualmente graves, a pesar de que en los últimos años hay una mayor proporción de automóviles con airbag, cinturón de seguridad con pretensionador y con nuevas estructuras capaces de absorber más eficientemente la energía del impacto. Aquí se puede introducir el segundo aspecto a analizar, ya que si los vehículos nuevos protegieran mejor a sus ocupantes, debería existir una transferencia de la cantidad de muertos, disminuyendo este parámetro a costa de aumentar la cantidad de heridos. Pero **esto no se observa**, por lo menos en los EE.UU., tal como se deduce del siguiente gráfico:

gráfico 2.4



Es importante destacar que EE.UU. es uno de los países con parque automotor más nuevo y con leyes que obligan a dotar de airbag a los automóviles nuevos desde 1990, y que imponen el uso obligatorio del cinturón de seguridad desde 1986. Y a pesar de eso los números parecen demostrar que **si hay menos muertos por kilómetro recorrido no es debido a la mejor protección que los vehículos brindan a sus ocupantes, sino a que hay menos accidentes por kilómetro recorrido**. En definitiva, como resumen de las dos últimas secciones se puede establecer, asumiendo que las estadísticas de Estados Unidos reflejan en buena medida lo que ocurre en el resto del mundo, lo siguiente:

- **la cantidad total de accidentes permanece constante** (aunque si se mide en función de los kilómetros recorridos disminuye de año en año).
- **la gravedad de los accidentes se mantiene constante.**

Comentarios de la situación en Argentina

Como dato complementario al análisis es útil comentar algunos aspectos de la situación de la seguridad vial en nuestro país. Lamentablemente, en la Argentina no hay estadísticas oficiales de las muertes y heridas provocadas por accidentes de tránsito. A fin de establecer una idea de la situación se puede recurrir a los datos del ISEV (Instituto de Seguridad y Educación Vial). De la consulta de datos a dicho instituto se puede construir la siguiente tabla (datos expresados en cantidad de personas):

tabla 2.5

rubro	1999	2000	2001	2002	2003
muertos	9.386	8.781	8.536	7.430	9.556
heridos graves	13.000	16.000	16.000	14.000	20.000

Esto significa que las personas que mueren en Argentina por accidentes de tránsito son de alrededor de veinticinco por día, y los heridos algo más del doble. Se debe aclarar que los datos expresados corresponden a las estadísticas de muertes y heridos reportados por la Policía como ocurridos en el momento del accidente, que fueron posteriormente ajustados por el ISEV de acuerdo a un coeficiente establecido por la ONU para tener en cuenta la mortandad dentro de los treinta días de ocurrido el accidente. Pero para medir de una manera más acertada el significado de estos números, es oportuno compararlos con otros índices, de acuerdo al "Reporte regional Mercosur de siniestralidad vial" del mismo Instituto (4), con datos del año 2001:

tabla 2.6

tasa	Argentina	Total otros Latinoamérica ⁸	Estados Unidos	Alemania
población [millones]	36	375	280	82
muertos/año	8.536	56.251	42.116	6.977
muertos/100 mil habitantes	23,6	15,0	15,4	8,5
muertos/100 millones km recorridos	9,8	10,9	1,5	1,0

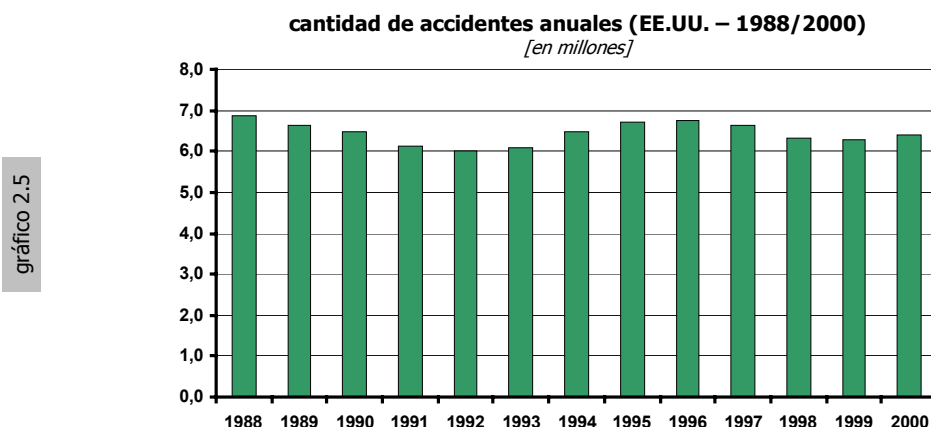
Como se desprende del cuadro, nuestro país tiene todas las características del sistema vial de los países en desarrollo, con una alta proporción de muertos en función de los kilómetros recorridos. En cuanto a las tendencias no hay información suficiente para extrapolar alguna conclusión. Lo que sí es claro que algunas campañas funcionan bien particularmente en los períodos críticos (como el Operativo Sol en la costa atlántica du-

⁸ Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, México, Paraguay, Perú y Uruguay.

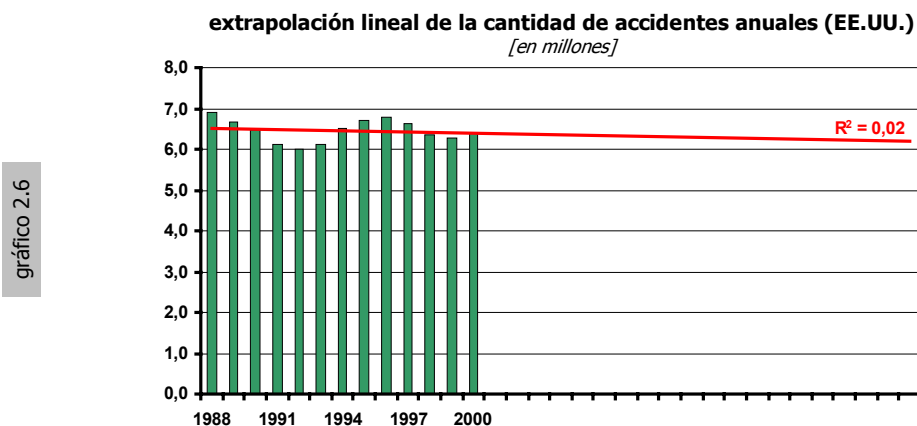
rante el verano) y que la marcada disminución de muertos y heridos del año 2002 con respecto al año 2001 se debe, entre otras cosas, a la menor cantidad de kilómetros recorridos, y de vehículos en las calles y rutas, que resulta de la crisis económica sin precedente que afectó a la Argentina en ese período. Mucho más útil a esa disminución parece ser un manifiesto mayor cuidado del vehículo (para evitar las costosas reparaciones) y, fundamentalmente, una menor velocidad de circulación como consecuencia del brusco aumento del precio de las naftas en un contexto de ingresos constantes.

Tendencias en la cantidad de accidentes de tránsito

Volviendo a las estadísticas de los Estados Unidos, el hecho que la cantidad de accidentes en ese país no disminuya se puede comprobar en el siguiente gráfico que considera los accidentes desde el año 1988 hasta el año 2000 (la NHTSA no indica la cantidad de accidentes totales en los años anteriores a 1988):



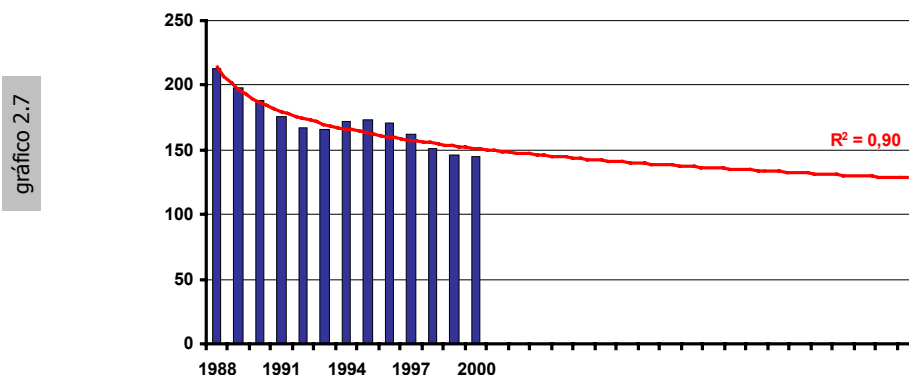
Es decir, que en los doce años indicados la cantidad anual de accidentes en Estados Unidos se mantuvo en un valor que osciló entre los seis y los siete millones. Por otro lado la curva no indica una tendencia clara. Si se realiza una extrapolación lineal de los valores para veinte períodos hacia delante, la curva de aproximación indica un bajo coeficiente de correlación⁹ tal como se puede observar en este gráfico:



⁹ El coeficiente de correlación (R^2) es una medida de la relación que existe entre los datos y la curva que indica su tendencia, y debe ser mayor a 0,7 para considerarse que esa relación tiene algún significado desde el punto de vista estadístico.

De esta extrapolación se pueden sacar dos conclusiones. Por un lado, que la cantidad anual de accidentes en los Estados Unidos se mantendrá aproximadamente constante –en algo más de seis millones– por los próximos años. Por el otro, que los datos presentan una tendencia errática que hace que la proyección tenga un alto grado de incertidumbre. Por eso resulta útil analizar por separado lo que ocurre con la tasa de accidentes por kilómetro recorrido, y la evolución de los kilómetros recorridos. De lo analizado antes en este mismo capítulo se puede recordar que se observa un marcado y constante descenso en la tasa de accidentes en función de los kilómetros recorridos. Sin embargo, es posible argumentar que la pendiente de la tendencia de los datos debe ser cada vez menor. Este tema es adecuado para un estudio mucho más profundo que no está dentro de los planes de esta Tesis, por eso se considerará la siguiente premisa. Como todo parece indicar que la población de los Estados Unidos recibe una adecuada educación vial, que goza de una infraestructura vial moderna, y que está en condiciones de acceder a vehículos nuevos y en adecuado estado de conservación, **no es de esperar grandes avances en la reducción de la tasa de accidentes por kilómetro recorrido en el futuro**¹⁰. En definitiva, el sistema parece haber llegado a un estado en donde los aspectos a mejorar son realmente pocos, y en consecuencia parece lógico asociar a la evolución de la tasa de accidentes por kilómetro recorrido una proyección logarítmica en lugar de una lineal. Bajo esta consideración, el gráfico que indica la tendencia de dicha tasa es el siguiente:

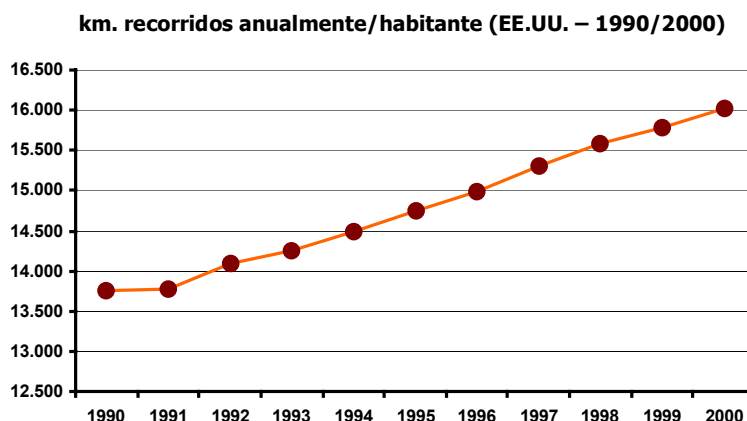
extrapolación logarítmica de la tasa cantidad de accidentes/km. recorrido (EE.UU.)
[en accidentes cada 100 millones de kilómetros recorridos]



En este caso el coeficiente de correlación toma un valor más adecuado, aunque otras proyecciones (exponencial, entre otras) también presentan valores aceptables. El gran problema es que, al mismo tiempo que la cantidad de accidentes por kilómetro recorrido disminuye, aumenta la cantidad de kilómetros recorridos. Siempre tomando el caso de los Estados Unidos, en 1990 tenía una población de 249 millones de habitantes, y 184 millones de vehículos registrados (1,35 personas por vehículo). Para el año 2000, la población era de 275 millones de habitantes y los vehículos eran 217 millones (1,26 personas por vehículo). En 1990 se recorrieron 3,4 billones (3.400.000.000.000) de kilómetros contra 4,4 billones de kilómetros en el año 2000, de donde se puede deducir un aumento significativo de la cantidad de kilómetros recorridos en promedio por cada habitante de los Estados Unidos, cuya evolución, además, se puede observar en el siguiente gráfico:

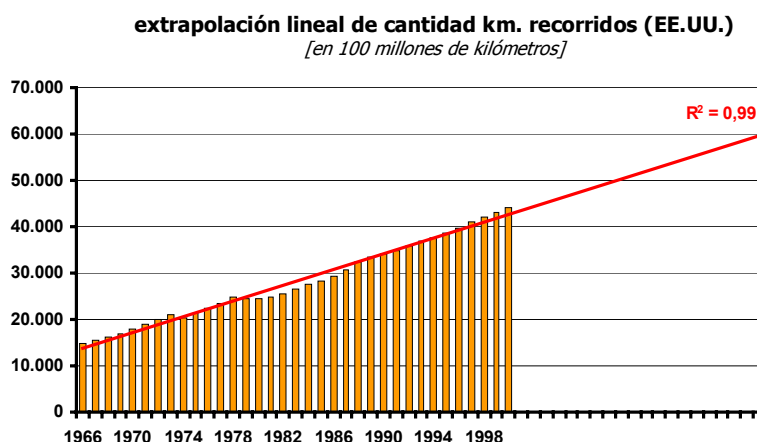
¹⁰ Distinta es la situación en los países en desarrollo, donde sí se puede esperar mejoras sustanciales en los tres aspectos principales nombrados anteriormente (educación, infraestructura vial y vehículos) que redundarían en un descenso importante de la cantidad de accidentes, pero luego de logrado esto, el escenario se convertiría en el aquí analizado.

gráfico 2.8



Esto último también puede interpretarse como que cada vehículo pasó de recorrer 18.500 km./año en 1990 a 20.300 km./año en el 2000. Es decir, que Estados Unidos enfrenta un fenómeno varias veces multiplicador. **Cada año hay más habitantes, cada año hay más vehículos por habitante, y cada año los vehículos recorren más kilómetros**¹¹. Además, las estadísticas de la NHTSA presentan la posibilidad de analizar una serie más larga de años para proyectar la cantidad de kilómetros recorridos en los próximos años, que muestra una tendencia a todas vistas lineal, como se desprende de este gráfico:

gráfico 2.9



Así se puede observar con toda claridad, y tal como lo indica el coeficiente de correlación cercano a uno, que la cantidad de kilómetros recorridos aumenta linealmente. Lamentablemente esto plantea una situación complicada, ya que si la tendencia de la tasa de accidentes por kilómetro recorrido tiene una pendiente menor que la de los kilómetros recorridos **se puede esperar un aumento de la cantidad total de acci-**

¹¹ No parece ser conveniente profundizar demasiado en este aspecto, pero se puede reflexionar que es de esperar una tendencia creciente del transporte en general en todo el mundo. Además, hay que tener en cuenta que los países en vías de desarrollo tienen las tasas más bajas de cantidad de vehículos por habitante, lo que implica un crecimiento potencial del grado de acceso a los automóviles en el corto plazo. En el mismo sentido la incorporación de los países del antiguo bloque soviético a la Comunidad Económica Europea hace prever un rápido aumento de la calidad de vida de estas regiones. Si a esto se le suma el crecimiento de la economía China (con una población que rápidamente se acerca los mil quinientos millones) y la posible consolidación de un bloque de comercio Panamericano, se está frente a un potencial de crecimiento enorme de la cantidad de automóviles y de los kilómetros que se recorren con ellos en todo el mundo. También se debe considerar que los cambios que se deben operar en las estructuras viales y en la educación de los automovilistas tienden a producirse de manera más lenta que los cambios en la cantidad de automóviles. Esto hace esperar un escenario cada vez más complicado, donde aparentemente la cantidad de víctimas de accidentes de tránsito debería ser cada vez mayor, coincidiendo con el criterio de la Universidad de Harvard en su informe acerca de la evolución de las causas de muerte en el mundo.

dentes. De los últimos gráficos analizados se puede estimar que la cantidad de accidentes del año 2020 será de aproximadamente siete millones y medio, lo que resulta mucho mayor a los seis millones actuales. De todas maneras, sea cual fuere la evolución real, tanto en el caso que se deduce de la proyección desde 1988 –una cantidad constante de seis millones de accidentes anuales– como en el caso que recién se analizó –una cantidad en paulatino aumento de la cantidad de accidentes anuales– lo cierto es que **no es de esperar, en absoluto, que la cantidad de accidentes disminuya en los Estados Unidos (y algo similar se puede deducir para el resto del mundo).**

2.4. Responsabilidad del automóvil en la seguridad vial

Muchas veces es más fácil determinar la causa de un conflicto que su responsable. Se puede tomar como ejemplo el caso de un joven que muere luego de impactar con su auto a 130 km/h contra un poste al costado de una ruta. La **causa** probable de esa muerte bien podría ser la excesiva velocidad a la que chocó. Pero por otro lado la identificación del **responsable** del deceso es una cuestión mucho más difícil de discernir. En general muchos tienden a pensar que el culpable es el conductor que –irresponsablemente– circulaba a esa velocidad; aunque analizando cuidadosamente la situación se pueden detallar las siguientes responsabilidades que le caben a cada uno de los tres protagonistas de la seguridad vial:

- a) **Estado:** es responsable de la muerte del conductor por permitir que un automóvil circule a altas velocidades sin instrumentar las medidas para que los ocupantes puedan sobrevivir a los impactos se generan. Estas medidas incluyen, entre otras, tanto la autorización de circulación de un vehículo potencialmente peligroso, como la incapacidad de generar una infraestructura vial exenta de obstáculos potencialmente dañinos.
- b) **conductor:** es responsable de su propia muerte por cometer el error de manejo que derivó en el impacto. No puede considerarse culpable de circular a altas velocidades, ya que el choque del ejemplo ocurrió a 130 km/h, es decir, a una velocidad permitida por la ley.
- c) **automóvil:** es responsable de la muerte del conductor por ser incapaz de proteger a sus ocupantes en caso de impacto, no sólo a las altas velocidades que es capaz de desarrollar, sino también a las mucho menores velocidades autorizadas por la ley.

De esto se puede deducir que **el conductor no es el único responsable de su muerte**. Sin embargo, muchos de los expertos se empeñan en concentrar sus esfuerzos en modificar la conducta de los automovilistas, relegando a un segundo plano la responsabilidad del Estado y del automóvil. Como ejemplo de este fenómeno se puede considerar el análisis de las áreas clave de la seguridad vial que se realizó en Suecia, es decir, la opinión calificada de los expertos en cuanto a las medidas que se deben tomar para disminuir la cantidad de víctimas por accidentes de tránsito.

Áreas clave de la seguridad vial

Hacia fines de la década de los '90 el gobierno sueco diseñó un programa vial de mediano y largo plazo denominado "Zero killed in traffic"¹², cuyo objetivo era reducir drásticamente la cantidad de víctimas por accidentes de tránsito. El órgano encargado de establecer las prioridades fue la NSRA¹³ quien comenzó por analizar las áreas más problemáticas de la seguridad vial. Como complemento de ese estudio se decidió convocar a un grupo selecto de expertos mundiales para comparar sus criterios con los del programa en desarrollo. La lista de áreas clave elaborada por el gobierno sueco contemplaba dieciocho conflictos, que fueron ampliados a más de treinta, incluyendo nuevos aspectos de la seguridad que las autoridades de la NSRA no habían previsto¹⁴.

¹² Ninguna muerte en el tránsito.

¹³ National Swedish Road Administration.

¹⁴ El hecho que muchos conductores no respetan las leyes, por ejemplo.

Luego se pidió a esos mismos expertos que indicaran la importancia relativa de cada área conflictiva de manera de establecer un ranking, y así poder analizar nuevamente las medidas de mediano y largo plazo del programa. En la siguiente tabla se observan los resultados elaborados, en donde se indican las áreas más importantes (10):

tabla 2.7

ranking	área de conflicto para la seguridad vial (según expertos y NSRA)
1	excesivas velocidades de circulación (mayores a las permitidas por la ley).
2	presencia de conductores muy adultos (en general poco hábiles). presencia de conductores jóvenes (en general imprudentes).
4	presencia y falta de protección de ciclistas.
5	presencia y falta de protección de peatones.
6	falta de respeto de las leyes.
7	peligros asociados a las áreas urbanas (cruces, peatones, etc.).
8	presencia y falta de protección de motociclistas.
9	abuso de consumo de alcohol o drogas (legales e ilegales).
10	falta de consideración al prójimo.
~	
18	los vehículos no están diseñados para prevenir daños.
~	
21	baja tasa de utilización de los dispositivos de seguridad instalados.
~	

De aquí surge que, de acuerdo a la opinión de los expertos, seis de los diez principales conflictos que impactan en la seguridad vial son consecuencia de las actitudes de los conductores (las áreas de conflicto señaladas en color azul en la tabla). Pero esto sin dudas contrasta con las estadísticas de la sección anterior. Se debe recordar que en Estados Unidos se produce un accidente vial cada 650.000 km., y que si se concluyera que el 100% de esos accidentes son responsabilidad de errores e imprudencias de origen humano, esto implicaría que un conductor promedio, que recorre una media de algo más de 15.000 km. al año, sufre un accidente cada cuarenta años. Repitiendo el mismo razonamiento un automovilista viaja, en promedio, durante ciento ocho millones de kilómetros antes de producir un accidente fatal. O sea, que para cometer un error que desemboque en un choque con heridas fatales, un conductor debería recorrer 15.000 km. anuales durante 7.200 años. En el mismo sentido se expresa un informe de BMW, donde se indica que solamente una de cada dos millones de decisiones que toma el ser humano al conducir genera algún daño al vehículo. Y una de cada 1.200 millones de decisiones genera una fatalidad (9). En consecuencia, teniendo en cuenta las estadísticas de la NHTSA y el informe de BMW, resulta que **el ser humano es mucho menos falible de lo que parece**. Y en vista de esto, no solamente resulta ingenuo indicar que la mayoría de los conductores son imprudentes y torpes, sino que **no parece sensato esperar un comportamiento mucho más eficaz que el actual de parte de los conductores**¹⁵. Además es posible, por otro lado, que esta obsesión por culpar a los automovilistas de la tragedia de los accidentes de tránsito pueda generar que se evite pensar en las posibles mejoras al medio (de parte del Estado) o al automóvil. A tal punto que, por ejemplo, sólo dos de los expertos consultados por el gobierno sueco consideraron pertinente la mención de que los vehículos no están diseñados para prevenir daños, llevando esta problemática a ocupar la prioridad diecio-

¹⁵ Es probable que en muchos países en vías de desarrollo las campañas de educación, en combinación con otras acciones sociales, generen un comportamiento más prudente de parte de los conductores (se debe recordar que el 80% de las víctimas de accidentes de tránsito corresponde a habitantes de países en vías de desarrollo).

cho. En términos de lo que significa solucionar las diecisiete primeras (en cuanto a tiempo y esfuerzo), **asignar una prioridad tan baja a desarrollar un nuevo tipo de automóvil más seguro es casi lo mismo que no tener este aspecto de la seguridad vial en consideración.** Además, casi todas las áreas de conflicto mencionadas en los primeros puestos del ranking tienen que ver con factores que generan un accidente. De las diez primeras, sólo la número uno –y de manera ambigua– hace mención de la posibilidad de que las altas velocidades de circulación incidan negativamente en el resultado del accidente. Es que lo cierto es que **los factores atribuibles a la generación de los accidentes son sustancialmente distintos a las que influyen en la gravedad de sus consecuencias.** Y entonces parece lógico analizarlos por separado, tomando como base los factores del informe elaborado a partir de la opinión de los expertos convocados por el gobierno sueco, y agrupando los elementos compatibles para simplificar el estudio. Por ejemplo, los conceptos de la lista sueca “falta de respeto de las leyes”, “abuso de consumo de alcohol o drogas” y “falta de consideración al prójimo” se pueden considerar como “imprudencias” del conductor. Extendiendo el mismo criterio al resto de los factores (y con la premisa de separarlos de acuerdo a su tipo de influencia) la lista elaborada es la siguiente:

a) factores que influyen en la **generación** del accidente:

- *imprudencias y errores al frente del volante.*
- *excesiva velocidad de circulación.*
- *distintos vehículos, velocidades de circulación y estilos de manejo.*
- *presencia de peatones, ciclistas y motociclistas.*
- *presencia de obstáculos peligrosos.*

b) factores que influyen en la **gravedad** del accidente:

- *excesiva energía de movimiento previa al accidente¹⁶.*
- *protección insuficiente durante el accidente.*
- *atención médica insuficiente luego del accidente.*

En función de esto es que es muy útil analizar la responsabilidad que le cabe al automóvil en la generación y en el resultado de un accidente de tránsito.

Responsabilidad del automóvil en la disminución de la cantidad de los accidentes

En lo que respecta al primer factor de la lista (imprudencias y errores al frente del volante) se puede decir que a lo largo de los más de cien años de evolución los sistemas de información y control del vehículo han llevado a los vehículos modernos a un estado cercano a la perfección, es decir que casi no se producen accidentes como consecuencia de errores del vehículo –salvo contadas excepciones–, y que inclusive muchas veces el auto contribuye a evitarlos a través de acciones correctivas en el momento en que el conductor hubiera perdido el control (sistemas de freno antibloqueantes, gestión de tracción, etc.). Sin embargo, no hay que dejar de tener en cuenta un aspecto negativo de la excelencia de los automóviles modernos. Un estudio realizado en 1998 en Noruega (11) determinó que a pesar de contar con un parque automotor relativamente viejo (en comparación con otros países europeos igualmente desarrollados) se produ-

¹⁶ La energía de movimiento (energía cinética) depende de la masa y la velocidad de los objetos que colisionan (ver en los anexos la sección “Análisis de conceptos físicos relacionados”).

cían muchos más accidentes que involucraban autos nuevos que los que involucraban autos viejos. Los autores atribuyen este fenómeno a que los conductores adaptan su comportamiento de manejo a las características del automóvil. Los autos más viejos son conducidos con más cuidado, y los nuevos dan una falsa sensación de seguridad que impulsa a su conductor a viajar más rápido. Los vehículos más viejos no tienen una buena estabilidad en las curvas, hacen ruido y vibran inclusive a bajas velocidades, lo que también influye para que el conductor sea más cuidadoso. A lo que se suma el hecho de que los dueños de autos más viejos en general no hacen viajes en situaciones potencialmente peligrosas (niebla, lluvia, nieve, etc.). O sea, que si bien el automóvil no es responsable directo del error o de la imprudencia, sí lo es de manera indirecta, lo cual resulta en un aspecto a tener en consideración, especialmente en un momento en que los vehículos se diseñan con velocidad y potencia crecientes.

Pasando al segundo punto (excesiva velocidad de circulación), los automóviles modernos están diseñados de manera de ofrecer una conducción segura a 130 km/h, e inclusive a velocidades mayores. Es decir que, por lo menos en condiciones de circulación legales, el automóvil no puede ser considerado como uno de los factores que contribuyen al aumento de la cantidad de accidentes. Pero lo que es cierto es que muchos vehículos permiten viajar a velocidades demasiado altas, y que muchos conductores prefieren circular rápidamente, incluso superando por mucho los límites que imponen la ley. Algunos argumentan inclusive que es más seguro circular a altas velocidades, porque se goza de las siguientes ventajas:

- se tarda menos tiempo en llegar al destino (reduciendo el riesgo de sufrir un accidente porque se está menos tiempo expuesto al tránsito).
- se tarda menos en las maniobras de sobrepaso.
- se logra un mayor nivel de concentración circulando a altas velocidades que a bajas velocidades, donde el cansancio y el aburrimiento muchas veces inducen a errores.

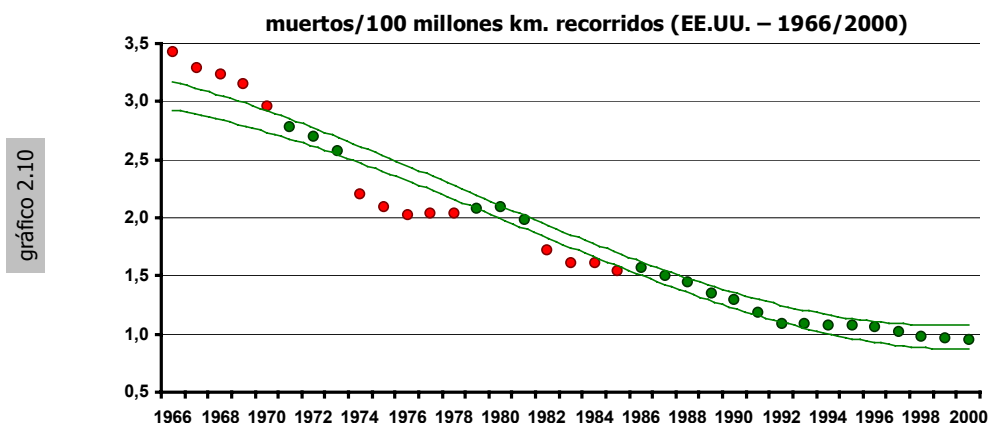
A lo que se suma un elemento muy peligroso. Los seres humanos **tienen una seria fascinación por la velocidad**. En palabras de Aldous Huxley, la velocidad parece ser "el único placer auténticamente moderno"¹⁷. Por lo tanto, teniendo en cuenta esta necesidad de parte de muchos conductores, los automóviles ofrecen la posibilidad de circular a velocidades casi tres veces superiores al límite establecido por ley. El problema

¹⁷ "La ciencia del siglo XIX descubrió la técnica del descubrimiento, y nuestra era es, por consiguiente, la de los inventos. Sí la era de los inventos. Nunca nos cansamos de proclamarlo. La era de los inventos... y sin embargo nadie ha conseguido inventar un nuevo placer. [...] Recuerdo que la idea se me ocurrió en una triste noche de invierno cuando [...] comprendí repentinamente que, por lo que a placeres concierne no estamos en mejores condiciones que los romanos o los egipcios. Desde el punto de vista de los placeres humanos, Galileo y Newton, Faraday y Clerk Maxwell han vivido en vano. Los grandes consorcios que controlan las industrias modernas del placer no pueden ofrecernos nada esencialmente distinto a las diversiones que los cónsules brindaban a los plebeyos romanos o que los alcahuetes de Trimalción montaban para los ricos aburridos y decadentes en la Era de Nerón. Y esto es cierto a pesar de los cines, las películas sonoras, el gramófono, las radios y todos los elementos similares destinados al entretenimiento de la humanidad. [...] Ya que lo moderno de los artillugios no significa que los entretenimientos que éstos reproducen y propalan también habrán de serlo. No lo son. Lo único que consiguen estos nuevos medios es hacer accesibles a un público más numeroso los dramas, las pantomimas y la música que desde tiempos inmemoriales han distraído los ocios de la humanidad. Por lo que veo, el único nuevo placer posible sería el derivado de la invención de una nueva droga, de un sucedáneo del alcohol y la cocaína, más eficaz y menos dañino. [...] Si pudiéramos aspirar o ingerir algo que aboliera diariamente nuestra soledad individual durante cinco o seis horas, algo que nos reconciliara con nuestros semejantes en una ardiente exaltación de afecto y que hiciera que la vida nos pareciera no sólo digna de ser vivida en todos sus aspectos, sino divinamente bella y trascendente, y si esta droga celestial, transfiguradora del mundo, fuera de naturaleza tal que a la mañana siguiente pudiéramos despertarnos con la cabeza despejada y el organismo indemne... entonces, creo, todos nuestros problemas (y no sólo el problema minúsculo de descubrir un placer novedoso) quedarían totalmente resueltos y la Tierra se convertiría en un paraíso. Y lo más parecido a esta nueva droga –¡y qué inmensamente lejos está del embriagante ideal!– es la droga de la velocidad. La velocidad, me parece, suministra el único placer auténticamente moderno" (12).

es que pocos automovilistas son capaces de controlar adecuadamente un automóvil que circula a altas velocidades, donde cualquier error o distracción puede hacer que se pierda el control del vehículo, terminando en un accidente. En otras palabras, a velocidades legales de circulación los vehículos modernos no pueden considerarse responsables de la generación de un accidente, pero el hecho que permitan al conductor desarrollar altas velocidades los hace partícipes de este grave fenómeno. Por último, en el caso de los tres últimos factores que conducen a un accidente (distintos vehículos, velocidades de circulación y estilos de manejo; presencia de peatones, ciclistas y motociclistas; presencia de obstáculos peligrosos) **el automóvil tiene apenas una responsabilidad parcial, y un muy buen desempeño**. Para el primero de estos tres elementos que generan accidentes la responsabilidad mayor corresponde al Estado, que no ha logrado hasta el momento dictar una serie de normas que permitan aumentar la sinergia de los diseños de los vehículos, de manera que, por ejemplo, las alturas de los paragolpes de todos los vehículos en circulación sean compatibles. Al mismo tiempo permite la circulación de automóviles, camiones y motocicletas en los mismos caminos, exponiendo a los ocupantes de cada tipo de vehículo a encontrarse en situaciones que pueden derivar en un accidente, por ejemplo debido a las distintas velocidades de circulación. Y también autoriza a jóvenes y ancianos a conducir cualquier clase de vehículo, otra causa probable de accidente, en función de los disímiles comportamientos. Pasando al segundo elemento, todo indica que el automóvil otorga una adecuada visibilidad al conductor de manera que rara vez este último no es capaz de percibir el peligro que representan los peatones que cruzan en la mitad de la calle (en lugar de hacerlo donde corresponde) o a los motociclistas que conducen peligrosamente zigzagueando entre el tráfico. Es decir, que si ocurre algún accidente de tránsito que involucre peatones, ciclistas o motociclistas, seguramente se trata de una imprudencia o error del conductor (o de los primeros) y no del automóvil. De igual manera, y a pesar de que de un cierto porcentaje de muertes ocurren al chocar el vehículo contra objetos fijos, el desempeño del automóvil en este caso es excelente, ya que no hay ningún elemento que impida la visibilidad de todos los objetos del camino, inclusive de noche.

Responsabilidad del automóvil en la disminución de la gravedad de los accidentes

El primero de los aspectos que influyen en el resultado del accidente es la cantidad de energía cinética involucrada en el accidente. Esto significa básicamente que a mayor velocidad de impacto, mayor cantidad de heridos y muertos, algo que resulta lógico, que se puede entender de manera intuitiva, y que se puede comprobar a través del siguiente ejemplo. En el próximo gráfico se considera la evolución de la tasa de muertos por kilómetro recorrido en los Estados Unidos para las últimas décadas (7):



Del gráfico se puede deducir que la tasa ha tenido una evolución descendente, con una menor pendiente en los últimos años –aspecto que coincide con lo expresado en la sección anterior, en cuanto a que la reducción de la cantidad de muertes por kilómetro recorrido presenta una tendencia logarítmica–. Además se pueden agregar a la serie una estimación de los valores probables para señalar los puntos anómalos (nivel de confianza 95%). Estos puntos, marcados en rojo, corresponden a valores que desde el punto de vista estadístico están influidos por factores distintos a los del resto de los pares de puntos. En particular es interesante analizar los puntos que quedaron por debajo de la curva que pertenecen al período 1974-1978. Es importante repetir que, estadísticamente hablando, se puede probar que en esos años existieron circunstancias distintas que provocaron ese resultado. Y de hecho esa época coincidió con la crisis mundial de petróleo que disparó sus precios, reduciendo considerablemente su consumo, especialmente en los Estados Unidos. Pero por otro lado los kilómetros recorridos de esos años no bajaron, y mantuvieron la misma tendencia lineal de todo el período analizado¹⁸. Por lo tanto resulta lógico suponer que si se recorrieron la misma cantidad de kilómetros con un consumo inferior es porque los automovilistas lo hicieron **a costa de reducir la velocidad de circulación**. Paralelamente se debe recordar que en ese momento el uso de cinturón de seguridad no era obligatorio y los demás dispositivos de seguridad como el airbag o las estructuras deformables progresivamente se encontraban en fase de desarrollo. Esto conduce a una conclusión importante que indica que **la marcada disminución de la tasa de muertos por kilómetro recorrido de esos años es consecuencia de una circulación a menor velocidad**. Algo similar se puede decir de la situación en la Argentina. En la tabla 2.5 de la sección anterior se indica cantidad de muertos para los últimos años, donde se observa una sensible disminución de esa cantidad en el año 2002, cuando la crisis económica obligó a los conductores a consumir menos nafta, y por ende a circular más despacio. Sin embargo, apenas la situación económica comenzó a revertirse, **los automóviles volvieron a circular a las velocidades habituales, y la cantidad de muertos en Argentina aumentó un 29%**.

Ahora pasando al automóvil y la cuota de responsabilidad que le cabe en el desarrollo de una excesiva energía de movimiento previa al accidente se debe tener en cuenta que la palabra “excesiva” es de tipo relativo. Anticipando un poco los análisis de los próximos capítulo, todo indica que sólo algunos vehículos modernos son capaces de proteger adecuadamente a sus ocupantes en accidentes de hasta 64 km/h contra un objeto fijo¹⁹. Es decir, que si un automóvil choca a 130 km/h contra un poste, lo hace a una velocidad “excesiva”. Al mismo tiempo, sin embargo, el mismo vehículo –y también la ley– permite desarrollar esa velocidad “excesiva”. Por lo tanto, el automóvil es el responsable del desarrollo de una energía de movimiento de una magnitud peligrosa. Para ser sinceros, si los vehículos modernos se ensayan a una velocidad máxima de 64 km/h, cualquier impacto a una velocidad por encima de ese valor puede tener consecuencias no previstas, y **entonces la velocidad máxima de circulación debería estar limitada a ese valor**. Lo cual tiene una estrecha relación con el segundo de los aspectos que influyen en la gravedad de un accidente de tránsito. Porque la protección “insuficiente” también es consecuencia de la velocidad y condiciones del impacto. Así, se puede decir que **los automóviles ofrecen una protección adecuada sólo en el caso de impactos contra objetos fijos de hasta 64 km/h**. En otros tipos de impactos (por ejemplo contra otros vehículos, o a velocidades mayores a los 64 km/h) **la protección ofrecida por los automóviles modernos puede considerarse insu-**

¹⁸ Ver gráfico 2.9 en la sección anterior de este mismo capítulo.

¹⁹ Los vehículos que pueden proteger adecuadamente a los ocupantes en impactos contra objetos fijos son aquellos que obtienen la calificación máxima que otorgan los programas de ensayos de vehículos (cinco estrellas por ejemplo en el caso del EuroNCAP).

ciente. Para terminar esta breve recorrida por los aspectos relacionados con la gravedad de un accidente de tránsito, una vez más se debe recurrir al término “relativo”. Es que la responsabilidad que le cabe al automóvil en lo que hace a la posibilidad de que sus ocupantes reciban una rápida atención médica se relaciona con la energía de movimiento del impacto. Para choques de hasta 64 km/h, los automóviles modernos ofrecen la seguridad de que se abran las puertas, pero **a velocidades mayores ese aspecto se convierte en una incógnita**, y es frecuente observar vehículos que han sufrido tamaña deformación que para rescatar a los ocupantes es preciso recurrir a cortar partes de la carrocería, perdiendo en la operación un tiempo muy valioso.

2.5. Conclusión del capítulo

Todo indica que los accidentes de tránsito generan una catástrofe de serias implicancias económicas y sociales que crecerá en gravedad en los próximos años. No sólo porque en la actualidad generan cerca de un millón de muertes por año, sino porque existen estimaciones que dicen que en menos de veinte años serán la tercera causa de muerte en todo el mundo (y por lejos el principal origen de muertes traumáticas). A esto debe sumarse el hecho que hay una mayor cantidad de muertos en los países en vías de desarrollo, donde se espera que en los próximos años el acceso al transporte individual aumente como consecuencia del incremento de su calidad de vida, potenciando seguramente el problema.

En este contexto, la sociedad sufre un impacto social y económico incalculable, con pérdidas materiales enormes, que justifican grandes inversiones en la mejora de la seguridad vial. Los accidentes de tránsito generan en la actualidad un costo anual que oscila entre el 2% y un 3% del Producto Bruto Interno de cada país. La valuación de las pérdidas varía mucho de acuerdo a las distintas teorías esgrimidas por los expertos, pero muchos coinciden en que gran parte de ese costo corresponde a las pérdidas de capacidad producción y consumo, tanto de los muertos como de los heridos. En el ámbito social, las muertes traumáticas siempre generan un profundo y duradero trastorno en los seres queridos de las víctimas. Esto además se agrava, debido a que los accidentes de tránsito afectan especialmente a los jóvenes, mucho más expuestos que el resto de la población, despojando a la comunidad de los encargados de forjar el futuro.

Y, como es de esperar que la cantidad absoluta de accidentes en el mundo siga aumentando, si se pretende disminuir la cantidad total de víctimas del automóvil –además de intensificar las campañas de prevención de accidentes– se debe hacer un serio esfuerzo por disminuir la gravedad de los impactos. La mayoría de las campañas de seguridad vial dejan de lado la mejora sustancial de la eficacia de la protección que ofrece un automóvil a sus ocupantes en caso de sufrir un accidente. Pero si se tiene en cuenta que difícilmente la cantidad total de accidentes disminuya, lo cierto es que mientras mejor estén protegidos los ocupantes de los automóviles, menor será la cantidad de víctimas.

Por eso es importante tener en cuenta que el automóvil tiene una alta cuota de responsabilidad en el resultado de un accidente de tránsito, y que de acuerdo a lo que indican los organismos independientes de ensayo, sólo algunos vehículos logran proteger eficientemente a sus ocupantes en impactos contra objetos fijos de hasta 64 km/h. Como se dijo recién, la mayoría de los expertos coinciden en que no es prioritario aumentar la protección ofrecida por los automóviles para disminuir la cantidad de víctimas por accidentes de tránsito, prefiriendo culpar únicamente al conductor de la tragedia. Esto, tal como decía el Administrador Federal de Carreteras de Estados Unidos en 1963, puede hacer que se pierda de vista la necesidad de hacer mejoras eficaces que ayuden a disminuir la gravedad de cada accidente. En ese discurso, ante el Congreso Nacional de Seguridad de ese año las palabras fueron (1):

"Me preocupa la magnitud de energías que se dedican al esfuerzo agresivo por reformar al conductor, por intimidarle o avergonzarle para que se perfeccione. Creo que hemos agotado el valor de este ataque continuo a la naturaleza humana. Y tengo serias dudas de que dé algún resultado. En muchos casos, ¿no hemos echado sobre los hombros del conductor una tarea que está más allá de sus sentidos, nervios y músculos? Creo que a causa

de estos ataques nuestra atención se distrae y nuestra energía se desvía de las cosas esenciales que podríamos estar haciendo para reducir las víctimas en accidentes. Debemos enfrentarnos francamente a la premisa que la mayoría de los conductores se comporta todo lo bien que es razonable esperar en las condiciones existentes. A partir de esa premisa es lógico deducir que las condiciones deben ser modificadas. Debemos mejorar el camino, el vehículo y las medidas básicas de control del sistema”.

Es decir, que el automóvil debe modificarse, ya que el actual no resulta todo lo seguro que debería, en las condiciones actuales de circulación –que incluye velocidades mucho mayores que los 64 km/h a los que se ensayan los vehículos–.

Esto, además, se puede deducir de las estadísticas de los Estados Unidos, que indican que la protección adicional que ofrecen los automóviles modernos no es suficiente para disminuir la gravedad de los accidentes de tránsito. En los últimos diez años, si la correspondiente tasa indica que hay menos muertes por kilómetro recorrido es porque hay menos accidentes por kilómetro recorrido. Esos datos permiten deducir que los dispositivos de seguridad introducidos en los últimos años (especialmente el airbag) no alteran los resultados de un impacto. Dicho de otra manera, todo parecería indicar que los últimos dispositivos de seguridad no brindan una mejor protección, o que la gravedad creciente de los accidentes, como consecuencia de la circulación a mayor velocidad, compensa la mayor protección de los vehículos nuevos.

Para terminar, no parece ser posible que las velocidades de circulación se reduzcan –por el contrario, probablemente aumenten en la mayoría de los países–, por lo tanto resulta de suma utilidad diseñar un automóvil que proteja de manera más eficiente a sus ocupantes. Por eso contrariamente a la opinión de los expertos, y coincidiendo con otras opiniones, es que la intención principal de esta Tesis es modificar la protección que ofrece el automóvil, no en la búsqueda de una menor cantidad de accidentes, sino con el objetivo de que cada impacto sea menos grave.

Reflexión

“La música en el estéreo absurdamente encendido y los celulares que chillaban entre los restos del [Volkswagen] Golf. Y el grito desesperado de Marco Fazi, camionero de Palestrina, arrodillado en el asfalto helado, junto a lo que quedaba del automóvil lleno de jóvenes que se había estrellado unos instantes antes contra su camión” (13).

En general, la reacción de un automovilista frente a la vista de un accidente de tránsito es bajar inmediatamente la velocidad de circulación. Durante esos breves momentos de conciencia excepcionalmente prudente se piensa en lo peligroso que resulta involucrarse en un accidente y que a ciertas velocidades la probabilidad de supervivencia es casi nula. Luego, después de un tiempo, que varía en función de los acompañantes –si se circula junto con la familia será más largo que si se está solo–, se vuelve a la velocidad original y las vacilaciones se alejan. Afortunadamente todo queda atrás, el conductor vuelve a ser indestructible y sabe, de nuevo, que nada va a pasarle. Y tal vez esto no carezca de racionalidad. Porque a pesar del millón de muertes anuales, algunas estadísticas permiten inferir que un conductor sufre en promedio un accidente cada cuarenta años (uno en toda su vida). Y que en ese accidente la probabilidad de resultar muerto es del 0,5%. Al mismo tiempo parece ser que la mayoría de los automovilistas caen en el error de creer que las tragedias le ocurren a los demás, generán-

dose entonces condiciones favorables para un insuficiente respeto a los accidentes. Como el árbol que impide ver el bosque, la baja probabilidad que tiene cada conductor de morir a causa de un accidente de tránsito no permite tomar conciencia de que, como consecuencia de ellos, en el mundo muere una persona cada treinta segundos. En definitiva, la humanidad se enfrenta con un grave problema, pero como en el caso del hambre, las guerras, la mortandad infantil o la miseria, que afectan a millones de personas, quienes tienen el poder de resolver el problema²⁰ no evidencian lograr avances significativos. Puesto en perspectiva mundial, la solución definitiva a los estragos de los accidentes de tránsito no es más que **una assinatura pendiente más**.



Es casi imposible lograr modificar un automóvil que no se diseñó pensando primero en la seguridad al punto de que ofrezca una protección eficaz a sus ocupantes en un accidente real. Es preferible partir de la suposición de que debe ser seguro, para luego adaptar los aspectos necesarios para que se convierta en un vehículo capaz de ser producido y comercializado.

²⁰ En el caso de este estudio, desde los mismos automovilistas hasta los diseñadores de automóviles, pasando por los que dictan las leyes de tránsito.

2.6. Referencias del capítulo

- 1) *Peligroso a cualquier velocidad*. Nader R. (Editorial Jorge Alvarez – 1966)
- 2) *Accident costing using value transfers*. Juha Tervonen (VTT – Technical Research Center of Finland – 1999)
- 3) *The economic impact of motor vehicle crashes 2000*. (National Highway Traffic Safety Administration – U.S. Department of Transportation – 2002)
- 4) *Segundo reporte regional Mercosur de siniestralidad vial*. (Instituto de Seguridad y Educación Vial – 2/2003)
- 5) *Diario Corriere della Sera*. (23/01/2003)
- 6) *World Report on road traffic injury prevention*. World Health Organization, World Bank (2004)
- 7) *Traffic safety facts 2000*. (National Highway Traffic Safety Administration – U.S. Department of Transportation – 2002)
- 8) *The global burden of disease: a comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries and risk factors in 1990 to 2020*. (Harvard University Press)
- 9) *Traffic and safety: harmony, not conflict*. (BMW Group – 5/2001)
- 1) *Key areas of traffic safety work according to European experts*. Gärder P. (Nordic Road & Transport Research: 2 – 1998)
- 11) *Car age and the risk of accidents*. Fosser S., Christensen P. (Nordic Road & Transport Research: 2 – 1998)
- 12) *Se busca un nuevo placer, en Moksha*. Huxley A. (Editorial Sudamericana – 1983)
- 13) *Diario Corriere della Sera*. (2/02/2003)



3. Evolución del automóvil

"Muchas aventuras habían sufrido nuestros seis aventureros, pero ninguna les había asombrado tanto como esta aventura confortable. Se habían habituado a las cosas ásperas y tan súbita suavidad los desconcertaba. No tenían la menor idea de lo que podrían ser aquellos carruajes. Les bastaba saber que eran carruajes y que tenían almohadones."

Gilbert K. Chesterton, *El hombre que fue jueves* (1922).

-
- **Primeros vehículos**
 - **Satisfacción de las necesidades básicas**
 - **Satisfacción de las otras necesidades**

3.1. Introducción y resumen del capítulo

Existe una razón por la cual los automóviles modernos son capaces de proteger a los ocupantes eficazmente sólo en impactos contra objetos fijos a velocidades inferiores a los 64 km/h. A lo largo de los próximos capítulos se analizará con mayor detalle la eficacia de dicha protección, pero lo cierto es que es conveniente no anticiparse, y empezar por el comienzo.

Esa razón se debe buscar en su propia historia, repasando brevemente las condiciones que motivaron la configuración actual, y las necesidades que este producto debió satisfacer. Es difícil conjeturar qué es lo que pensaban los ingenieros y diseñadores de fin del siglo XIX. Pero es probable que creyeran que en la actualidad los automóviles serían muy distintos a los de esa época. Tal vez imaginaran automóviles voladores, parecidos a los helicópteros actuales (como los vehículos de "Un mundo feliz" de Huxley), o autos que no necesitaran un conductor humano para llegar al destino deseado. Lo cierto es que el diseño de los automóviles modernos no es tan diferente del que ellos fabricaban, y su parentesco con los primeros prototipos no es casual, tal como se puede deducir de la evolución que ha sufrido en su larga historia que transformó para siempre el mundo.



Las autopistas son un excelente ejemplo del poder transformador que ejerció el automóvil sobre el mundo moderno.

Resumen del capítulo

La consolidación de los **primeros vehículos** fue consecuencia:

- de la maduración de diversas tecnologías que se utilizaban fundamentalmente en la industria en general.
- de un nuevo método de fabricación, que permitió su producción en serie y un espectacular crecimiento de las ventas de automóviles en los Estados Unidos.

- del desarrollo vertiginoso de una multitud de nuevas tecnologías y dispositivos específicamente diseñados para el automóvil, que hizo que para la primera mitad del siglo pasado todo lo que se utiliza en los vehículos modernos –salvo la electrónica– estuviera inventado.

La **satisfacción de las necesidades básicas** –que demandaban los automovilistas– se alcanzó rápidamente, principalmente:

- la potencia necesaria para generar el movimiento.
- los dispositivos que permitían mover y controlar el vehículo.
- un tipo de estructura lo suficientemente resistente como para transportar a los ocupantes.
- el aseguramiento de una adecuada confiabilidad y un gasto de operación contenido.

Pero es probable que el éxito del automóvil se haya basado en la **satisfacción de las otras necesidades**:

- el confort y el lujo de los primeros vehículos no fueron difíciles de satisfacer ya que se trataba de los mismos diseños de quienes hasta poco tiempo atrás se dedicaban a fabricar carruajes.
- la velocidad y potencia se lograron con las nuevas plantas motrices y sistemas de tracción diseñados específicamente para los automóviles.
- los gustos personales fueron satisfechos de acuerdo a las necesidades de cada segmento de la población, principalmente en lo que hace a la apariencia exterior del vehículo.
- en definitiva, además de transportar a sus ocupantes, el automóvil logró rápidamente lo que ningún otro objeto creado por el hombre pudo hacer: darle al hombre una inigualable sensación de libertad, individualidad y prosperidad.

3.2. Primeros vehículos

La historia de los vehículos utilizados como medio de transporte comienza con la invención de la rueda, hace unos cuatro mil años en la India. Durante el Imperio Romano una red de carreteras ordenada y eficaz permitía la circulación de personas y mercaderías por casi toda Europa. Pero el colapso del Imperio dejó aisladas durante casi mil quinientos años a las poblaciones, encerradas en sí mismas, luchando por proveerse de lo mínimo indispensable para sobrevivir. Recién con la Industrialización y el advenimiento del ferrocarril se logró poner en comunicación a las poblaciones de manera que la movilización de los seres humanos y de los bienes resultara barata y segura. Pero faltaba un paso más todavía para la concreción del sueño de muchos inventores del pasado: la posibilidad de viajar a voluntad en un vehículo autopropulsado.

Los pioneros del automóvil moderno

En 1769 un oficial francés llamado Nicolás Cugnot construyó un prototipo que consistía en un vehículo impulsado mediante un motor de vapor, que es reconocido como el primer automóvil. Muchos elementos atentaron contra el éxito del producto (el peso excesivo, la escasa maniobrabilidad, el complicado mantenimiento) y el invento no pasó de ser una curiosidad más. Pasaron más de cien años, hasta que el invento en 1876 por parte del ingeniero alemán Nikolas August Otto del motor de combustión interna de cuatro tiempos cambió por completo el panorama. Bastaba ahora con utilizar un conjunto relativamente pequeño, consistente en un motor y un depósito de combustible, para movilizar un vehículo no muy grande. Las ventajas del motor de combustión interna con respecto a las grandes calderas y depósitos de agua de los motores a vapor eran innegables en el momento de pensar en reemplazar al caballo como generador del movimiento de los carruajes.

Así, por el año 1885 Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach construyeron un primer prototipo que consistía en una simple motocicleta fabricada a partir de la instalación de un motor monocilíndrico de combustión interna en una bicicleta reformada. Un año más tarde, Karl Benz agregó una rueda más y una caja de cambios para construir lo que la mayoría de los historiadores reconocen como el primer automóvil moderno.

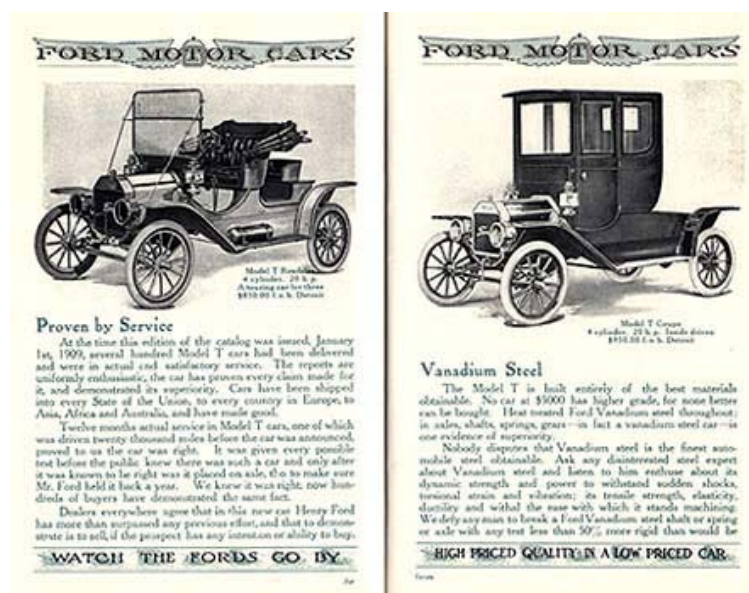


Una réplica moderna del primer automóvil construido por Benz.

Los años siguientes sirvieron a la consolidación y al vertiginoso desarrollo de tecnologías ligadas al automóvil. El progreso de la metalurgia, el desarrollo de las naftas livianas y los avances en la comprensión de los mecanismos termodinámicos demostrados años antes por Carnot permitieron que miles de inventores desarrollaran nuevos vehículos, motores y mecanismos. El motor se hizo más potente y liviano, se pudo obtener más energía del combustible y los metales reemplazaron paulatinamente a la madera para hacer estructuras más compactas y resistentes. El hombre se encontraba en las cercanías de un nuevo mundo. Sólo faltaba que alguien encendiera la mecha.

La revolución

Fue un ex empleado de la compañía de Thomas Alba Edison quien imaginó que había un enorme potencial en el automóvil. Él vio que el objeto que hasta el momento estaba destinado solamente a las clases acomodadas podía convertirse —mediante un diseño espartano y funcional pensado para la gente común— en un rápido éxito comercial. Ese hombre fue Henry Ford, quien tomó prestado el método de producción en línea de los frigoríficos y lo combinó con un diseño magistral, iniciando una de las mayores revoluciones industriales, tecnológicas y sociales en la historia del hombre. A partir de ideas simples, de diseños y métodos sencillos, utilizando los elementos que muchos otros tenían a su alcance, el hijo de un granjero de Estados Unidos se convirtió rápidamente en el mayor fabricante de automóviles del mundo. Al terminar la producción del Ford T, su modelo más exitoso, se habían vendido casi 17 millones de vehículos. En 1923 se vendieron sólo en Estados Unidos algo más de 1.800.000 modelos T.



Folleto publicitario de 1909 con dos de las configuraciones ofrecidas para el modelo T de la Ford Motor Cars.

La vertiginosa carrera por fabricar autos de forma masiva que se dio en Estados Unidos provocó que **para el primer cuarto del siglo XX la mayor parte de la tecnología utilizada en los automóviles de hoy en día estuviera inventada**. Excepto por los dispositivos electrónicos, la mayoría de los elementos que pueden parecer desarrollos modernos como la tracción integral, o la caja de cambios automática, ya había sido desarrollada durante los primeros treinta años de vida del automóvil moderno. Mientras tanto el resto del mundo seguía motorizado sólo en pequeñas proporciones. Europa sufrió dos guerras prácticamente consecutivas que devastaron la economía de las grandes potencias. Con el aparato productivo dedicado a alimentar la maquinaria de guerra durante casi la totalidad de la primera mitad del siglo XX, el automóvil fue en el viejo continente siempre un objeto para ricos. Mercedes-Benz, Alfa-Romeo, Bugatti, Rolls-Royce, Isotta-Fraschini, Hispano-Suiza eran marcas sinónimas de lujo y poder. Vehículos para reyes que eran más obras de arte que simples medios de transporte, y que se producían a pedido y en cuantagotas. En tanto que la gran mayoría de

la población seguía sin poder tener un automóvil. En el resto del mundo la situación económica hacía prohibitivo el acceso a los automóviles, salvo para quienes se podían dar el lujo de importarlo desde los Estados Unidos o Europa.

La consolidación

El fin de la Segunda Guerra Mundial cambió todo el panorama. La revolución que se produjo en Estados Unidos en los primeros años del siglo XX se repitió en Europa y en Japón. Pronto sus economías destruidas se reconstruyeron, y el automóvil fue uno de los principales motores de la recuperación. Volkswagen, Fiat, Renault, Peugeot, Honda, Toyota, entre otras fábricas existentes desde los albores del automóvil, concentraron sus esfuerzos en diseñar y producir versiones modernas del Ford T. Vehículos pensados para ser producidos en grandes series y posicionados de manera de llegar a la mayoría de las personas que, en un mundo en paz, podía ahorrar lo suficiente para comprar un pequeño vehículo para trasladarse a sus nuevos lugares de trabajo y para viajar en su creciente tiempo libre. Ahora el mundo entero era testigo del poder transformador del automóvil. Un mundo sometido a los cambios vertiginosos de un fenómeno incontrolable, alimentado por sueños de prosperidad y libertad individual, de los cuales el automóvil era –y es– el más fiel representante.



El Volkswagen "Beetle" es otro ejemplo del éxito que pueden alcanzar las ideas simples.

3.3. Satisfacción de las necesidades básicas

Los grandes desafíos con los que se enfrentaban los ingenieros y diseñadores en los inicios de la era del automóvil tenían que ver con varios aspectos. Por un lado, la solución al problema de generar potencia para mover el vehículo, apelando para esto a un motor liviano de consumo limitado, que necesitara un depósito de combustible lo suficientemente pequeño para mantener el peso del vehículo en un nivel bajo, y que le diera al mismo tiempo una autonomía adecuada para esos tiempos. Por el otro, un sistema mecánico de conversión de la potencia del motor en movimiento, y un control de la dirección y velocidad del vehículo. Además, el vehículo debía poseer un tipo de estructura lo suficientemente resistente como para soportar el peso de los componentes del automóvil, sus ocupantes y la carga que pudieran llevar consigo. Pero a esto se le sumaba la necesidad de que el vehículo asegurara un funcionamiento confiable, sobre todo en épocas en que las distancias entre las zonas pobladas eran mayores y no existían los medios modernos de comunicación ante una emergencia. Finalmente, el gasto de operación, tanto en lo que se refiere al gasto de combustible como al gasto de mantenimiento debían mantenerse en niveles adecuados.

Generación de potencia

La primera persona de quien se tiene conocimiento que pensó en utilizar la potencia de la combustión para movilizar un vehículo fue Herón de Alejandría, 150 años antes de Cristo (1). Posteriormente, los trabajos de Torricelli, Huygens y Watt contribuyeron al desarrollo y consolidación del motor de vapor. Su maduración permitió grandes avances de las tecnologías de lubricación y sellado, y contribuyó también al desarrollo de nuevas aleaciones de metales capaces de resistir altas temperaturas y grandes esfuerzos. El primero en patentar un motor de combustión interna fue Jean Joseph Étienne Lenoir en 1860. Su motor funcionaba con el gas que en ese momento se usaba para iluminar los hogares y su mecanismo era prácticamente el mismo que el de los motores de vapor. Dos años más tarde, Alphonse Beau de Rochas formuló el revolucionario ciclo "aspiración/compresión/combustión/escape" sobre el cual Nikolas Otto se basó para construir sus primeros motores de cuatro tiempos por el año 1876. Se trataba de motores estacionarios, con un régimen de operación de apenas 120 rpm, que fueron rápidamente adoptados por la industria del momento, vendiendo alrededor de 50.000 unidades en los siguientes veinte años. En esos años los visionarios Daimler y Benz pensaron en el uso de los motores de combustión interna para mover pequeños vehículos, aumentando para ello su régimen de funcionamiento. El modelo de Daimler era un motor monocilíndrico de 462 cm³ que desarrollaba 1,1 HP a 750 rpm. El motor de Benz, si bien algo más sofisticado, tenía "apenas" 0,75 HP a 400 rpm, con algo más del doble de capacidad (954 cm³). Paralelamente, mientras que el uso del motor de combustión interna se generalizaba en los primeros automóviles, se desarrollaron motores con otros principios de funcionamiento, de uso común en la industria, como los ya nombrados motores a vapor y los motores eléctricos. Por extraño que parezca, la consolidación del motor de combustión interna como fuente de potencia para los automóviles no ocurrió hasta poco antes de la Segunda Guerra Mundial. Se construyeron automóviles movidos por motores a vapor hasta principios de la década del '30, y los automóviles eléctricos convivieron con los movidos a nafta hasta el final de la misma década. Los motores a vapor tenían la desventaja de tener una alta relación peso/potencia (en comparación con los motores de combustión interna) y los motores eléctricos debían recargarse lentamente antes de poder recorrer apenas ochenta kiló-

metros a velocidades no superiores a los 30 km/h, aunque eran mucho más silenciosos y ofrecían una conducción sin vibraciones, además de ofrecer la ventaja de carecer de la agotadora manivela de arranque.

Y fue precisamente el desarrollo de los dispositivos de arranque automáticos, sumado al aumento del número de cilindros (que generó motores de combustión interna sin sacudidas) lo que provocó la paulatina desaparición de los vehículos a vapor o eléctricos, que no eran ya capaces de competir eficientemente contra uno con motor de combustión interna. Luego de esa desaparición, esta planta motriz se consolidó como la única solución a la necesidad de potencia para mover los automóviles. En el largo camino recorrido las plantas motrices pasaron de los monocilindros iniciales a los monstruosos multicilindros de más de 15.000 cm³ de principios del siglo XX. Con el aumento de la eficacia se logró en pocos años obtener fácilmente entre 50 y 100 caballos de fuerza por litro de capacidad. Pocos años después de la conclusión de la Segunda Guerra Mundial la General Motors, a través de su marca Cadillac, introdujo un nuevo motor V8, que fue el punto de partida de una carrera en la búsqueda de cada vez más potencia.



Un auto eléctrico de 1916, el modelo 60 de la Detroit Electric.



Un Doble E13 de 1924, con motor a vapor, especialmente apreciado por su andar silencioso y estable.

La crisis del petróleo y la suba de precios de los combustibles impulsaron mucho más adelante la búsqueda de un menor consumo y hasta el día de hoy, por diversos motivos que no es pertinente profundizar en este momento, los motores de combustión interna desarrollados hace más de cien años son la única opción válida al momento de considerar la fuente de potencia de los vehículos modernos de grandes series de producción.

Movimiento y control del vehículo

Se debe recordar que los primeros automóviles evolucionaron a partir de vehículos ya existentes: la bicicleta y el carruaje tirado por caballos. Karl Benz construyó un triciclo capaz de llevar a dos personas y conectó el pequeño motor a las dos ruedas de bicicletas traseras mediante dos cadenas, lo suficiente como para poner en movimiento el vehículo y para transmitir 0,75 caballos de fuerza desde el motor a las ruedas sin mayores inconvenientes. Pero el crecimiento de la potencia de las plantas motrices, y la necesidad de aumentar la velocidad, autonomía y maniobrabilidad llevaron a los ingenieros y diseñadores a desarrollar distintos sistemas para entregar esa potencia de manera controlable. También fue necesario desarrollar sistemas de frenos capaces de actuar de manera eficaz ante el crecimiento incesante de la velocidad y el peso de los vehículos. En cuanto al sistema de transmisión, las cadenas se convirtieron

en cardanes, la caja de cambios (usada desde años en la industria en general) evolucionó en función de la potencia del motor hasta llegar a las cuatro o cinco velocidades, y se optó por un sistema de ejes motores para dos de las cuatro ruedas. La solución preponderante consistió entonces en un motor, una caja de cambios, y dos ruedas motrices de cuatro en total. No fue la única solución, y desde temprano muchos automóviles tenían por ejemplo tracción en las cuatro ruedas y un número variable de ruedas (de tres a ocho). La disposición del sistema de tracción que se adoptó como regla general fue un motor situado por delante del eje delantero, alineado según el eje longitudinal del vehículo, con la caja de cambios inmediatamente atrás, y los ejes motores en las ruedas traseras. Esta disposición cambió a medida que los autos se fueron haciendo más pequeños, eficientes desde el punto de vista del consumo y potentes, eligiendo la mejor configuración que se adapta a ocupar el menor espacio (dejando así más lugar libre para los ocupantes) y que permite la mejor maniobrabilidad y control del automóvil: el motor transversal delantero, con la caja de cambios acoplada al motor, y la tracción delantera, con esas ruedas motrices solamente. Sin embargo, según el uso del vehículo existen otras configuraciones con mayores ventajas. En los vehículos deportivos la disposición más eficaz es el motor central (inmediatamente adelante del eje trasero) y la tracción trasera. Los vehículos "todoterreno" necesitan tener tracción en las cuatro ruedas para afrontar los inconvenientes de circular por fuera de los caminos asfaltados. Por otro lado, la tradición lleva a algunos automóviles de alta gama a mantener la tracción trasera y el motor delantero a pesar de las desventajas del fenómeno del sobreviraje en las curvas y de la necesidad de una habilidad mayor para controlar el vehículo de manera segura (que en la actualidad es compensado a través de complejos sistemas electrónicos).

Habiendo solucionado el problema de mover el automóvil todavía faltaba resolver como frenarlo. Los primeros frenos (similares a los utilizados en los carruajes tirados por caballos) evolucionaron hacia los frenos de tambor, operados mecánicamente, e inclusive, a partir de 1920, operados hidráulicamente. Los frenos de discos son un ejemplo de tecnología desarrollada tempranamente que debió esperar pacientemente para convertirse en la opción preponderante. El primer auto en tener frenos a discos fue un Lanchester, en 1903. Pero fue recién en 1949 con la introducción de esos frenos por parte de Chrysler y Jaguar (quien comenzó a usarlos en las carreras automovilísticas) que los frenos de discos, mucho más eficientes y seguros que sus antecesores, comenzaron lentamente a desplazar a los frenos a tambor, que increíblemente se siguen usando hasta el día de hoy. Las ruedas también evolucionaron desde las de bicicleta haciéndose cada vez más anchas, mejorando el confort de circulación, y permitiendo la transmisión de potencia sin deslizamiento y una frenada más efectiva. Se está dejando afuera del análisis varios dispositivos que contribuyen a mover el auto y a mantener su control como por ejemplo los amortiguadores, barras estabilizadoras, diferencial, etc., pero dado que esta sección es sólo un repaso de los temas principales de la evolución del automóvil, no se van a cubrir todos los aspectos del desarrollo de los autos, sino sólo los que interesan a esta Tesis.

Estructura resistente

En el inicio, los automóviles mostraban claramente su ascendencia. Frágiles "tricicletas", "cuatricicletas" y carruajes trancos cuya estructura estaba diseñada para soportar el peso de los ocupantes y de las relativamente débiles plantas motrices. La madera era de uso corriente y los productores de automóviles recurrían, para fabricarlos, a la tecnología de la construcción de carruajes. Pronto se necesitó cambiar de tecnología

para soportar los esfuerzos de los nuevos, más poderosos y pesados motores y, lentamente, el acero comenzó a reemplazar a la madera. Durante los primeros años del automóvil se consolidó el uso de dos largueros de acero longitudinales sobre los cuales eran apoyados: el grupo motor/transmisión, los ejes de las ruedas y, finalmente, la carrocería (muchas veces realizada en madera). Progresivamente, por lo menos hasta la masificación del auto generada por Ford, muchos fabricantes de automóviles concentraron sus esfuerzos en diseñar un chasis y un motor que vendían sin su carrocería. El afortunado propietario elegía luego un carrocerero (a veces un antiguo fabricante de carruajes como Fleetwood y LeBaron) para satisfacer su ansiada fantasía. Sin dudas la característica de objeto accesible sólo a los ricos contribuyó a fortalecer esta tendencia, ya que los pocos propietarios de automóviles deseaban tener un objeto único, exclusivo. Pero la configuración chasis/carrocería planteaba un problema: el peso. Para sostener el peso de todos los componentes había que reforzar la carrocería, lo cual aumentaba el peso y al mismo tiempo penalizaba las prestaciones del auto, llevando a los diseñadores a adicionar potencia a la planta motriz, haciéndola más pesada y alimentando el círculo vicioso. Éste **es otro buen ejemplo de cómo las tradiciones en el mundo del automóvil a veces triunfan sobre la lógica y los nuevos desarrollos tecnológicos**. La carrocería unitaria autoportante, o sea, aquella donde los componentes de la carrocería son soldados entre sí (con ciertas piezas que actúan como soporte estructural), ofrece numerosas ventajas con respecto al conjunto chasis y carrocería. No sólo permite una reducción del peso del vehículo, y una mayor velocidad de ensamblaje y por ende un menor costo de manufactura, sino también es mucho más eficaz al momento de distribuir los esfuerzos y deformaciones en caso de accidente, aumentando la seguridad.

El primer auto con carrocería unitaria autoportante fue el Lancia Lambda de 1922, un auto claramente adelantado a su tiempo en otros aspectos más. Su éxito comercial fue limitado, pero unos años más tarde se lanzó el Citroën Traction-Avant (1934), del cual se vendieron 750.000 unidades y que, además, tenía otra característica inusual para la época (cuyas claras ventajas hacen que sea la opción más común en los vehículos modernos): la tracción delantera.



Un Lancia Lambda de 1922.

Sin embargo, sobre todo en Estados Unidos, pasaron casi cincuenta años desde el primer modelo de Vincenzo Lancia antes de que se comenzara a abandonar la construcción de automóviles con el chasis y carrocería contruidos por separado. Es importante reiterar que, salvo la electrónica, **muchos de los aspectos que en el presente los fabricantes de automóviles promocionan como auténticamente revolucionarios no son otra cosa más que la introducción de modificaciones en soluciones tecnológicas desarrolladas en los principios de la era del automóvil**. Y que el uso o abandono de ciertas tecnologías no siempre responden a la lógica de la ingeniería, y muchas veces lo hacen a las costumbres o a las modas del momento.

Confiabilidad y gastos de operación

En un primer momento los automóviles circulaban por los mismos caminos por donde lo hacían los carruajes a caballo. Y además lo hacían a velocidades reducidas, gene-

rando desgastes a los componentes mecánicos de acuerdo a esa realidad. Al aumentar el peso, la potencia y la velocidad, las solicitudes cambiaron, y los mecanismos se hicieron más complejos. Las distancias recorridas aumentaron geométricamente y los diseñadores debieron solucionar el problema que les planteaban los inconvenientes de una eventual rotura. Al mismo tiempo, las prestaciones crecientes demandaban un alto consumo de combustible, a lo que se le sumaba el costo creciente de mantenimiento de los sistemas mecánicos cada vez más complicados, con lo cual, sobre todo a partir de la masificación del automóvil, se debió pensar en reducir los costos de operación del vehículo. Durante la historia del automóvil se ha prestado particular atención al diseño de los componentes, a los materiales y al peso de los mismos, y a la calidad de armado (sobre lo que los fabricantes japoneses han construido su imperio automovilístico) de manera que un auto moderno es infinitamente más eficaz que los vehículos primitivos no sólo desde el punto de vista del consumo de combustible de aceite y otros insumos, sino también en lo que hace a su confiabilidad y duración. Como contrapartida de la confiabilidad creciente, si hace unos años atrás un automovilista sufría un desperfecto podía intentar solucionarlo con sólo unos conocimientos rudimentarios de mecánica, por lo menos hasta llegar al taller mecánico más cercano. Con el aumento de la presencia y la importancia de la electrónica del automóvil, en la actualidad un auto que no logra ser encendido debe ser sometido a controles sumamente complejos antes de acertar con el diagnóstico y aventurar una solución al problema. Pero salvo este aspecto menor, la evolución de la confiabilidad y la reducción de los gastos de operación ha sido altamente satisfactoria en estos primeros cien años de vida del automóvil.



En una época en que las autopistas de varios carriles por sentido no existían, y las distancias entre las ciudades o pueblos eran mucho mayores a las actuales, era de vital importancia tener un vehículo confiable para llegar al destino deseado.

3.4. Satisfacción de las otras necesidades

Volviendo una vez más a la tarea de los diseñadores e ingenieros, ésta no se agotaba con la solución a las necesidades básicas que debía satisfacer un auto. Es que el automóvil nació como un medio de transporte alternativo, pero rápidamente se convirtió en algo más, en mucho más que un medio para ser todo un fin en sí mismo, como un Dios, el gran Dios Auto. Apenas se logró controlar la tecnología de la fabricación de los automóviles, los usuarios comenzaron a demandar mayor confort, mayor lujo, mayor velocidad y potencia, y un diseño acorde a sus gustos personales. Todos estos aspectos eran accesorios a la función básica del transporte, y los fabricantes se lanzaron prontamente a satisfacer esas otras necesidades.



Un deslumbrante Bugatti tipo 57 SC Atlantic de 1938, con carrocería en aluminio, que gozaba, como casi todos los autos del constructor, de una garantía imbatible: el propio Bugatti hacía el mantenimiento del automóvil gratis, de por vida.

Confort y lujo

Si bien muchos carruajes de la Era anterior a la del automóvil se pueden considerar como más que confortables (especialmente los pertenecientes a las clases altas) la rápida evolución del auto posibilitó desarrollar elementos de confort impensados hasta ese momento. El aumento de la velocidad y la situación calamitosa de la mayoría de los caminos tenían a los automovilistas a los saltos, generando el desarrollo de neumáticos y sistemas de amortiguadores que aislaran a la cabina del medio exterior. La combinación de distintos circuitos de ventilación, calefacción y aire acondicionado (este último instalado por primera vez en los automóviles Cadillac de la década del '30) permitió controlar de manera satisfactoria la climatización del interior del automóvil. Las radios y otros sistemas de reproducción musical fueron fácilmente incorporados al auto a medida que eran desarrollados, muchos de ellos inclusive pensados desde el origen para ser utilizados en los vehículos. Los asientos fueron cada vez más anatómi-

cos, permitiendo la regulación en altura, inclinación, y otros factores para que cada ocupante pudiera disfrutar mejor del viaje (fundamentalmente cuando éstos eran largos). En los Estados Unidos, donde se presenta la combinación de grandes aglomeraciones ciudadanas en un territorio donde las enormes distancias son recorridas a través de una eficaz red de autopistas, se impuso desde muchos años atrás la caja de cambios automática y el control automático de velocidad. Y entre otras muchas cosas más se logró, a través del diseño adecuado de compartimientos y de la posibilidad de rebatir asientos, que el automóvil fuera capaz de transportar no sólo a los ocupantes, sino a sus pertenencias, sin afectar en lo más mínimo su confort. Además, por otro lado, los fabricantes de automóviles desde siempre han sabido satisfacer las necesidades de lujo de sus clientes. Desde los autos hechos a medida, con adornos de oro y diamantes, hasta la utilización de pieles y maderas preciadas allí donde el confort o la prestación se hubiera alcanzado con sustitutos de mucho menor valor, el lujo estuvo presente desde el primer momento. No ha sido necesario el progreso de la tecnología para asegurar el lujo en el automóvil, siendo uno de los pocos aspectos del automóvil que se disfrutaban en privado, sin que sea necesario mostrarlo al resto del mundo. Por último, se puede decir sin temor a equivocarse que el automóvil ha logrado desde hace mucho tiempo un nivel de confort y lujo que logra satisfacer la mayoría de las necesidades que exigen sus usuarios.

Velocidad y potencia

La velocidad y potencia necesarias para los automovilistas también se lograron satisfacer desde temprano. Por ejemplo, en 1936 los Duesenberg SJ tenían un motor con una potencia de unos 320 caballos que los impulsaban a algo más de 160 km/h. Sin embargo, los diseñadores de motores lograron extraer cada vez más y más potencia de las plantas motrices, hasta que hacia 1972 (antes de que estallara la crisis del petróleo) el motor de los Chevrolet Corvette llegaba a alcanzar los 650/700 caballos –casi como un motor de un automóvil moderno de Fórmula 1– que alcanzaban para que el auto circulase a 300 km/h. Ya se discutió la existencia de una fuerte fascinación del hombre hacia la velocidad y los fabricantes de automóviles han sabido responder más que satisfactoriamente a la necesidad de velocidad y potencia de los automovilistas. Dada la particular relación del auto con varios aspectos del inconsciente humano, un auto veloz y potente aparentemente es mucho más deseable que un auto cómodo y lujoso. Solamente unos pocos sueñan con tener un Rolls-Royce en su garaje, y muchos harían sacrificios incalculables a fin de tener una Ferrari, un Porsche o un Lamborghini para disfrutar durante toda una vida.

Los autos siempre fueron más veloces y potentes de lo necesario, o de lo lógico, ya que a pesar de que las leyes no permiten circular a las velocidades que muchos de los autos son capaces de desarrollar, los usuarios demandan esa velocidad y potencia extra. Y una vez más, la técnica fue capaz de proveer eso que demandan los clientes, sin problemas, mejorando cada vez más el control del vehículo, para que los émulo de Ayrton Senna puedan sentirse seguros al circular a la velocidad que le dicta su consciencia.



De 1927 a 1932 los Bugatti Tipo 35 dominaron las principales competencias automovilísticas.

Gustos personales

Si bien los temas mencionados anteriormente tienen mucho que ver con los gustos personales, no hay que soslayar otro aspecto más que influye –y mucho– en la elección: el estilo del diseño exterior. Para muchos, el vehículo no sólo tiene que ser confortable, lujoso, veloz y potente, sino **parecer** confortable, lujoso, veloz y potente. Pero, además (que es lo más difícil) tiene que estar diseñado de manera de agradar al dueño, y dar la apariencia de ser una prolongación del espíritu mismo de quien lo maneja. Para resumir este último párrafo, se puede decir que **el diseño es uno de los aspectos más importantes del automóvil**, donde inclusive una curva de más o de menos, o un elemento puesto en distinto lugar, pueden ser determinantes en el destino exitoso o trágico del vehículo. Al respecto hay dos casos paradigmáticos que representan esto. Por el lado del diseño exitoso, el Volkswagen "Beetle", el auto más vendido de todos los tiempos, que no sufrió cambios estéticos importantes a lo largo de sus casi cincuenta años de historia (el diseño de Ferdinand Porsche se remonta a la época anterior a la segunda guerra mundial y formaba parte de uno de los planes de Adolf Hitler de industrializar y motorizar el hipotético nuevo imperio alemán). Por el lado del fracaso, el Edsel. En 1958 la Ford Motor Company decidió posicionar una nueva marca entre las existentes Ford y Lincoln (de la misma manera que Buick estaba posicionada entre Chevrolet y Cadillac en la General Motors Company, por ejemplo) y eligió para ello el nombre de uno de los hijos de Henry Ford. Bastó que el público en general lo viera para que expresara su desagrado con el diseño exterior. Y si bien el resto de las características del vehículo estaban clara y adecuadamente alineadas con las de los autos de la época, lo cierto es que pasaron totalmente desapercibidas.



El icono de los fracasos comerciales: un Edsel de 1958 (al que algunos se referían como "un Buick chupando un limón") tenía un diseño, por lo menos controversial, que opacó todo el resto.

Nadie, salvo algún excéntrico, quiso comprar un Edsel. Así, un producto de una de las empresas más poderosas del planeta que no tenía ni una ingeniería defectuosa, ni prestaciones inadecuadas, ni un mal posicionamiento de marca se convirtió en un símbolo universal del fracaso, en un sinónimo de burla, en un nombre maldito que aún

hoy genera estremecimientos con su sola alusión. Tan sólo tres años después de su lanzamiento, la marca Edsel era parte del pasado. Es probable que esto pruebe que para muchos automovilistas, casi todo entra por los ojos y que para que un auto sea exitoso debe antes que todo agradar a los usuarios desde el punto de vista estético. Y, salvo raras excepciones, se puede decir que los diseñadores han sabido lograr, también desde los comienzos, satisfacer ampliamente los gustos personales de los usuarios de automóviles.

Libertad, individualidad y prosperidad

Luego de haber hecho un breve repaso por las otras necesidades satisfechas por el automóvil, las tres palabras del título resumen claramente qué es lo que brinda a hombre y mujeres por sobre las necesidades básicas –que tienen que ver en definitiva solamente con el transporte–. Pocos objetos creados por hombre han satisfecho tan acabadamente los anhelos de sus dueños, logrando trascender mucho más allá de su función esencial. Y tal vez esto sea la base de su éxito: la posibilidad que brinda a la humanidad de vivir una sensación distinta e intensa que es el resultado de una combinación perfecta de sentimientos de libertad, individualidad y prosperidad.



El horizonte despejado, el infinito que se acerca a gran velocidad, mientras la música suave y el olor de la lluvia recién caída completan la sensación de plenitud y de libertad (apostilla de la relación entre los seres humanos y algunas máquinas).

3.5. Conclusión del capítulo

La razón que hace que los automóviles modernos no protejan eficazmente a sus ocupantes en caso de impacto consiste en que ellos son apenas una evolución de un mismo tipo de vehículo, que adquirió su configuración definitiva hacia la mitad del siglo pasado. Luego del lanzamiento del Ford T, en pocos años se produjo la verdadera revolución: el desarrollo de nuevas tecnologías, la reingeniería de cada aspecto del automóvil, la exploración de las más absurdas e ilógicas ideas que fueron incorporándose o descartándose en función, básicamente, de su éxito comercial. Así aparecieron y desaparecieron, por ejemplo, automóviles a vapor o eléctricos, vehículos de más o menos de cuatro ruedas, o coches que tenían dos ejes motores en lugar de uno. En el caso de esas desapariciones algunas veces fueron definitivas, y otras fueron sólo momentáneas, en la espera de momentos más propicios. Pero una vez alcanzada esa configuración definitiva la reingeniería del diseño se agotó. Esto probablemente sea consecuencia de que desde temprano se han logrado satisfacer todas las necesidades demandadas por los usuarios. Basados entonces siempre en un mismo concepto original, los diseñadores se han dedicado a introducir periódicamente alguna leve mejoras en las plantas motrices, en los sistemas de tracción, dirección y frenos, y en la carrocería. Al mismo tiempo la lógica de las modas impuso numerosos cambios estilísticos que, sumados a progreso en el confort interior, han logrado mantener el eterno romance entre el hombre y el auto. Ahora lo cierto es que, más allá de estos cambios, el automóvil moderno no es esencialmente distinto a los de la posguerra. En 1964, cuando la electrónica no había irrumpido todavía en el automóvil, Henry Ford II decía (2):

"Cuando uno piensa en el enorme progreso realizado por la ciencia durante las dos últimas generaciones le asombra descubrir que en el automóvil de nuestros días no hay casi ningún elemento importante que hubiera podido parecer extraño o desconocido a los pioneros de nuestra industria".

Y en ese vehículo la seguridad nunca fue una de las necesidades básicas a satisfacer por parte de los diseñadores. Los automóviles jamás se pensaron desde la seguridad sino que se buscó hacer más seguro un diseño que debía satisfacer otras necesidades. Así, a los carruajes tirados por caballos se les quitó la tracción a sangre y se los reemplazó por motores a combustión interna. Luego se modificaron las estructuras y los dispositivos de esos carruajes modernos para adaptarlos a los pesos y potencias crecientes. Sólo en un último paso se intentó hacerlos un poco más seguros.

Así se ha llegado a la actualidad, sin grandes modificaciones, diseñando automóviles de acuerdo a los parámetros establecidos por la industria hace décadas, agregándole al diseño terminado los dispositivos de seguridad que aumenten lo máximo posible la protección a los ocupantes, en lugar de incluir a la seguridad de impacto entre las necesidades básicas. Sin dudas que si un vehículo se pensara para resistir un impacto a 130 km/h contra un camión que circula en la misma dirección y sentido contrario la configuración del automóvil sería completamente distinta a la actual. Por eso, para mejorar la protección a los automovilistas es necesario iniciar nuevamente la reingeniería del diseño, partiendo de una de las últimas necesidades insatisfechas, hasta lograr integrar en un vehículo –que se pueda producir y comercializar exitosamente– el resto de sus atributos.

Reflexión

Carl Sagan habla en uno de sus libros acerca de algunos logros de la Humanidad (3):

"Hemos mirado a través de miles de millones de años luz de espacio para vislumbrar el universo poco después del Big Bang, y sondeado la magnífica estructura de la materia. Escudriñamos el núcleo de nuestro planeta, y el llameante interior de nuestra estrella. Pusimos al descubierto capítulos ocultos en el registro de nuestros propios orígenes y, con cierta congoja, comprendimos mejor nuestra naturaleza y perspectiva. Inventamos y refinamos la agricultura, sin la cual moriríamos casi todos de inanición. Creamos medicinas y vacunas que salvan la vida a miles de millones de personas. Logramos comunicarnos a la velocidad de la luz y dar la vuelta a la Tierra en una hora y media. Hemos enviado docenas de naves a más de sesenta mundos y cuatro astronaves a las estrellas."

Y, sin embargo, esa misma Humanidad no consigue transportarse de un lugar a otro sin arriesgar en la operación, desde hace décadas, la vida de cientos de miles de personas por año. Al respecto una explicación posible surge de analizar brevemente un caso emblemático de la seguridad en los accidentes, ocurrido en la década de los '80. En esa época los automóviles del denominado "grupo B", entre los que se destacaban, por ejemplo, el Audi Quattro o el Peugeot 205 T16, eran las estrellas del Campeonato Mundial de Rally. La creciente popularidad de esta categoría de competición permitió a los fabricantes a desarrollar autos cada vez más potentes y veloces. Para el año 1985 un Peugeot 205 T16 evolution 2 del grupo B tenía una potencia de alrededor de 500 caballos de fuerza, y una masa de apenas 900 kg. Con un auto similar el piloto Ari Vatanen sufrió en ese año un espectacular accidente en el Rally de Argentina, cuando su automóvil saltó una pequeña loma en el camino y tras un largo vuelo e infinitas vueltas terminó destrozado al costado de la ruta cordobesa. Afortunadamente, tanto el piloto como el copiloto sobrevivieron al accidente, si bien debieron retirarse por el resto del año de las competencias. La que no sobrevivió mucho tiempo más fue la categoría. Un año más tarde el Lancia Delta S4 de Henry Toivonen se despeñó en una curva durante el Rally de Córcega, lo que provocó la muerte del piloto y su acompañante atrapados en un incendio, obligando finalmente a la FIA a cancelar las competencias del grupo B a partir de 1987. La entidad que rige el automovilismo también decidió que los autos de la nueva categoría tendrían una potencia máxima equivalente a la mitad de la permitida para el grupo B. Inclusive hoy en día, un Peugeot 206 WRC del grupo A8 (equivalente al extinto grupo B) tiene una potencia de cerca de 300 caballos, una masa de unos 1.250 kg. y, por ende, un comportamiento menos salvaje. Esta anécdota es un maravilloso ejemplo de racionalidad. Las autoridades, los pilotos y las escuderías se sinceraron y reconocieron dos cosas: por un lado, que la potencia y velocidad de los vehículos los hacían difíciles de controlar, a pesar de que quienes los conducían eran pilotos con una vasta y probada experiencia. Y por otro lado –y fundamentalmente– que los elementos de seguridad de los automóviles de Rally (incluyendo las jaulas de seguridad, cascos, buzos antifiama, etc.) no alcanzaban para proteger a los pilotos en casos de accidente a semejantes velocidades. Por eso, al reducir la potencia y velocidad de los vehículos no sólo se buscó minimizar la posibilidad de errores que derivaran en accidentes, sino, básicamente hacer que en caso de ocurrir, la energía de movimiento fuera mucho menor, aumentando notablemente las probabilidades de supervivencia de los pilotos.

En la actualidad el mundo se enfrenta con un problema similar al de la FIA en 1986, y no es capaz de tomar la decisión adecuada. A pesar del aura mística del gran Dios Auto se debe reconocer que en el estado actual de su desarrollo éste es incapaz de

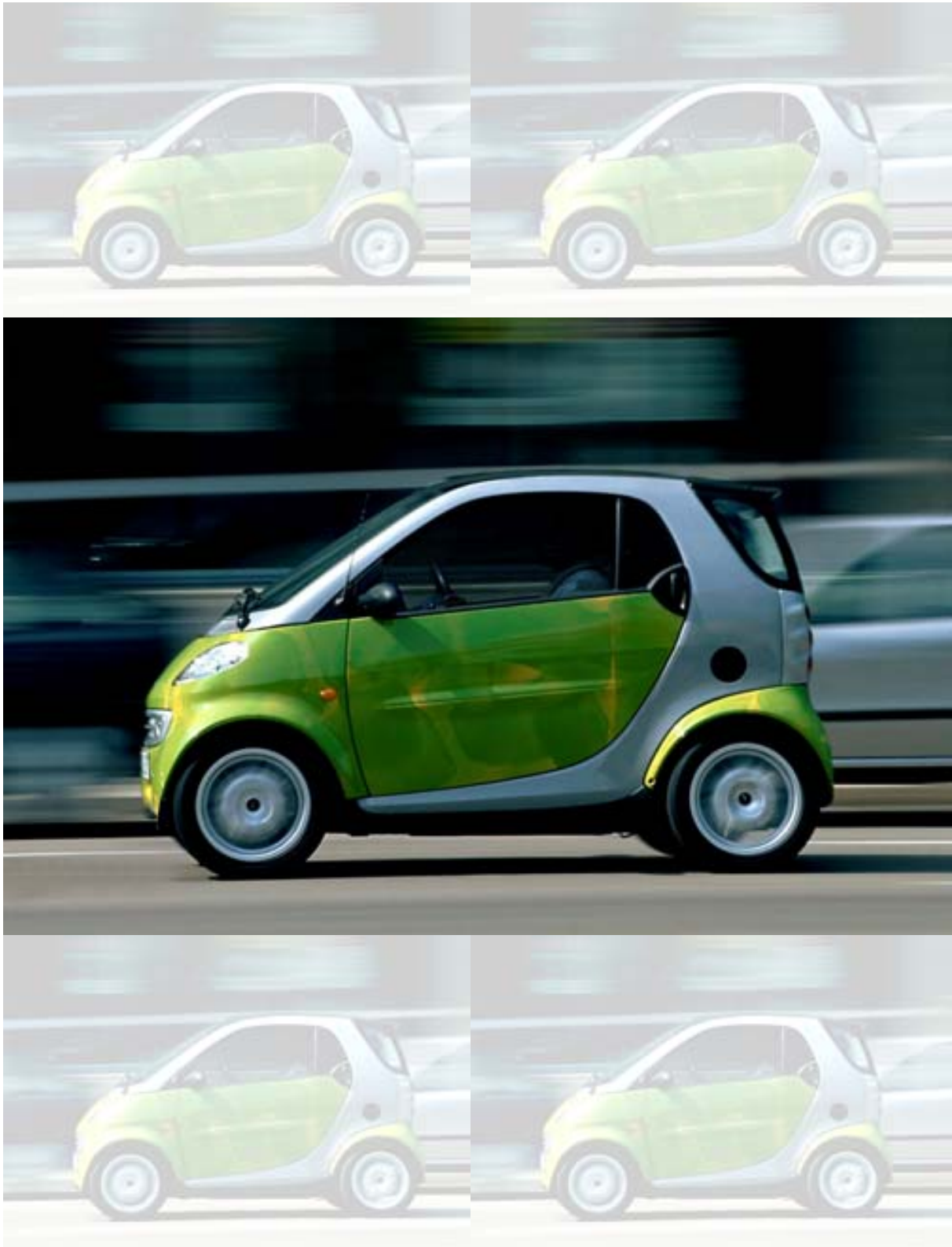
ofrecer una adecuada protección a sus ocupantes en muchos tipos de impactos. Y que al mismo tiempo casi todas condiciones del tránsito de la actualidad deben permanecer invariables (como la velocidad de circulación, la infraestructura vial, etc.). Lo cual implica un serio aprieto, porque aunque sea difícil encontrar el camino, al igual que lo que ocurrió en el desaparecido grupo B, **lo cierto es que es absolutamente necesario que se produzca algún cambio.**



Los automóviles del Grupo B de Rally tenían una relación masa/potencia apenas inferior a la de un automóvil de Fórmula 1. Al comprobar que eran demasiado peligrosos para los pilotos se decidió eliminar la categoría y reemplazarla por otra con automóviles mucho menos potentes y veloces.

3.6. Referencias del capítulo

- 1) *Power behind the wheel: creativity and evolution of the automobile.* Boyne W. (Stewart, Tabori & Chang – 1988)
- 2) *Peligroso a cualquier velocidad.* Nader R. (Editorial Jorge Alvarez – 1966)
- 3) *Un punto azul pálido: una visión del futuro humano en el espacio.* Sagan C. (Planeta – 1997)



4. Seguridad en vehículos modernos

"Querido Señor Colbert:

Mi madre siempre me decía que si tenía algo que discutir fuese a lo más alto. Cada año los fabricantes de automóviles subrayan en los hogares la idea de la mayor potencia del motor. Comprendo que es necesaria una potencia razonable, pero creo que sería más astuto centrar más la atención en la seguridad que en el aumento de velocidad [-] Todas las mañanas las primeras páginas [de los diarios] hablan de personas muertas en accidentes de tránsito. Un buen porcentaje de esas desgracias podrían evitarse si el automovilista tuviera una adecuada protección. El conductor normal de un coche moderno es una víctima propiciatoria. No hay nada que lo proteja. Las estadísticas demuestran que estaría mucho más seguro en el campo de batalla. [-] y creo firmemente que la primera compañía automovilística que empiece a insistir en la seguridad en lugar de la velocidad conseguirá aumentar considerablemente su participación del mercado. Sinceramente suyo."

Groucho Marx, Carta al Presidente de la Chrysler Corporation (1954)

-
- **Características generales del mercado automotor**
 - **Seguridad de información y control**
 - **Seguridad de impacto**
 - **Seguridad en desarrollo**

4.1. Introducción y resumen del capítulo

En los primeros años la seguridad no era una necesidad básica de los automovilistas. En el capítulo anterior se analizó la manera en que el automóvil evolucionó, desde simples carruajes frágiles con motores a combustión interna hasta los vehículos de mitades del siglo pasado, de los cuales los vehículos modernos son una natural evolución.

A medida que los automóviles fueron más pesados, potentes y veloces, y la cantidad de vehículos aumentó de manera geométrica, los accidentes de tránsito comenzaron a producir los primeros estragos, generando una mayor conciencia sobre la gravedad del problema de los accidentes de tránsito en la población. Puede resultar sorprendente, pero la introducción de los primeros automóviles tuvo al principio un efecto positivo en el descenso de las víctimas mortales provocadas por los medios de transporte. Es que los primeros vehículos, si bien rudimentarios, se podían controlar mejor que muchos de los caballos utilizados anteriormente, que se contaban por decenas de miles en cada ciudad. Por ejemplo, en 1875 se registraron 168 muertos como consecuencia de accidentes de tránsito en la ciudad de Berlín, mientras que en el año 2000, con una población varias veces superior, las muertes fueron apenas 89 (1). Sin embargo, a partir de su masificación en todo el mundo, el automóvil se convirtió en una verdadera amenaza, provocando hasta la actualidad decenas de millones de muertos y heridos, llegando a ser una de las principales causas de muerte en el mundo.

Pero la demanda de mayor seguridad de parte de los automovilistas es reciente, y hasta hace unos veinte años atrás la protección al ocupante era un aspecto secundario en el diseño de un auto. Recién a partir de las últimas dos o tres décadas se comenzaron a implementar, en algunos países, medidas de trascendencia que tenían como objetivo reducir los estragos que generan los accidentes de tránsito. Esto incluyó programas de seguridad que promovían, entre otros, leyes más estrictas, campañas de educación vial y controles técnicos de los vehículos (con el objetivo principal de reducir la cantidad de accidentes). También se modificó la infraestructura vial, separando paulatinamente los carriles de circulación, mejorando la señalización, o aumentando la cantidad de protecciones laterales. En cuanto a las medidas para minimizar los efectos una vez ocurrido el impacto, uno de los grandes avances fue la imposición del uso del cinturón de seguridad, ya que los automovilistas se negaban a usarlo voluntariamente. En consecuencia, gracias a muchas de esas medidas, los automovilistas modificaron su manera de conducir, volviéndose mucho más responsables. Paralelamente, los diseñadores fueron introduciendo varias mejoras en los automóviles, cada vez más potentes y veloces, de manera de ofrecer un mayor control del vehículo y una mejor protección a sus ocupantes. Un auto moderno tiene muchos más y mejores dispositivos de seguridad que los vehículos de hace unas dos o tres décadas. Los pruebas y ensayos de impacto se multiplicaron, aumentando considerablemente el conocimiento de los fabricantes acerca de la eficacia que tiene cada automóvil al momento de proteger a los ocupantes. Por otro lado, las mejoras introducidas en los sistemas de dirección y suspensión, en los conjuntos de frenos (dispositivos antibloqueantes) y en la visibilidad hacen que un automóvil moderno casi no ofrezca puntos débiles en lo que respecta a evitar que ocurra un accidente.

De la misma manera tampoco existe una conciencia adecuada de la segunda asignatura pendiente no nombrada hasta ahora: el medio ambiente. A pesar de que este es un tema secundario al objeto principal de la Tesis, vale la pena mencio-

narlo, aunque sea a título de información complementaria. De esta manera se puede comentar que la propulsión del automóvil se consigue a costa de contaminar severamente el medio ambiente, en el mismo momento en que la industria está en condiciones de diseñar automóviles que no lo hagan. Y si bien se han hecho muchos avances en el sentido de reducir, tanto el consumo de combustible por kilómetro recorrido, como la cantidad de gases nocivos que se liberan durante la combustión, la industria automotriz todavía utiliza a los motores de combustión interna como única fuente de potencia válida en los autos de venta masiva. Es importante destacar entonces que la combustión de hidrocarburos genera, en el mejor de los casos (cuando la combustión es completa) un aumento de la cantidad de dióxido de carbono CO_2 presente en la atmósfera, además de liberar otros elementos tóxicos que componen los combustibles como el azufre. Y si la combustión es incompleta, como en el caso de los autos que no cuentan con catalizador (o cuando este último no funciona correctamente), se liberan otros gases peligrosos para la salud de los seres humanos como por ejemplo monóxido de carbono CO . Hay grandes ciudades que se asientan sobre valles (Santiago de Chile o Los Ángeles por ejemplo) que sirven para evidenciar los estragos del smog, generado principalmente por los gases de escape de los automóviles. Y lo cierto es que el peligro del smog no es el único con el que se enfrenta la Humanidad, sino que peor todavía es el problema del calentamiento global. Así, para dimensionar el problema se pueden considerar el siguiente comentario de Carl Sagan (2):

*"En el transcurso del siglo XX la temperatura de la Tierra ha aumentado un poco, algo menos de 1 °C. [-] En los últimos centenares de miles de años la Tierra ha sufrido diversas glaciaciones. Hace 20.000 años, lo que hoy es Chicago se hallaba cubierto por una capa de hielo de un kilómetro y medio de espesor. Ahora estamos entre dos glaciaciones, en lo que se llama un período interglacial. La diferencia de temperatura media global entre una glaciación y un período interglacial es **sólo de entre 3 °C y 6 °C**. Esto debería hacer sonar de inmediato los timbres de alarma: un cambio de sólo unos pocos grados puede ser algo sumamente serio. [-] Varios equipos científicos – equivalentes modernos del oráculo de Delfos – han empleado modelos informáticos para calcular el incremento térmico esperado y vaticinar cuanto aumentaría la temperatura global si, por ejemplo, se doblara la cantidad de CO_2 [presente actualmente en la atmósfera], lo que al ritmo actual de consumo de combustibles fósiles sucederá a finales del siglo XXI. [-] Todos predicen que **el incremento de la temperatura media global oscilará entre 1 °C y 4 °C**."*

Es decir, que el daño ambiental del consumo de combustibles fósiles es de una magnitud tal que puede generar profundos cambios en el clima de la Tierra, y por lo tanto se hace necesario reemplazar los actuales motores de combustión interna por motores eléctricos.

Así, antes de pasar a la evaluación de la eficacia de los dispositivos de protección que ofrecen los automóviles modernos, es importante analizar las características generales de los vehículos del mercado, y de sus principales elementos de seguridad. Esto va a permitir, por un lado, establecer en detalle las diferencias entre el desarrollo de los dispositivos que evitan que ocurra un accidente, y el de los que tienen como función minimizar sus consecuencias. Y por el otro, analizar con mayor profundidad cuáles son los aspectos insatisfechos de la seguridad, además de ayudar a establecer un punto de referencia a partir del cual se puede medir esa eficacia de los dispositivos actuales y estudiar futuras –y posibles– mejoras.

Resumen del capítulo

Los aspectos importantes de las **características generales** de los automóviles modernos son:

- existe una enorme oferta de modelos disponible, que en la actualidad satisface las necesidades de casi la totalidad de los segmentos de los mercados hacia los que se dirigen los fabricantes.
- se puede comprobar un notorio aumento de las prestaciones de los vehículos, siendo el Volkswagen Golf un ejemplo representativo de ese incremento. Comparando los datos de 1994 con los de 2002, este modelo ofrece una potencia un 40% mayor, una velocidad máxima casi un 15% superior, y un menor consumo de combustible, a pesar de que es un 17% más pesado (todos los valores corresponden al promedio de la gama).

Los dispositivos de seguridad con que cuentan los autos en la actualidad se pueden agrupar de acuerdo a la función que cumplen. Así, por un lado, se presentan aquellos que contribuyen a la prevención de un accidente, denominados dispositivos de **seguridad de información y control**, entre los cuales el automovilista cuenta con:

- las superficies vidriadas y los espejos retrovisores.
- los dispositivos de iluminación del entorno.
- los de aviso a los demás conductores.
- el tablero de comando y computadora de a bordo.
- los que miden la distancia al vehículo precedente.
- los dispositivos que aseguran la velocidad, trayectoria y estabilidad del vehículo.
- algunos elementos que aumentan el confort de los ocupantes, reduciendo su fatiga, y minimizando los riesgos de la pérdida del control.

Por otro lado, los dispositivos de **seguridad de impacto** son los que tienen como objetivo reducir la gravedad del accidente. En este grupo se pueden enumerar los siguientes dispositivos:

- los de preparación preliminar (pretensionador del cinturón de seguridad, airbag, entre otros).
- los de preservación del espacio vital (el habitáculo, y las superficies vidriadas).
- los que disminuyen la magnitud de la desaceleración del habitáculo (la carrocería).
- los de sujeción (cinturón de seguridad).
- los que protegen a los ocupantes en caso de incendio.
- los que permiten que las víctimas sean socorridas rápidamente.

Y contra todo pronóstico –debido a que la protección que ofrecen los automóviles en caso de impacto parece ser insuficiente– no existen dispositivos de **seguridad en desarrollo** que hagan pensar en un avance significativo, en el corto o el mediano plazo, en la

reducción de la gravedad de los accidentes de tránsito. La mayoría de los dispositivos de seguridad novedosos se agrupa en un automóvil conceptual de Volvo, que presenta las siguientes características:

- casi todos los nuevos dispositivos tienen como objetivo brindar una óptima información al conductor.
- hay sólo dos elementos que se relacionan con la seguridad de impacto y que corresponden a desarrollos disponibles desde varios años atrás (cinturón de seguridad de cuatro puntos y regulación en altura de los asientos traseros para adaptarlos a las distintas alturas de los ocupantes, especialmente los niños).

4.2. Características generales del mercado automotor

Para la industria automotriz es difícil encontrar un punto de equilibrio entre la filosofía de la producción masiva en serie (representada por la mítica frase de Henry Ford “de cualquier color siempre y cuando sea negro”) y la filosofía de la satisfacción a ultranza del cliente fabricando un vehículo a medida de las necesidades de cada individuo. Desde la época del Ford T el mundo automotor tuvo que convivir con esta situación de compromiso, entre producir un auto barato y confiable mediante la producción en grandes series –pero igual a otros tantos cientos de miles–, o producir un auto distinto para cada cliente, con un método de fabricación artesanal.

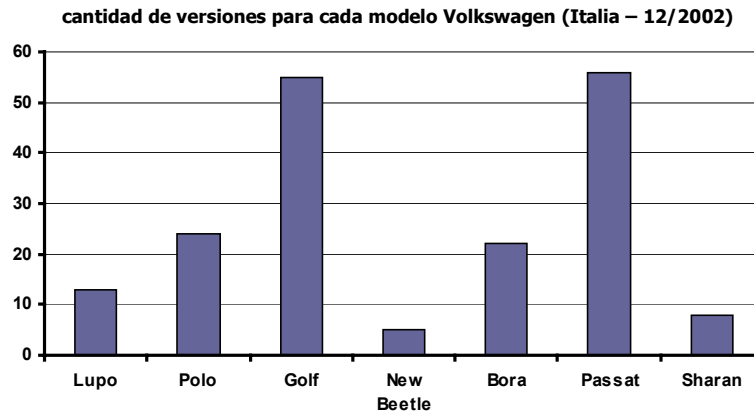
Algunos fabricantes optaron por lo primero (Ford, General Motors, Chrysler, Fiat, por ejemplo) y otros por lo segundo (Rolls-Royce, Duesenberg, Bugatti, Ferrari, Lotus). Para los que optaron por la producción en serie, se establecieron rápidamente los distintos segmentos del mercado a atender, y se diseñaron automóviles y se posicionaron marcas para atender a las necesidades de cada segmento. Antes de la depresión económica de 1930, General Motors llegó a tener nueve marcas que representaban la escalera en la evolución del estilo de vida norteamericano (en orden de prestigio social: Chevrolet – Pontiac/Oakland – Viking/Oldsmobile – Marquette/Buick – LaSalle/Cadillac). Paralelamente se establecieron algunos nichos de mercado y se diseñaron autos pensados para ser producidos en serie relativamente pequeñas, como el Chevrolet Corvette, para esos grupos. El gran cambio hacia la satisfacción de las necesidades de cada persona en particular surgió al ser introducido el concepto de “opcional” de algunos elementos tales como el aire acondicionado, dirección asistida, etc. En la actualidad la gran mayoría de las empresas optan por la producción en grandes series, ofreciendo al mercado muchos modelos de vehículos y a su vez varias versiones de cada uno, en un intento por encontrar la solución de compromiso citada.

Parece innecesario analizar la totalidad de los mercados mundiales, debido a las grandes diferencias que existen entre ellos, por eso a continuación se indican las características más importantes del mercado italiano, que comparte muchas de las cualidades del resto de los mercados europeos, y que cuenta con automóviles que reflejan en buena medida la tendencia en el ámbito mundial.

Características generales del mercado italiano

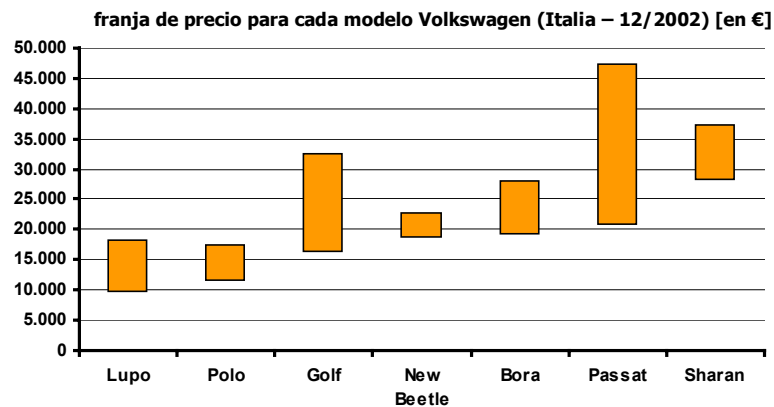
En este mercado se ofrecían a fines de 2002 52 marcas distintas, 247 modelos y 2.700 versiones (3). Apenas ocho años antes, las versiones de automóviles disponibles en una de las principales potencias industriales del mundo eran 1.250 (4). Con unas ventas totales aproximadamente iguales, el automovilista italiano puede optar entre el doble de opciones de las que tenía en 1994. Difícilmente se pueda encontrar otro momento de la historia del automóvil con una oferta tan vasta de modelos y versiones. Y si a las distintas versiones ofrecidas se le suma la posibilidad de personalizar el automóvil con distintos opcionales, más la oportunidad de elegir el color de la carrocería y las terminaciones interiores, se puede decir que existe un automóvil para casi cada necesidad. Por otro lado es importante destacar que la amplitud de la oferta depende también del posicionamiento del modelo y del éxito comercial del mismo. Al analizar la oferta de Volkswagen en Italia, se puede observar que mientras que hay más de cincuenta versiones del “Golf” y del “Passat”, sólo hay cinco versiones del “New Beetle”, tal como puede ver reflejado en este gráfico (4):

gráfico 4.1



Al aumentar en número de versiones de un modelo también se amplía la franja de precios, como se observa en el siguiente gráfico:

gráfico 4.2



Es decir, que si un comprador tiene un presupuesto disponible de entre 15.000 y 20.000 euros, puede optar por cinco modelos distintos (Lupo – Polo – Golf – New Beetle – Bora) y aproximadamente veinticinco versiones o, si quiere gastar entre 20.000 y 25.000 euros, las opciones se convierten en cuatro modelos (Golf – New Beetle – Bora – Passat) y cincuenta y cinco versiones. Y eso corresponde solamente a una marca.

Características técnicas generales

La enorme oferta de vehículos de la actualidad hace muy engorroso señalar las distintas características técnicas de todos ellos, por eso, para simplificar el análisis, se va a considerar un automóvil típico, de los más vendidos en el mundo, para señalar las características técnicas de un auto moderno que represente al vehículo medio disponible en el mercado de hoy. Por ejemplo el *Volkswagen Golf 1.6 16V 5 puertas*, versión media del modelo, que tiene las siguientes características (3):

i) carrocería

Berlina, 2 volúmenes, 5 puertas, 4 puestos, 1.171 kg. de masa total (sin ocupantes).

ii) motor

Delantero transversal, Ciclo Otto, alimentación a nafta (indirecta a inyección electrónica), 4 cilindros en línea, 1.598 cm³ de cilindrada, 4 válvulas por cilindro, 105 CV de potencia máxima (a 5.700 rpm).

iii) transmisión

Tracción delantera, cambio manual de 5 velocidades

iv) suspensiones

Independientes en las cuatro ruedas, las delanteras de tipo Mc Pherson, las traseras con barras de torsión.

v) frenos

A disco en las ruedas delanteras, a tambor en las ruedas traseras, con ABS (antiblocante) de serie.

En cuanto a la posible evolución hacia otras soluciones se puede recurrir al mismo detalle para hacer unos breves comentarios:

i) carrocería

Es difícil prever un tipo de carrocería distinto. Probablemente en el futuro, fundamentalmente debido a una cuestión de eficacia aerodinámica, los dos volúmenes se conviertan en uno.

ii) motor

Los motores tienden a ser cada vez más eficientes. Las normas de Europa y Estados Unidos exigen que cumplan ciertos requisitos estrictos acerca del nivel de contaminantes emitidos (normas Euro 3-4-5, por ejemplo). La alternativa al motor de ciclo Otto es el motor de ciclo Diesel, cuya versión más común incluye la inyección directa "common rail" y la alimentación de aire a través de un turbocompresor. Otras fuentes alternativas de potencia que se encuentran en desarrollo son los motores eléctricos, alimentados a través de baterías u otro motor que genera electricidad (llamados híbridos). Pero por los próximos años no se deben esperar grandes cambios.

iii) transmisión

La tracción delantera ha vencido en la competencia contra la (más tradicional) tracción trasera. Sus ventajas son innegables, superadas apenas por la tracción integral, que siendo más segura, necesita de mayores elementos mecánicos (mayor desgaste y rozamiento) y consume mayor espacio del habitáculo, y por lo tanto relegada por ahora a los automóviles de mayor precio y prestaciones. En cuanto a la caja de cambios probablemente se adopte en el mediano plazo la de tipo automático, con la posibilidad variar las relaciones de cada cambio para elegir el tipo de conducción (deportiva, tránsito urbano, económica, etc.).

iv) suspensiones

Todavía hay algunos modelos que no adoptaron la suspensión independiente trasera, y es de esperar que en el corto plazo todos lo hagan.

v) frenos

En la mayoría de los vehículos modernos los sistemas antiblocantes de freno son ofrecidos junto con el equipamiento de serie, y poco a poco los frenos a tambor de las ruedas traseras se sustituyen por los más eficientes frenos a disco. Es muy probable que en el mediano plazo el ABS y otros sistemas antibloqueo se incorporen a las dotaciones de serie de todos los autos.

Para terminar, como se indicó en el capítulo pasado, muchas de las características técnicas generales de los automóviles modernos son similares a aquellas de los primeros vehículos (tanto los distintos tipos de carrocería, como de motores, transmisiones, suspensiones y frenos actuales son mejoras del mismo concepto original desarrollado décadas atrás). Uno de los grandes avances con respecto a estos últimos corresponde al desarrollo de la electrónica, y a su introducción en casi todos los dispositivos de gestión del auto, desde el sistema de inyección de combustible hasta configuración de las suspensiones, pasando por la distribución de potencia a cada rueda motriz. El otro gran avance de los vehículos modernos con respecto a los de principio del siglo XX es **la notable mejora de las prestaciones.**

Prestaciones generales

En 1930 se podía comprar un Cadillac con motor de 16 cilindros dispuestos en V de poco más de 7.000 cm³ que desarrollaba unos 180 caballos de fuerza. Un informe del SAE Journal (5) de ese mismo año señalaba que con el tipo de carrocería ensayada el motor lograba llevar los 3.330 kg. del automóvil a una velocidad máxima de 140 km/h, consumiendo alrededor de 40 litros cada 100 km recorridos. Por supuesto que la mayoría de los automóviles de la época eran menos costosos y por ende menos potentes, veloces o eficientes. En la actualidad, en cambio, un motor de 1.600 cm³ normalmente aspirado desarrolla entre 100 y 110 CV, o sea, unos 65/75 CV/litro contra los 25 CV/litro del Cadillac V-16. El consumo se redujo a unos 8 litros cada 100 km recorridos, y la velocidad máxima también aumentó, si bien los 140 km/h del Cadillac de 1930 ya eran suficientes para superar los límites máximos de circulación actuales en casi todos los países. De las 2.700 versiones que se ofrecen en Italia, algo más del 35% superan los 200 km/h (y se puede elegir entre 130 versiones de automóviles que podrían circular a más de 250 km/h). Lo destacable de este fenómeno es que **no es necesario retroceder tanto en el tiempo para observar un cambio abrupto en las prestaciones.** Recurriendo nuevamente al mercado italiano, se pueden comparar dos versiones de Volkswagen Golf que se ofrecían en 1994 con dos de la actualidad (de características y posicionamiento similares), empezando por el modelo medio:

tabla 4.1

Característica (modelo medio)	1994 ²¹	2002 ²²	Var.
masa [kg.]	1.005	1.171	17%
cilindrada [cm ³]	1.598	1.598	0%
potencia [CV]	75	105	40%
velocidad máxima [km/h]	168	192	14%
aceleración 0/100 km/h [s]	s/d	10,5	-
consumo a 120 km/h [litros/100 km]	7,2	6,9	-4%

Uno de los elementos que llaman la atención es el notable aumento del 40% en la potencia del motor a pesar de mantener la misma cilindrada (y con un menor consumo), en un automóvil que, además, no está dirigido a personas que buscan exprimir al máximo sus capacidades de manejo. Aspecto que sí deben satisfacer las versiones deportivas, cuya comparación es la siguiente:

²¹ Volkswagen Golf 1.6 5 puertas CL (4).

²² Volkswagen Golf 1.6 16V 5 puertas (3).

tabla 4.2

Característica (modelo deportivo)	1994 ²³	2002 ²⁴	Var.
masa [kg.]	1.155	1.477	28%
cilindrada [cm ³]	2.792	3.189	14%
potencia [CV]	174	241	39%
velocidad máxima [km/h]	225	245	9%
aceleración 0/100 km/h [s]	s/d	6,4	-
consumo a 120 km/h [litros/100 km]	8,9	8,6	-3%



El Volkswagen Golf R32, capaz de viajar a 245 km/h.

Nuevamente se observa un aumento similar de la potencia, esta vez a costa de una mayor cilindrada. Si se extiende el mismo análisis al resto de la gama, y considerando los promedios de cada características los resultados son muy similares:

tabla 4.3

Volkswagen Golf	1994	2002	Var.
cantidad de versiones	31	55	77%
masa promedio [kg.]	1.090	1.279	17%
potencia promedio [CV]	92	129	40%
velocidad máxima promedio [km/h]	176	201	14%

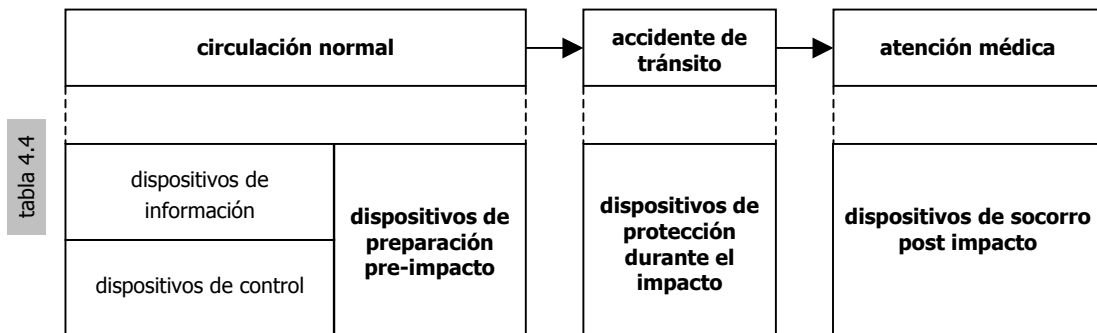
Es decir, que **luego de apenas ocho años**, un mismo modelo de automóvil ofrece al mercado unas prestaciones generales muy superiores. A esto se suma el hecho que el resto de las compañías acompañan la evolución aquí mostrada, haciendo a los vehículos **cada vez más pesados, más veloces y más potentes**.

²³ Volkswagen Golf 2.8 VR6 3 puertas (4).

²⁴ Volkswagen Golf 3.2 V6 R32 3 puertas (3).

Dispositivos de seguridad

En las próximas dos secciones de este capítulo se van a repasar brevemente los dispositivos de seguridad más importantes de los que disponen los vehículos modernos, aunque antes se deben destacar las diferencias entre los dispositivos de los automóviles que buscan evitar los accidentes de tránsito, y los que actúan una vez que el accidente ocurre. En el siguiente esquema de bloques se puede observar la manera en que se agruparon los distintos dispositivos en función de su participación en la secuencia de eventos:



Esta segmentación es compatible con los aspectos de la seguridad vial discutidos en el capítulo 2, donde se explicaron las razones por las cuales es de suma importancia instrumentar las medidas necesarias para minimizar la gravedad de los accidentes, sin descuidar todo lo que hace a evitar que esos accidentes ocurran.

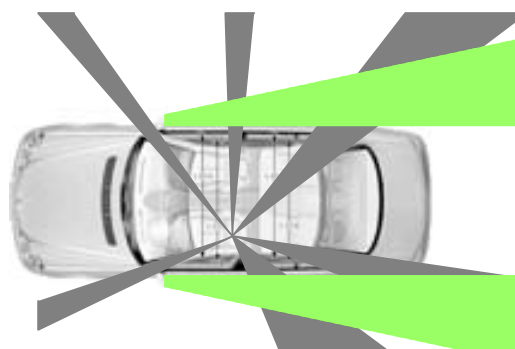
4.3. Seguridad de información y control

El correcto funcionamiento de los dispositivos de información y control de un automóvil contribuye a evitar la generación de accidentes. Y dado que es probable que el conductor sea el causante de la enorme mayoría de dichos accidentes de tránsito –a través de errores de manejo e imprudencias– es vital que el vehículo permita al conductor por un lado tener una visión óptima del camino y del entorno en cualquier circunstancia, y por el otro que ayude a mantener en todo momento un control absoluto de la velocidad y trayectoria. **Y lo cierto es que en este aspecto el automóvil moderno ha evolucionado hasta un punto cercano a la perfección**, acompañando perfectamente el incremento de velocidad, potencia y masa de los vehículos con el desarrollo de dispositivos eficientes, pudiendo decirse que son muy pocos los accidentes que tienen como causa inconvenientes provocados por algunos de estos sistemas. Esto se puede comprobar a través de un breve repaso de los dispositivos de información y control más significativos, que se encuentra a continuación.

Dispositivos de información I: superficies vidriadas y espejos retrovisores

Según los expertos, más del 90% de la información que recibe el conductor es de tipo visual, y proviene de lo que se ve a través del parabrisas, las ventanillas y los espejos retrovisores. Por esto los diseñadores buscan que el automóvil tenga una gran superficie vidriada para permitir una mejor visión al conductor.

Lamentablemente la estructura del automóvil requiere de parantes que son los que generan algunas restricciones a la visión, que se denominan “zonas ciegas”. Esto evita, por ejemplo, que en ciertas circunstancias, el conductor se dé cuenta del acercamiento desde atrás de otro auto, o de la presencia de peatones por delante. Muchas veces es posible utilizar los espejos para observar las zonas que ocultan los parantes, pero en los vehículos actuales quedan todavía algunas áreas inaccesibles para la vista del conductor.



Los parantes opacos crean numerosas zonas ciegas, solucionadas parcialmente por los espejos retrovisores.

En cuanto a la transparencia del vidrio se presentan dos obstáculos que se deben solucionar. Por un lado la lluvia, y por otro lado la condensación de humedad en los días de frío. Para el primer problema existen los limpiaparabrisas, desarrollados hasta el punto de ofrecer un barrido uniforme a cualquier velocidad de circulación, permitiendo adaptar la frecuencia del barrido de acuerdo a la intensidad de la lluvia. Pero los únicos vidrios que se despejan de las gotas de lluvia son el parabrisas y la luneta trasera (esto último sólo en algunos vehículos). Las ventanillas laterales permanecen en general cubiertas por gotas de agua que dificultan la visión, en especial la de los espejos retrovisores externos, cubiertos también de lluvia. Para minimizar este aspecto existen algunos desarrollos de recubrimientos fluorados que logran repeler el agua, que se aplican al parabrisas y a los espejos retrovisores externos. Para el segundo problema la solución actual también se limita a los vidrios por delante (ventilación) y por detrás del conductor (filamentos conductores de electricidad). En este caso también existen

soluciones ya desarrolladas desde el punto de vista tecnológico, que consisten en la incorporación de filamentos conductores de electricidad, similares a los de la luneta trasera, pero realizados con materiales que no modifican la transparencia del vidrio, y que podrían incorporarse al parabrisas y a las ventanillas laterales.

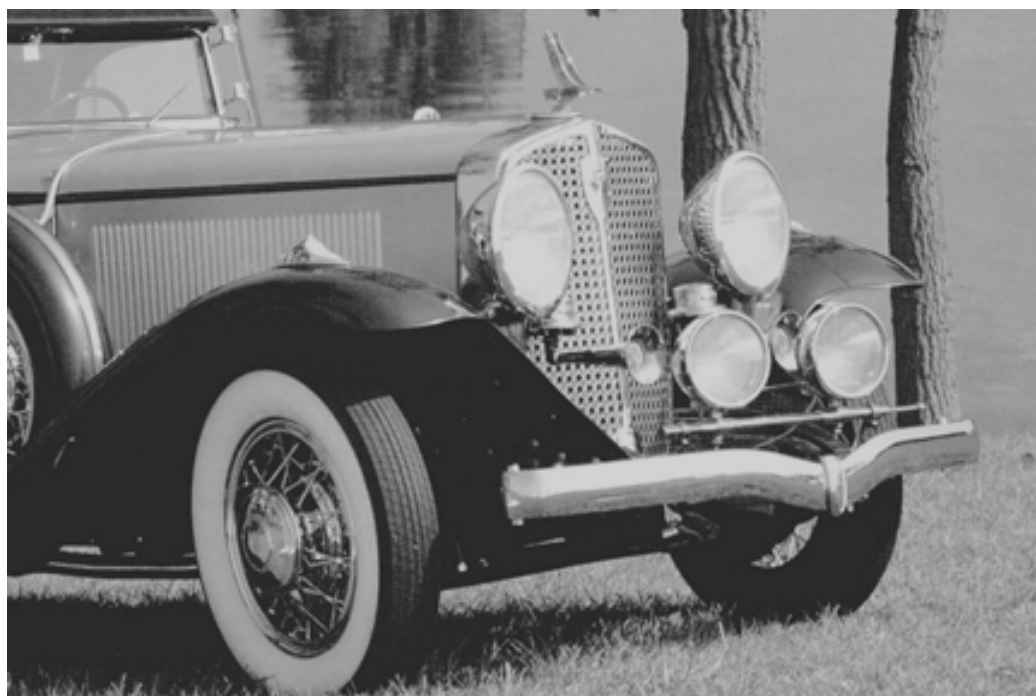
Dispositivos de información II: iluminación del entorno



Las lámparas "Bi-Xenon" de la nueva Serie 5 de BMW.

Para la conducción nocturna es imprescindible contar con una iluminación adecuada del entorno, a través de lámparas en el frente del automóvil. La lluvia y la niebla intensa también presentan dificultades para una correcta visibilidad. Todos estos aspectos se solucionan a través de la incorporación de distintos faros, tanto en el frente del automóvil como en su parte trasera. Y si bien existe la posibilidad tecnológica que los vehículos iluminen correctamente el camino por delante, se debe tener en cuenta que existe un balance muy delicado entre la posibilidad de aumentar la intensidad de iluminación de los faros delanteros y las consecuencias que esta mayor potencia lumínica puede generar en los vehículos que circulan en sentido contrario. En la actualidad muchos vehículos modernos poseen lámparas rellenas con gas xenón, que producen un halo de luz dos veces mayor que las lámparas halógenas, consumiendo un 75% menos de electricidad. Este aumento en la intensidad de la luz debe gestionarse con cuidado ya que mientras mayor es el poder de iluminación, el conductor tiene mejor información de las características del camino, pero aumentan los riesgos para el resto de los vehículos. Es particularmente crítica la dirección del halo de luz, ya que la mayoría de los vehículos varían la inclinación de la trompa de acuerdo a la distribución de los pesos del interior (si el auto lleva ocupantes en su parte trasera y equipaje en el baúl tiende a levantar su frente, elevando el halo de luz y perjudicando a los automóviles que vienen de frente). Por eso muchos automóviles ofrecen la posibilidad de regular la

altura del halo. Otra dificultad que presentan las luces delanteras es la imposibilidad de ajustar su flujo a la dirección o velocidad del vehículo. Al circular a velocidades bajas el campo de visión del ojo humano se amplía hacia los costados, y es conveniente iluminar mejor las zonas laterales. A altas velocidades, en cambio, la vista se extiende hacia delante, donde la rapidez con la que se acercan los objetos hace necesario iluminar la mayor distancia posible, y a pesar de que los vehículos actuales cuentan con las luces denominadas “bajas” o “altas”, estas últimas no se pueden utilizar cuando hay otros vehículos presentes. Un último aspecto de las posibles mejoras en la iluminación se encuentra en los momentos en que el automóvil dobla, sobre todo en las curvas de las rutas, donde ciertas zonas del camino quedan mal iluminadas, debido a la alineación de los faros con el eje longitudinal del vehículo. Una de las maneras de solucionar esto es a través de la instalación de faros que puedan variar la dirección del flujo junto con el volante, solución que ya se ha visto en muchos vehículos.



Los faros delanteros inferiores del Studebaker President Four-Season Convertible Roadster de 1931 giraban junto con las ruedas delanteras para iluminar mejor el camino en las curvas. Este accesorio era ofrecido como opcional también en otros autos de la época.

Dispositivos de información III: avisos a los demás conductores

Muchos accidentes ocurren como consecuencia de maniobras no previstas por el resto de los conductores (frenadas bruscas, cambios de carril, giros en “U”). Esto indica la importancia que tiene anticipar adecuadamente la maniobra que sea va a realizar. La forma más sencilla de comunicar esto es a través de las señales visuales: la luz de giro; los frenos; las luces de posición, etc. Desde hace un tiempo se ha impuesto la instalación de una tercera luz de freno que, se comprobó, mejora la posibilidad que el resto de los conductores se den cuenta de que el vehículo está frenando. La innovación de colocar el grupo de faros traseros en el sentido vertical también ha mejorado sensiblemente la visión de las señales, no solo de freno, sino de giro. Lamentablemente esta última solución se limita en general a los automóviles de tipo familiar. Quedan, sin embargo, algunos aspectos a mejorar. Por un lado, la mayoría de los paí-

ses obligan a los automovilistas a circular con las luces bajas encendidas aun sea de día (está comprobado que disminuye la cantidad de accidentes), pero esto queda librado a la voluntad del conductor. Sería ventajoso que los automóviles no dejen optar por el encendido o no de las luces, sino que éstas deberían estar siempre encendidas desde el momento de la puesta en marcha del vehículo, tal como es norma en las motocicletas. Otro aspecto más por mejorar es la indicación de las frenadas bruscas, ya que no hay variación de la intensidad de la luz de freno en función de la presión aplicada al pedal, dando aviso al resto de los automovilistas de un riesgo serio por delante. Por último, en una época en que la tecnología lo permite, debería existir comunicación entre los automóviles, de manera que si uno ha sufrido un accidente²⁵ avise inmediatamente al resto de los vehículos cercanos para que reduzcan la velocidad. Esto sería de suma utilidad y eficacia especialmente en los choques en autopistas en los días de escasa visibilidad por niebla.



Muchos automóviles tienen el grupo de faros traseros verticales, y, todos, una tercera luz de freno en la luneta trasera.

Dispositivos de información IV: tablero de comando y computadora de a bordo

Los tableros de comando modernos ofrecen mucha de la información necesaria para una conducción segura: velocidad, nivel de combustible y aceite, temperatura del agua de refrigeración, estado de las pastillas de freno, cantidad de revoluciones por minuto y una gran cantidad de otras variables que se han complementado con la incorporación de la computadora de a bordo. Varios vehículos cuentan hoy inclusive con un sistema GPS (Global Positioning System) para que el conductor tenga a su disposición un mapa de la infraestructura vial que lo circunda, con información en línea de la situación del tránsito que le permite elegir el mejor camino evitando los embotellamientos de tránsito, los semáforos que no funcionan, o las calles en reparación, entre otros. Muchas computadoras también indican la autonomía restante, el consumo promedio, la temperatura exterior, y otros índices secundarios. Falta, sin embargo, explotar la

²⁵ Hay muchas formas de comprobar esto, entre ellas la activación de los airbag.

totalidad de la potencialidad del manejo de información. Sería bueno poder visualizar, por ejemplo, el valor de la presión de los neumáticos o la composición de los gases de escapes medidos por la sonda "lambda" (que podrían indicar que el catalizador no está funcionando bien o que el combustible tiene componentes extraños, como agua o aceite).

Pero, además, la computadora podría gestionar toda la información de mantenimiento del vehículo: almacenando la historia de las reparaciones y cambios de componentes, y señalando cuáles componentes deben reemplazarse (mantenimiento preventivo, por ejemplo la correa de distribución), cuáles ha dejado de funcionar (mantenimiento correctivo, por ejemplo alguna lámpara), y cuáles tienen una tendencia que indica que deben reemplazarse en el corto plazo (mantenimiento predictivo, por ejemplo las pastillas de freno).



La computadora de a bordo de un Maserati Coupé.

Dispositivos de información V: medición de la distancia al vehículo precedente

Muchos automóviles de alta gama están incorporando a su dotación de serie un dispositivo que mide la distancia al automóvil precedente, y que emite un sonido o una señal luminosa si los parámetros indican alguna situación peligrosa. Lamentablemente, la mayoría de los conductores es consciente de la peligrosidad de conducir demasiado cerca del vehículo precedente, y a pesar de ello actúa de manera imprudente, no por falta de percepción de la distancia, sino por una decisión racional.



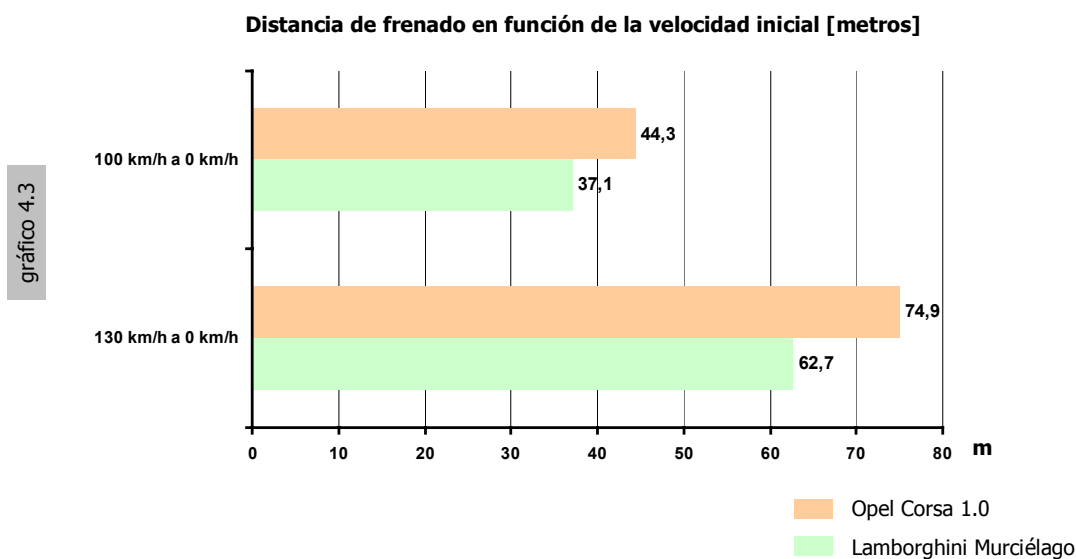
En 1959 la General Motors Company presentó el prototipo Cadillac Ciclone que, entre otros elementos futuristas, tenía en el frente dos dispositivos en forma de cono que medían la distancia al auto que circulaba adelante, indicando con una señal luminosa y otra sonora la proximidad de un vehículo.

Como las distancias de frenado varían con el cuadrado de la velocidad, si al circular a 100 km/h se necesitan aproximadamente 50 metros para frenar, a 130 km/h hace falta el casi el doble de esa longitud. En la práctica, los automovilistas pocas veces mantienen 100 metros de distancia con respecto al automóvil que los precede en una autopista, y la misma situación se repite en otras condiciones de tránsito. Las razones de este comportamiento son difíciles de resumir en pocas palabras, por eso el único comentario acerca de este dispositivo es que probablemente acabe siendo una molestia para muchos conductores, que tal vez opten por ignorar cualquier aviso al respecto.

Dispositivos de control I: velocidad

Desde hace mucho tiempo se logró controlar de manera eficaz la velocidad de los vehículos, a través de los mecanismos de aceleración y de frenado. Hoy en día es

prácticamente imposible que un auto aumente la velocidad sin que medie la voluntad de su conductor, y el verdadero problema reside en frenar el vehículo cuando es necesario. Entre los elementos que ayudan a una reducción de la velocidad eficaz el sistema de frenos ABS (Anti Blocking System) es el dispositivo más promocionado. Este sistema, que previene el bloqueo de las ruedas, reduciendo el deslizamiento de las mismas y permitiendo que el conductor pueda retener el control de la dirección del automóvil para evitar los obstáculos delante de él, está siendo incorporado como equipamiento de serie en casi todos los vehículos de producción. Pero lo cierto es que la capacidad de frenar de los automóviles modernos se apoya en una serie de medidas y elementos que no se limitan al control del bloqueo de las ruedas. Hay distintas maneras de diseñar el circuito de freno de manera de minimizar las consecuencias del mal funcionamiento de algún componente, como los dispositivos cruzados (se frena la rueda delantera derecha junto con la trasera izquierda y viceversa). También existen dispositivos que regulan la presión hidráulica de cada freno en función del equilibrio de masa del vehículo, con lo que se logra reducir las distancias de frenado. La lista continúa, por ejemplo con un asistente hidráulico que actúa en el momento en que detecta una frenada brusca, ejerciendo una presión mayor a la habitual para ayudar al conductor a frenar más rápido. Pero la incorporación de estos elementos sofisticados puede conducir a una situación muy grave. La distancia de frenado no depende únicamente de la presencia del sistema ABS. En la actualidad hay muchos vehículos que todavía tienen frenos a tambor en las ruedas traseras (los automóviles de menor prestación), y parece que no se hace el adecuado análisis de valor para la decisión de no dotar al auto de frenos a discos autoventilados en las cuatro ruedas. A propósito, se puede comprar, por ejemplo, la distancia de frenado de un Lamborghini Murciélago y la de un Opel Corsa 1.0, de acuerdo a los datos de sus pruebas de manejo (6):



Lo curioso de estos resultados es que **ambos vehículos ensayados tenían frenos con sistema ABS**. Pero la diferencia en las distancias de frenado no se limitan a que el Lamborghini tiene frenos a discos autoventilados en las cuatro ruedas, mientras que el Opel tiene frenos a discos sin ventilar en las ruedas delanteras y a tambor en las traseras. También influyen el ancho de los neumáticos, el compuesto de los mismos, y las masas de los vehículos, entre otros factores. Lo cierto es que este parece ser un buen ejemplo de cómo una información incompleta puede inducir a crear una falsa sensación de seguridad, llevando a un automovilista a pagar un costo extra por un

sistema ABS, cuando probablemente **sería mucho más útil para su seguridad y la de sus acompañantes, reclamar que le coloquen frenos más potentes y eficientes en todas las ruedas.**

Dispositivos de control II: trayectoria

La trayectoria del vehículo depende de dos factores: de la voluntad del conductor, quien a través del volante dirige el automóvil, y de la interacción de las fuerzas actuantes sobre las ruedas, o sea, las de tracción y rozamiento. A veces ocurre que un automovilista levanta el pie del acelerador antes de circular por una curva pronunciada, cuando percibe que su velocidad es muy alta por ejemplo, y si el auto tiene tracción trasera lo más probable es que la cola del vehículo se desplace hacia fuera y la trompa hacia dentro de la curva, iniciando un giro violento que sólo los conductores expertos pueden controlar. Este fenómeno, denominado sobreviraje, se presenta exclusivamente en los autos con tracción trasera. La tracción delantera conduce al caso inverso, es decir, el subviraje, donde el auto tiende a seguir en una trayectoria recta, poniendo al automovilista menos experto en una situación más fácil de corregir. Otras veces una de las ruedas motrices patina en una superficie resbaladiza y genera diferencias relativas en las velocidades de rotación de cada neumático que pueden hacer que se desplace repentinamente en una dirección no deseada. Para este último problema existen numerosas soluciones que incluyen el control electrónico de tracción y la transferencia de parte de la fuerza de tracción de una rueda a otra (o de un eje a otro en el caso de los autos de tracción en las cuatro ruedas) utilizando un fluido viscoso u otra solución. En función de estas situaciones potencialmente peligrosas la mejor alternativa en cuanto a asegurar un óptimo control de trayectoria es, por varias razones, la tracción integral permanente.



Un Audi S4, con tracción permanente en las cuatro ruedas.

Algunos vehículos modernos incluyen esta solución pero, como genera un mayor consumo de combustible, un mayor costo de producción debido a la complejidad mecánica del dispositivo, y un menor espacio en el habitáculo, su difusión se encuentra limitada. Este es otro ejemplo más de una característica de la seguridad que no se aplica, **eligiendo dotar a los automóviles de tecnologías que son algo menos seguras que la mejor de las alternativas.**

Dispositivos de control III: estabilidad

La estabilidad del vehículo, entendida como la capacidad de permanecer con sus cuatro ruedas apoyadas en el camino, depende en gran medida del tipo de suspensiones y de la posición del centro de masa. Algunos vehículos están comenzando a incorporar sistemas hidráulicos que modifican la dureza de las suspensiones de cada eje o de cada rueda en función de la distribución de masas en el vehículo, eliminando casi por completo el balanceo longitudinal o transversal al frenar o doblar, de manera similar al sistema impuesto de serie en los automóviles Citroën desde que lanzó el revolucionario modelo DS, allí por el año 1955. La otra característica de las suspensiones modernas es la capacidad de modificar la magnitud de su desplazamiento en sentido vertical, para adaptarlas al estilo de conducción.

Un manejo de tipo deportivo, a altas velocidades, exige suspensiones con menos desplazamiento, para evitar el peligroso balanceo del automóvil (sobre todo en las curvas), pero al regresar a la circulación en la ciudad, el confort requiere de suspensiones más blandas, que absorban las oscilaciones que generan las imperfecciones del trazado urbano. Así es que en general se ofrece al conductor la posibilidad de seleccionar una de entre tres tipos de suspensiones: normal, urbana, o deportiva.



El Citroën DS tenía en 1955, entre otras características novedosas, un sistema de estabilización que actuaba sobre las suspensiones.

Dispositivos de control IV: confort de los ocupantes

La fatiga del conductor es uno de los factores que pueden desencadenar un accidente, por lo tanto el confort interior de los automóviles debe ser tal que asegure una buena posición de manejo y evite el cansancio, posibilitando de esta manera un perfecto control del vehículo. El estudio anatómico de los asientos y de los elementos de control hace del interior del automóvil un ámbito confortable, a lo que se agrega la posibilidad de diversas regulaciones de los asientos y del volante. Por otro lado todos los vehículos aumentan el confort de los ocupantes a través de diversos equipos de audio, innumerables compartimientos para sostener bebidas u otros elementos. En muchos modelos se gestiona la climatización interna a través de un sistema que regula la temperatura del flujo de aire hasta alcanzar los valores indicados por el conductor. Otro ejemplo del nivel de sofisticación alcanzado en el confort lo ofrecen algunos autos que incorporan ventiladores pequeños en el interior de los asientos para refrescar a los automovilistas de una manera más eficiente. Sin dudas el confort de los automóviles

es más que suficiente, aunque ese desarrollo puede derivar en otro problema. La contrapartida de las ventajas del aumento de la tecnología presente en el interior del automóvil es la profusión de los elementos que pueden generar distracciones, como el navegador satelital, la televisión o la computadora de a bordo, los equipos de audio con múltiples discos, el teléfono celular, entre otros. Por eso los diseñadores también están desarrollando otros sistemas, como la activación de funciones a través del reconocimiento de voz, que deberían minimizar estas pequeñas distracciones que atentan contra el control seguro del automóvil.



El interior del Maybach refleja el extremo superior del nivel de confort interior de los automóviles actuales.

4.4. Seguridad de impacto

A diferencia del desempeño de los dispositivos que contribuyen a la disminución de la cantidad de accidentes, los que deben minimizar su gravedad apenas alcanzan para cubrir algunas de las situaciones más comunes. En consecuencia, lo que sigue a continuación es un breve análisis de las capacidades y limitaciones de los dispositivos de seguridad de los automóviles modernos que actúan frente a un impacto.

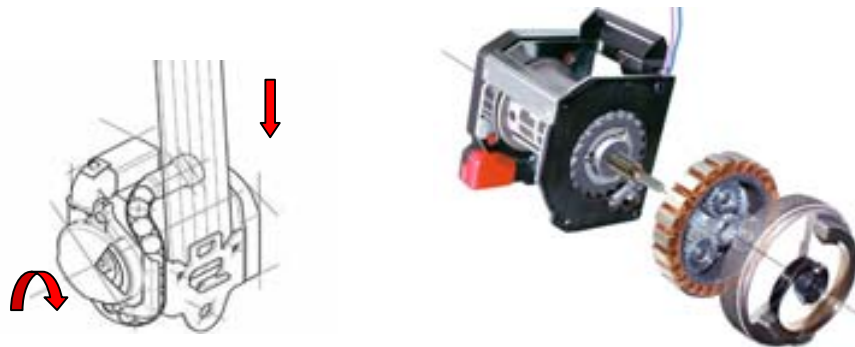
Dispositivos de preparación preliminar

Todo el drama de un accidente de tránsito se desarrolla en un instante de tiempo que se mide en décimas de segundo. Desde el momento en que se produce el impacto hasta que el vehículo detiene su marcha transcurren apenas dos o tres décimas de segundo (esa cantidad depende de la velocidad del impacto), y **todo lo que sucede en el transcurso de ese breve período es de importancia capital para el resultado del accidente y su efecto sobre las víctimas**. Por otro lado, dentro de ese pequeño lapso de tiempo ocurren dos accidentes distintos: el del vehículo contra el objeto que se impacta, y el de los ocupantes que chocan contra el interior del automóvil. Y es precisamente ese pequeño intervalo de tiempo el que los diseñadores aprovechan para preparar al ocupante y al vehículo para el segundo impacto, que es el responsable del daño que sufrirán los automovilistas. En ese tiempo los dispositivos actuales se ocupan de:

- optimizar la sujeción de los ocupantes (pretensionador del cinturón de seguridad).
- preparar la superficie interna para absorber la energía de los impactos (airbag).
- otras acciones preventivas.

Los dispositivos de preparación preliminar más importantes con los que cuentan los vehículos modernos son los que se detallan a continuación:

Pretensionador del cinturón de seguridad

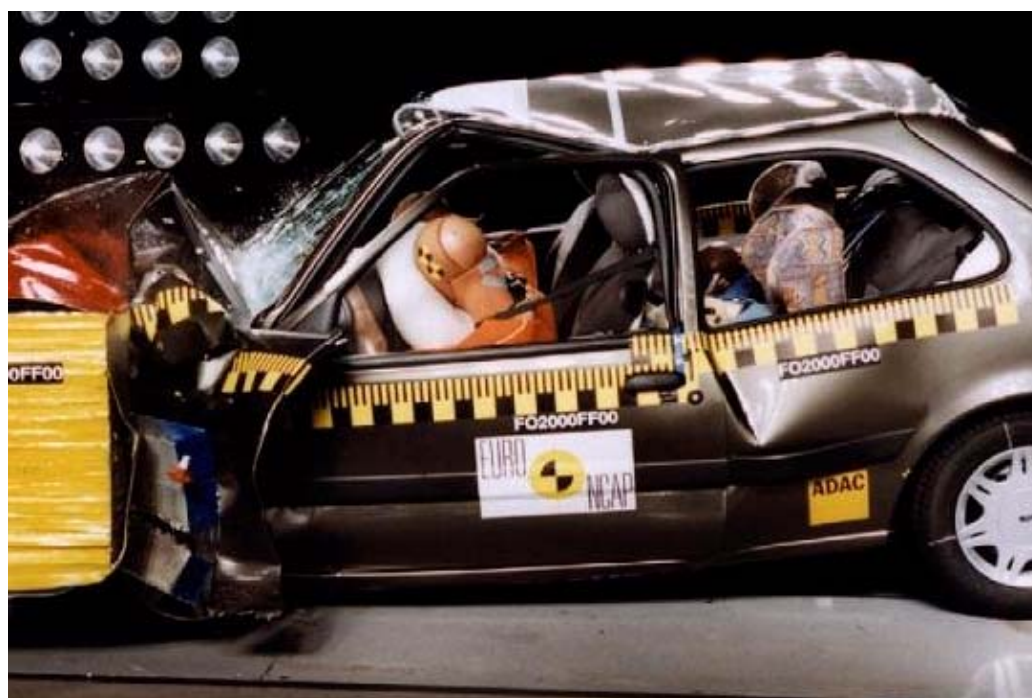


En un principio los cinturones de seguridad de tres puntos no permitían el movimiento hacia delante de los ocupantes, tal como lo hacen los que hoy se denominan "inerciales". La razón de esta modificación tiene su origen en la lógica negativa de los automovilistas a usar elementos de seguridad que impliquen un cierto grado de incomodidad. De ahí que los cinturones de seguridad modernos permitan el libre movimiento

del ocupante, hasta el momento en que ocurre el accidente, cuando el sistema que detecta el movimiento brusco hacia delante traba el mecanismo. Pero ese pequeño retardo en la activación de la traba, sumado a la elasticidad del material del cinturón, hacen que el automovilista se desplace hacia delante una cierta cantidad de centímetros que pueden ser esenciales al momento de determinar la supervivencia de la víctima del accidente. Entonces se ha desarrollado un sistema que se anticipa al movimiento del ocupante, ejerciendo una fuerza de tensión en el cinturón de seguridad desde el momento mismo del inicio del primer impacto. Esto se logra a través de diversos mecanismos, que incluyen por ejemplo el disparo de una carga explosiva, o el accionamiento electromagnético, entre otros.

Airbag

Existen dos interpretaciones completamente distintas acerca de la función desempeñada por el airbag. Según la norma europea –vigente en casi todos los países del mundo–, el airbag es un sistema de sujeción que complementa al cinturón de seguridad. En cambio de acuerdo a la legislación de los Estados Unidos, el airbag debe actuar como un medio de sujeción alternativo al cinturón, y esta es la razón de las diferencias que existen entre ambos dispositivos. El airbag de norma europea, denominado SRS²⁶, tiene unas dimensiones bastante menores a la de su equivalente norteamericano, por lo tanto alcanza un menor volumen, y el proceso de inflado se realiza con una menor violencia (7). Así, este último tipo de airbag se puede considerar un sistema capaz de absorber impactos sin dañar a los ocupantes interponiendo una bolsa de gas entre los automovilistas y las partes duras del habitáculo que se encuentran en la trayectoria de quienes sufren un accidente. Por eso, en lo que hace a este trabajo, el airbag de norma europea se considera como un dispositivo de preparación de las superficies internas, anticipándose al impacto de los ocupantes.



En la foto se observa claramente como en este impacto frontal el ocupante del vehículo es lanzado hacia un costado por el airbag frontal exponiéndolo a un impacto contra las superficies internas del vehículo.

²⁶ "Supplementary Restraint System", es decir "Sistema de Sujeción Suplementario".

Otras acciones preventivas

Un ejemplo de otras acciones preventivas se encuentra en algunos vehículos Mercedes-Benz quienes al detectar varias situaciones críticas en una etapa temprana (las frenadas bruscas por ejemplo) inician medidas específicas para proteger a los ocupantes. En ese momento se activan los pretensionadores reversibles de los cinturones de seguridad como precaución, y se ajustan las posiciones de los asientos delanteros. Si se detecta un marcado sobreviraje o subviraje, que implican un serio riesgo de vuelco, se cierra el techo corredizo de estar abierto. De todas maneras se debe recordar que los tiempos que transcurren mientras que se produce y termina el accidente, o sea un intervalo de pocas décimas de segundo, obligan a actuar decida y violentamente para anticiparse a la secuencia de eventos. Así, para ajustar la posición de un asiento delantero o cerrar el techo corredizo en 0,1 segundos se necesitan fuerzas de acción casi instantánea, que en general requieren un adecuado control para evitar daños colaterales, y que, además, pocas veces pueden proveerse eficientemente.

Dispositivos de preservación del espacio vital

Una vez que el accidente ocurre los ocupantes corren un serio riesgo de que algún elemento extraño los golpee, incluyendo algunos elementos del propio vehículo. En este caso en particular no se hace referencia al choque del ocupante contra el automóvil, que es un hecho inevitable como consecuencia de la inercia del automovilista, sino de la intrusión en el habitáculo de objetos externos, o de su aplastamiento por parte de la carrocería, incluyendo por ejemplo el desplazamiento del motor hasta ocupar el espacio de los ocupantes. En esta situación los dispositivos de seguridad de los que disponen los automovilistas son la estructura del automóvil, las puertas y superficies vidriadas que deben actuar de manera complementaria, para evitar que la violación de ese espacio vital que asegura una adecuada probabilidad de supervivencia. A partir de este momento se van a englobar los tres elementos nombrados bajo el concepto "carrocería del automóvil", indicando la manera en que ésta preserva el espacio vital de los ocupantes en los siguientes aspectos relevantes:

- deformación de la carrocería ante impactos frontales.
- deformación de la carrocería ante impactos laterales.
- deformación de la carrocería ante vuelcos.
- permeabilidad de la carrocería a la intrusión de objetos.

Deformación de la carrocería ante impactos frontales

Las carrocerías actuales se diseñan de manera de permitir su deformación progresiva, a fin de reducir la magnitud de la desaceleración del vehículo durante el impacto. Se estudia, además, cuidadosamente la manera de distribuir las fuerzas hacia toda la estructura, en un intento por preservar el espacio ocupado por las personas en el interior, buscando un delicado equilibrio entre zonas rígidas y deformables. Y con los años los diseños son más eficientes, tal como se verifica en muchos ensayos. El problema fundamental de estos estudios es que limitan la velocidad de la prueba a sólo 64 km/h, es decir, que se desconoce qué ocurre con el habitáculo en accidentes a mayores velocidades. Además, es **bastante frecuente observar en choques de la vida real de-**

formaciones importantes de la carrocería, lo cual da un indicio del pobre desempeño de este dispositivo de seguridad en el aspecto analizado.



Esta fotografía del ensayo de un Peugeot 406 muestra una evidente deformación del habitáculo en un impacto frontal a una velocidad de 64 km/h. Sería de mucha utilidad poder observar qué ocurre con el habitáculo a velocidades de hasta 130 km/h.

Deformación de la carrocería ante impactos laterales



La estructura del Vel Satis no opone prácticamente ninguna resistencia al avance del poste dentro del habitáculo en este choque a 50 km/h, permitiendo que éste ocupe el espacio vital del conductor y que lo desplace hacia la derecha.

Todo indica que las diferencias entre la capacidad de la carrocería de un automóvil moderno de mantener las dimensiones del espacio vital en el caso de un impacto frontal y la misma capacidad en un impacto lateral son importantes. No sólo porque la distancia entre el ocupante y el extremo del vehículo es mucho mayor en el primero que en el segundo, sino porque la rigidez de la carrocería es mucho mayor en el sentido longitudinal que en el transversal. Esto genera que, inclusive en accidentes que ocurren a velocidades muy limitadas, se produzca una gran deformación del habitáculo, como por ejemplo en el caso de los ensayos de impactos laterales, donde una columna golpea a 50 km/h el costado del automóvil. De esa doble combinación fatal que significa una mínima distancia entre el exterior del automóvil y el habitáculo, y una escasa resistencia mecánica surge el hecho que hace que en los ensayos mencionados la columna penetre hasta ocupar el espacio del conductor, aplastándolo y lanzándolo contra el acompañante. En otras palabras, entonces, los vehículos modernos (inclusive aquellos considerados como los más seguros del mundo) no cuentan con un dispositivo de protección eficaz que pueda preservar el espacio vital de los ocupantes en caso de un impacto lateral, inclusive a bajas velocidades.

Deformación de la carrocería ante vuelcos

Los vuelcos son un tipo de accidente particularmente grave, donde una variedad de parámetros determinan la probabilidad de supervivencia de los protagonistas. La cantidad de vueltas que da el auto, la superficie contra la que termina el proceso, y la posibilidad de rescatar rápidamente a los ocupantes si el vehículo quedó con las ruedas hacia arriba en zonas donde hay agua, como ocurre en el costado de muchas rutas o caminos, entre otros, son factores de vital importancia. Pero la cantidad de ensayos que se realizan al respecto es mínima, aunque lo que se puede observar de los accidentes comunes es que hay pocos vehículos que resisten un vuelco sin que parte de la carrocería se deforme. Además, en este tema existe un elemento que es representativo de lo que muchas veces sucede con los dispositivos de seguridad, y que tiene algunos puntos de contacto con el ejemplo mencionado anteriormente de los frenos ABS. Por un lado, muchos fabricantes desarrollan sistemas complejos y eficientes que actúan automáticamente en caso de producirse un vuelco. Por ejemplo en algunos autos convertibles donde el diseño exterior impone quitar las barras poco estéticas que aseguran la protección de los ocupantes, se han impuesto sistemas de activación automática que permiten que esas barras permanezcan escondidas hasta el momento en que son necesarias.



La mayoría de los automóviles convertibles tienen, por razones estéticas, dispositivos de activación automática ante vuelcos.



Muchas estructuras modernas no son capaces de resistir el propio peso de la carrocería y se deforman peligrosamente.

Pero por el otro lado se pueden observar estructuras que se deforman inclusive bajo la acción del propio peso de la carrocería. Además, mientras mayor sea la velocidad del

incidente, y mayor la cantidad de vueltas sobre sí mismo que da el vehículo, mayor será la deformación del habitáculo y mayor también el peligro que corren los ocupantes de ser aplastados. Bastaría entonces reforzar la estructura adecuadamente, utilizando un mayor espesor de material, o agregar tubos resistentes (como en los automóviles de Rally) para que el espacio vital se mantenga indemne. Por lo tanto, una vez más, se deja de lado la solución definitiva de un problema mucho más sencillo de resolver, concentrando esfuerzos en dispositivos sofisticados de menor eficacia al momento de proteger a las víctimas de un accidente.

Permeabilidad de la carrocería a la intrusión de objetos

Uno de los principales problemas de la seguridad en los impactos es la baja resistencia que oponen las superficies vidriadas a cualquier tipo de intrusión. Es que, paradójicamente, los vidrios no están diseñados para evitar que los objetos que los impactan no penetren en el habitáculo. De todos ellos es el parabrisas el que ofrece la mayor resistencia, a través de una estructura formada por dos laminas de vidrio unidas por una capa de material plástico (en la actualidad PVB – Polivinil Butireno), de acuerdo al desarrollo de un inventor inglés, John C. Wood, quien patentó el primer vidrio laminado en 1905, denominado "Triplex". Este diseño permite evitar una de las peores heridas que se generan en un choque frontal, cuando la cabeza de los ocupantes delanteros que no usan cinturón de seguridad penetra en el parabrisas de vidrio común, abriendo una brecha mortal formada por fragmentos filosos, que se cierran sobre la garganta de la víctima cuando ésta retrocede al detenerse el vehículo. Los parabrisas laminados no permiten que se formen astillas peligrosas, ya que los vidrios quedan retenidos en la matriz plástica, y de esta manera se reduce la probabilidad de heridas en el cuello. Pero la resistencia mecánica del parabrisas es insuficiente para detener los objetos que lo impactan, sobre todo a altas velocidades. Así los ocupantes corren un serio peligro al ver invadido su espacio vital por objetos potencialmente peligrosos.



La relativa fragilidad del parabrisas permite que penetren en el habitáculo objetos potencialmente peligrosos.

La situación empeora al considerar la protección que ofrecen las ventanillas, formadas por vidrio templado, que se rompe en miles de astillas casi ante el mínimo contacto, dejando completamente expuestos a los ocupantes. Otra consideración adicional acerca del parabrisas es que es un excelente ejemplo de la **falta de sinergia** de los elementos que protegen a los ocupantes en caso de impacto. En la actualidad la mayoría de los países obligan a los fabricantes a proveer a sus automóviles de airbag, a lo que se le suma el uso compulsivo del cinturón de seguridad. Pero si esto se cumple no hay manera de que los ocupantes corran peligro de golpear con la cabeza el parabrisas y traspasarlo. Por lo tanto, el papel que cumplía el parabrisas de vidrio laminado perdió sentido, **y se precisa definir una nueva función para este dispositivo**. Así, bajo estas consideraciones, sería mucho más beneficioso para la seguridad de los ocupantes en caso de accidente frontal que el parabrisas tuviera una mayor rigidez, hasta el punto de tener la capacidad de evitar cualquier tipo de intrusión, de manera similar a la función que cumplen los vidrios blindados en algunos automóviles. Esto generaría una serie de inconvenientes que vale la pena analizar más adelante, cuando se analicen las mejoras posibles.

Dispositivos de reducción de la magnitud de la desaceleración

Varios años atrás los automóviles eran mucho más rígidos que los actuales. El espesor del acero era mayor, y tanto el habitáculo como el resto del vehículo se deformaban sólo un poco, inclusive ante impactos violentos. Pero a través de esto se exponía a los ocupantes del auto accidentado a altas aceleraciones, potencialmente dañinas. Por esto se empezaron a diseñar carrocerías que se deformaran progresivamente ante un impacto, reduciendo de esta manera la desaceleración del habitáculo.



En este dibujo se pueden observar las estructuras encargadas de deformarse progresivamente ante el evento de un impacto delantero o trasero (en color amarillo).

En los próximos capítulos se hará un análisis de la forma en que se deforman las carrocerías actuales y la aceleración que generan en el habitáculo, aspecto que necesita de la introducción de algunos conceptos físicos y varios datos empíricos que exceden el objetivo de este capítulo. Sin embargo, y antes de hacer ese análisis, se puede decir que para estos dispositivos valen casi las mismas consideraciones que para la capacidad del automóvil de preservar el espacio vital. O sea, que el automóvil debe asegurar que la desaceleración del habitáculo sea de una magnitud menor a la tolerable por el cuerpo humano en el caso de accidentes frontales, laterales y traseros, y todos por igual. Sin embargo, la eficacia de la carrocería al momento de cumplir con este objetivo varía bastante en función del tipo de choque. A simple vista se puede observar que la distancia que existe entre el espacio ocupado por los ocupantes del automóvil y el frente del mismo es mucho mayor que la distancia medida desde el automovilista hasta el lateral del vehículo. Lo que equivale a decir que las capacidades de reducción de la aceleración (que dependen de esa longitud, entre otras cosas) no son las mismas. A esto se le suma el hecho que la forma en que la carrocería absorbe la deformación también varía con el punto de impacto y la dirección de las fuerzas que se ejercen sobre el automóvil, y que inclusive en otros choques frontales la desaceleración puede ser distinta para cada caso.

Dispositivos de sujeción

Como se dijo anteriormente, una vez que el automóvil sufre un accidente comienza a detenerse mientras sus ocupantes continúan en movimiento. En vista de esto es absolutamente necesario sujetar a los automovilistas para evitar que sean despedidos del vehículo, o que choquen violentamente contra las superficies internas. Se debe tener cuenta, además, que según los medios utilizados, esta sujeción puede tanto ser la causa de cierto tipo de heridas peligrosas, como exponer a los ocupantes a altas aceleraciones.



Décadas atrás los pilotos de Fórmula 1 se exponían a peligros que sus colegas de la actualidad no aceptarían.

El inconveniente adicional de la manera en que se sujeta a las personas que sufren un accidente de tránsito es que el cuerpo humano permite movimientos relativos entre sus distintas partes, como por ejemplo el balanceo de la cabeza que puede dañar severamente a la víctima (una de las heridas más comunes en impactos traseros). Así es que, para tener un conocimiento adecuado de los dispositivos de sujeción disponibles en la actualidad, es necesario agruparlos de acuerdo a su función:

- sujeción del cuerpo en general.
- sujeción de la cabeza.
- sujeción de las extremidades.

Sujeción del cuerpo en general

El dispositivo que sin dudas marcó un cambio de época en la seguridad de los ocupantes durante un accidente es el cinturón de seguridad. Los cinturones de seguridad

se desarrollaron a principios del siglo XX, fundamentalmente como un medio de sujeción de los pilotos de aviones, en un momento estos últimos no tenían "cockpits" cerrados, y por lo tanto, sin ellos, en cada giro del avión el piloto se exponía a ser expulsado al vacío. Cuarenta años más tarde, algunos automóviles comenzaron a ofrecerlos, en general como dotación opcional, hasta que en la década del '80 varios países obligaron a los automovilistas a usarlos permanentemente. En la actualidad han probado ser uno de los factores más importantes en la marcada disminución de víctimas de los accidentes (medida en muertos por kilómetro recorrido) que se ha dado en las últimas décadas. Sin embargo, el cinturón de seguridad en uso en la actualidad (cinturón de tres puntos) está diseñado para sujetar adecuadamente a los ocupantes en el caso de un solo tipo de accidente: los impactos frontales puros. Si la dirección del impacto no está alineada con el eje longitudinal del vehículo se produce la rotación del mismo, que puede hacer que la sección superior del cinturón no sea capaz de retener por completo el cuerpo del ocupante, que también gira y tiende a salirse del cinturón. Además, en los choques laterales el cinturón de seguridad actual permite el desplazamiento hacia los costados, y en los choques traseros cumple una función secundaria, al evitar el rebote del automovilista hacia delante tras golpear el respaldo del asiento. Por otro lado en los vuelcos tampoco logra evitar que los ocupantes sean lanzados contra el interior del automóvil en cada vuelta del vehículo.

Algunos de estos inconvenientes se pueden solucionar con otro tipo de sujeción, como la que proporcionan los cinturones de cuatro, cinco o seis puntos. Otros, como el fenómeno que se produce cuando el ocupante se sumerge por debajo del cinturón de seguridad en algunos choques frontales muy violentos necesitan de elementos complementarios, como un tipo especial de airbag que se coloca en el extremo del asiento y que impide los desplazamientos hacia delante.



El cinturón de 3 puntos está diseñado para sujetar correctamente a los ocupantes en choques frontales puros.

Un último comentario acerca de los medios de sujeción tiene que ver con que muchas veces los esfuerzos por proteger al conductor o a su acompañante quedan empañados si son embestidos por otro ocupante del vehículo que, al no estar sujeto, se desplaza a la velocidad que traía el automóvil al momento de chocar. Esto es particularmente peligroso en el caso en que los ocupantes traseros no tengan puesto su cinturón de seguridad, teniendo además en cuenta que de acuerdo a las estadísticas de Japón (que pueden representar lo que ocurre en la mayoría de los países desarrollados), el 90% de los conductores usan cinturón de seguridad, al igual que el 80% de los acompañantes, pero en el caso de los ocupantes traseros **ese índice baja al 20%** (8).

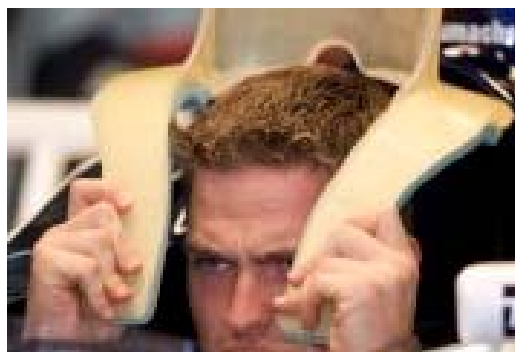
Sujeción de la cabeza

En el cuerpo humano el único movimiento relativo que implica un serio riesgo es el del cuello. En un choque las extremidades superiores e inferiores se mueven casi libremente, pero a menos que golpeen algún objeto no corren peligro por el sólo hecho de moverse. En cambio un movimiento brusco y violento del cuello puede generar daños severos en la médula espinal, que derivan en discapacidades de tipo permanente, o inclusive en la muerte instantánea. Según los expertos el movimiento hacia delante del cuello en el caso de accidentes frontales no es particularmente peligroso, pero sí lo es

el movimiento hacia atrás, e inclusive hacia los costados²⁷. Para evitar el desplazamiento de la cabeza hacia atrás en los choques traseros se ha dotado desde hace muchos años a los autos con los apoyacabezas. Sin embargo, muchos conductores y ocupantes establecen su posición de manejo de manera de que su cabeza queda muy alejada de dicho dispositivo, y así se produce un cierto desplazamiento, que por menor que sea, alcanza para producir algún tipo de daño. Para evitar esto algunos fabricantes proveen sistemas activos que empujan el apoyacabezas hacia arriba y hacia delante, acercando de esta manera el dispositivo a la cabeza del ocupante, y minimizando el desplazamiento de ésta, y por lo tanto disminuyendo el riesgo de heridas en el cuello. Por otro lado, existe un dispositivo diseñado para proteger al automovilista de los movimientos bruscos hacia los costados de la cabeza, cuyo uso se ha hecho obligatorio el año pasado en la Fórmula uno: el HANS (Head And Neck Support), a propósito del cual la mayoría de los expertos coinciden en que se trata de una protección muy eficiente. En un estudio de la SAE el autor concluye (9):

"[El dispositivo] HANS provee reducciones sustanciales de la probabilidad de sufrir heridas, comparado contra la falta de utilización del HANS. Adicionalmente, no se han generado heridas debido al HANS".

En bastante improbable que los ocupantes de automóviles acepten circular con un dispositivo tan incómodo (similar a un cuello ortopédico), pero lo cierto es que es necesario restringir el movimiento de la cabeza hacia los costados en caso de accidente lateral, y en la actualidad ningún automóvil ofrece alguna solución satisfactoria al problema. Al mismo tiempo, el HANS es un sistema de seguridad de probada eficacia para minimizar el riesgo indicado que, como tantos otros, **está en espera del momento propicio para su introducción.**



El HANS es un dispositivo de sujeción del cuello que evita los peligrosos movimientos hacia los costados del cuello.

Sujeción de las extremidades

Esto parece ser un problema menor, ya que el automovilista no corre un peligro serio si existe un libre movimiento de las extremidades. Pero lo cierto es que en casi todos los accidentes se producen algún tipo de contacto entre las extremidades y el interior del automóvil. A pesar de que el ocupante tenga colocado el cinturón de seguridad las rodillas golpean en muchos casos el tablero, al igual que otras partes de las piernas pueden impactar objetos duros. En el caso de los brazos los peligros son mucho mayores, no sólo porque pueden generarse lesiones como consecuencia de los golpes contra las superficies internas del vehículo, sino porque durante el movimiento pueden dañar al otro ocupante. Así, si bien la solución de este punto no parece ser de una extrema importancia para minimizar las consecuencias de los accidentes de tránsito **se debe prestar atención a la manera en que se protege a los ocupantes del daño potencial que genera el libre movimiento de las extremidades** (especialmente las superiores) para lo cual los automóviles modernos no cuentan con dispositivo alguno.

²⁷ Este concepto se encuentra ampliado en el próximo capítulo.

Dispositivos de protección ante incendio

El automóvil moderno tiene innumerables elementos que favorecen la propagación de un incendio, que rápidamente puede extenderse al habitáculo, atrapando a los ocupantes que quedan desprotegidos a merced de las llamas. En un auto en general hay muchos materiales combustibles, entre ellos la misma fuente de potencia del motor²⁸, los plásticos y espumas de tableros y asientos, y el caucho de los neumáticos, estratégicamente situados de manera de tener la capacidad de provocar varias fuentes de incendio. Así, una vez iniciado el fuego, las llamas se propagan con una rapidez que evita muchas veces que se lo pueda controlar. Y como el habitáculo no se encuentra aislado de esos elementos potencialmente combustibles, los ocupantes deben salir inmediatamente para ponerse a salvo. Lamentablemente muchas veces las víctimas de un accidente de tránsito quedan malheridas en el proceso, y en estos casos es muy difícil que puedan moverse con la rapidez necesaria para escapar del grave peligro en el que están inmersos (a menos que otros automovilistas presentes en el lugar puedan asistirlos). En consecuencia se debe intentar evitar que se genere cualquier foco de llamas, y de no poder hacerlo, los dispositivos de seguridad deberían ser capaces de:

- a) limitar la extensión del incendio para que no afecte al habitáculo.
- b) extinguir rápidamente el incendio.
- c) asegurar una vía de escape para un rápido socorro de las víctimas.

Los dispositivos actuales no logran satisfacer ninguno de los dos primeros puntos, y sólo lo hacen parcialmente en el tercero, a lo que se debe sumar lo siguiente. Los accidentes con incendios corresponden a un pequeño porcentaje del total de accidentes. Por ejemplo en EE.UU. corresponden al 0,2% del total de los accidentes viales (8). Pero si se considera que su tasa de ocurrencia indica que sólo en ese país se produce **un accidente con un incendio cada media hora**, tal vez se pueda entender que no se trata de un problema menor.



Los incendios que siguen a los accidentes son poco frecuentes, pero una vez iniciados son difíciles de controlar.

Dispositivos que facilitan un pronto socorro

Una vez ocurrido el accidente la probabilidad de supervivencia de las víctimas aumenta notablemente con la rapidez de la atención médica que reciben. En este caso los dispositivos de un automóvil pueden contribuir a través de dos aspectos fundamentales. Por un lado, dando aviso a los centros de socorro más cercanos. En algunos países existen sistemas, como el *Teleaid* (desarrollado por Mercedes-Benz), que activan una señal en el momento en que se despliegan los airbags. Esa señal es recogida por operadores telefónicos que intentan comunicarse con el conductor, y de no recibir respuesta envían ayuda inmediatamente al lugar donde se encuentre el vehículo, cuya localización se realiza a través del GPS. Por otro lado, el vehículo debe favorecer el auxi-

²⁸ En este aspecto los automóviles diesel son mucho más seguros que los que funcionan con nafta, ya que aquél tipo de combustible no se enciende al ser acercado a una llama (sólo combustiona a altas presiones).

lio sencillo y veloz de los ocupantes, permitiendo que las puertas se abran y evitando que las víctimas queden atrapadas por algún componente del automóvil.

Esta capacidad del automóvil de mantener la forma y funcionalidad del habitáculo se relaciona en gran medida con los aspectos mencionados al analizar la forma en que los vehículos preservan el espacio vital de sus ocupantes. El problema que surge entonces es que muchos vehículos presentan deformaciones importantes de la carrocería, inclusive en accidentes a velocidades moderadas, y la posibilidad o no de abrir las puertas del automóvil queda librada al azar, en función de la dirección y magnitud del impacto.



La posibilidad de asistir rápidamente a las víctimas depende en gran medida del tipo y magnitud del impacto sufrido.

Por lo tanto este es un aspecto más de la seguridad a solucionar y que plantea un serio problema que vale la pena discutir con mucha mayor profundidad en los próximos capítulos. Los diseñadores de automóviles deben encontrar la manera de **compatibilizar la necesidad de rigidez de la carrocería** (necesaria tanto al momento de preservar el espacio vital de los ocupantes como cuando se los debe asistir) **con la de contar con una zona capaz de deformarse progresivamente.**

4.5. Seguridad en desarrollo

Hasta aquí se han repasado los dispositivos de seguridad actuales más destacados. En los próximos capítulos se analizará su eficacia, a través del estudio de los sucesos que les ocurren a los ocupantes del auto durante un accidente, de los mecanismos de daños al cuerpo humano, y de la capacidad de esos dispositivos de minimizar las heridas. Pero atendiendo al fin principal del estudio, que es la sugerencia de nuevas maneras de mejorar la seguridad de los ocupantes al sufrir un accidente, se impone hacer una breve recorrida por los dispositivos en desarrollo, de manera de no proponer soluciones que ya están siendo analizadas por los fabricantes. Aunque, como se verá, y desafortunadamente para los automovilistas, **es muy poco lo que se propone para mejorar la seguridad de impacto**. Esto se puede comprobar a través de un breve recorrido por los automóviles conceptuales, que es donde, tradicionalmente, las empresas constructoras de automóviles adelantan, al público y a los potenciales compradores, los adelantos que introducirán en los modelos futuros. Estos autos conceptuales no siempre terminan siendo producidos, sino que en la mayoría de los casos están diseñados para analizar la reacción del mercado ante modificaciones en el diseño o en algunos dispositivos. Muchos de ellos se limitan a un mero ejercicio estilístico, anticipando la tendencia de los próximos modelos que reemplazarán a los vehículos de la gama contemporánea. Pero de vez en cuando alguno de estos "concept cars" se conciben como laboratorios rodantes de soluciones técnicas innovadoras. Automóviles eléctricos o híbridos, vehículos con cámaras que capturan las imágenes del entorno y pantallas que las reproducen y reemplazan a los espejos retrovisores, distintos sistemas de aperturas de puertas, configuración de los asientos, regulación automática de la altura de éstos últimos y una serie de dispositivos que facilitan la entrada y salida de los ocupantes al automóvil y el confort interior, entre varias otras novedades.



El "concept car" Renault Be Bop presentado en el salón de Frankfurt en el 2003 difícilmente se comercialice en este formato aunque, es probable que algunas de las soluciones estilísticas se vean en los próximos modelos de la marca,

A veces estos autos conceptuales llaman la atención de un nicho de mercado lo suficientemente significativo como para justificar su producción en serie. Tal fue el caso, por

ejemplo, del Renault Twingo, o del Volkswagen "New Beetle". Si se observa el posicionamiento de ambos modelos en las gamas de las respectivas marcas, se puede notar que no reemplazaron a ningún modelo, sino que fueron agregados a la oferta, conformando en la práctica un nuevo segmento. Ahora en lo que hace a la seguridad, hay un único automóvil conceptual dedicado por completo a la seguridad en la actualidad, que integra en un solo vehículo la mayoría de las novedades en esta materia que proponen los fabricantes, y que se describe a continuación.

La seguridad en los automóviles conceptuales



El único concept car contemporáneo dedicado a explorar exclusivamente distintas soluciones para mejorar la seguridad: el Volvo SCC.

Los suecos están y siempre estuvieron en la vanguardia de la seguridad vial. Tanto a través de las campañas encaradas por el Estado, como en sus dos marcas de automóviles más representativas (Volvo y Saab), que fueron los precursores de la introducción de la mayoría de los dispositivos de seguridad actuales en sus vehículos de producción en serie. En la actualidad vuelven a demostrarlo a través de la presentación por parte de Volvo, hoy bajo el control del grupo Ford, de un vehículo conceptual destinado a indicar el futuro de la seguridad en los automóviles, llamado Volvo SCC (Safety Concept Car). De acuerdo con las declaraciones de Hans Gustavsson, Gerente de Investigación y Desarrollo de producto de Volvo Cars éste es el objetivo del automóvil:

"La principal ambición de los diseñadores de Volvo al desarrollar el SCC fue facilitar la visión del conductor y lograr que la implementación de la tecnología moderna sirviera de soporte a éste de manera de generar una conducción más segura".

Hay que recordar que el 90% de la información que recibe el conductor es de tipo visual, y de ahí que la mayoría de los dispositivos presentados sean del ese tipo. A continuación se encuentran las características más salientes del prototipo, con una breve explicación del objetivo buscado y de la solución tecnológica encontrada para cada caso:

- **posición ideal de los ojos:** se busca mejorar la visibilidad del conductor a través del ajuste de la altura del asiento y de la posición de los pedales y del volante, de acuerdo a las mediciones de sensores infrarrojos. Lo destacable de este mecanismo es que genera la modificación del interior del automóvil para que éste se adapte al conductor, logrando la posición ideal para cualquier persona, sin importar su talla.



- **mayor visibilidad:** los parantes del habitáculo se modificaron de manera de permitir una mejor visión hacia delante y a los costados. Los parantes delanteros incluyen secciones transparentes realizadas en polímeros de alta resistencia que dejan ver a través de ellas. Los parantes laterales se curvaron hacia adentro, para despejar ese obstáculo de la visión periférica lateral.



- **mejor visibilidad nocturna:** un sistema basado en haces de luz infrarroja proyecta en la parte superior del tablero una imagen en blanco y negro de la porción del camino próxima al vehículo, que permite detectar algunos objetos poco iluminados o difusos.



- **ajuste de flujo de luz:** el haz de luces delanteras se ajusta de acuerdo a la velocidad y dirección del vehículo. En los tramos rectos a altas velocidades el flujo se dirige lo más adelante posible; en cambio al disminuir la velocidad las luces se hacen más cortas, iluminando preferentemente los costados.



- **aviso de colisión inminente:** un radar mide constantemente la distancia con respecto al automóvil precedente. Si la computadora detecta que la distancia es inferior a lo aconsejable, o que ésta disminuye rápidamente, se despliega una señal roja de alarma enfrente a la vista del conductor.



- **eliminación de zona ciega:** existe una zona por detrás del vehículo a la que no se puede acceder mediante los espejos tradicionales de los vehículos actuales. Para solucionar el problema un sensor detecta la presencia de vehículos cercanos, avisando al conductor mediante una señal acústica y una luz roja en el espejo retrovisor externo.



- **luces de freno activas:** si el conductor debe frenar bruscamente las luces de freno trasera comienzan a destellar rápidamente para avisar a los automóviles que circulan detrás.



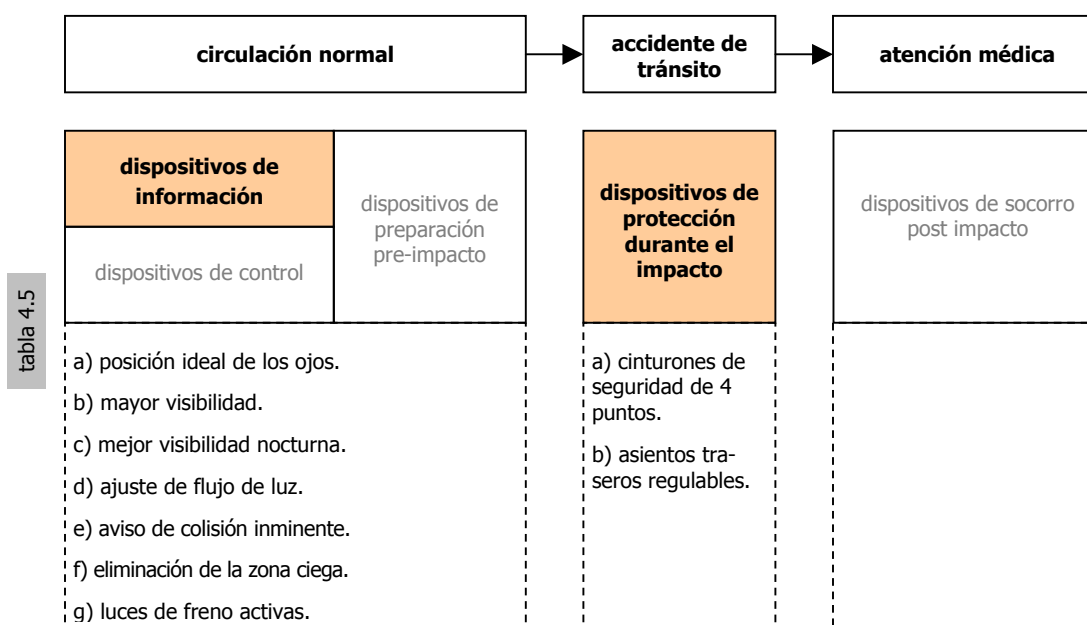
- **cinturones de seguridad de cuatro puntos:** como se ha dicho anteriormente, los cinturones de cuatro puntos son mucho más eficientes que los de tres puntos al momento de sujetar a los ocupantes en caso de accidente, particularmente en los que no son puramente frontales. Se proponen dos soluciones distintas: una con hebilla central, y la otra formada por dos cinturones cruzados en forma de "X".



- **asientos traseros regulables:** la altura de los asientos traseros puede ser regulada en función del ocupante, permitiendo que los niños o que las personas de menor talla se ubiquen cómodamente y de la manera más segura.



Ahora, tras este breve recorrido se impone una reflexión. En el siguiente cuadro se resumen los dispositivos del Volvo SCC analizados, con el agregado de agruparlos según la función que cumplen:



Es decir, que la mayoría de los nuevos dispositivos del automóvil destinado a indicar la tendencia de la seguridad automotriz tienen como objetivo mejorar la seguridad de información, algo en donde los vehículos modernos ofrecen un desempeño casi óptimo. En cambio los únicos elementos novedosos que se refieren a la protección de los automovilistas ante un choque son dispositivos **disponibles desde hace décadas**: las dos versiones de cinturones de seguridad de cuatro puntos y la modificación de la altura del asiento trasero para mejorar la protección de los ocupantes de menor tamaño. O sea que, por lo menos en lo que hace a la información disponible públicamente, **no existen novedades de importancia en lo que se refiere a la protección de los ocupantes durante un impacto**. Para terminar, existen varias tecnologías en desarrollo cuyo objetivo también es evitar los accidentes. En Japón, por ejemplo, existen dos programas, el AVS (Advanced Safety Vehicle) y el AHS (Advanced Cruise-Assist Highway System) que exploran la manera de lograr un sistema de soporte que permita la interacción entre el vehículo y el camino, buscando una circulación de tipo automática (sin intervención del conductor) que sea tanto segura como confortable, confirmando que **la mayor parte de los esfuerzos se dirigen a evitar que ocurra el accidente, y no a minimizar las consecuencias de los impactos**.

4.6. Conclusión del capítulo

Del repaso por las características más importantes de los automóviles modernos, incluyendo sus dispositivos de seguridad, se puede concluir que existen grandes diferencias entre la eficacia alcanzada por los distintos tipos de dispositivos analizados. Aquí es donde se comprueba la utilidad de haber agrupado los elementos de seguridad ofrecidos en los automóviles actuales de acuerdo a aquellos que previenen la ocurrencia de un accidente (información y control) y los que minimizan su gravedad (pre-impacto, impacto y post impacto). En función de esto se observa un gran desarrollo de los dispositivos de información y control que fueron acompañando la evolución de las prestaciones de los vehículos. Estos dispositivos tienen un desempeño casi óptimo, y si bien la introducción de la electrónica permitió desarrollar algunas prestaciones difíciles de lograr a través de otros medios, muchas de las necesidades que se satisfacen hoy en día estaban cubiertas adecuadamente desde los mismos comienzos del automóvil.

Así, mientras los avances en los dispositivos de información y control tienen como objetivo perfeccionar una prestación previamente eficiente, las mejoras en aquellos que protegen a los ocupantes en los impactos son sólo una evolución necesaria para alcanzar una meta insatisfecha. Uno de los aspectos dignos de mención, y que limita la eficacia de los dispositivos de impacto es la falta de sinergia entre los distintos elementos de seguridad. Un ejemplo de esto es la inexistencia de la medición de una multitud de parámetros que permitirían a los dispositivos de seguridad actuar correctamente, en consecuencia éstos se accionan de manera automática, con parámetros fijados por los fabricantes de acuerdo a lo que se supone debería ocurrir en un accidente, y no lo hacen en función del accidente que verdaderamente ocurre. Esta carencia casi absoluta de sensores²⁹ implica una severa limitación para los dispositivos de seguridad, que en consecuencia actúan casi a ciegas. Otro ejemplo citado en este capítulo corresponde al parabrisas, que permite la intrusión de objetos peligrosos al habitáculo en un contexto en donde el vidrio laminado ha dejado de tener el mismo objetivo que tenía antes de la introducción del cinturón de seguridad y del airbag. A lo que se le suma una incorrecta orientación de algunos esfuerzos. Por ejemplo existen muchos automóviles que están provistos de sistemas de freno antibloqueo, pero que al mismo tiempo no son capaces de brindar una reducida distancia de frenado, debido a que no cuentan con sistemas de frenos a discos en sus cuatro ruedas. Es que tal vez exista un exceso de utilización de tecnologías complicadas que demandan el perfecto funcionamiento de una multitud de sensores y dispositivos de accionamiento automático, cuando en muchas ocasiones la probabilidad de supervivencia de las víctimas de un accidente de tránsito depende de una correcta gestión de las energías puestas en juego, que se podría lograr con elementos más simples.

En este contexto, además, no existe información de conocimiento público que indique que se estén desarrollando dispositivos de seguridad de impacto innovadores. Sólo por dar un pequeño ejemplo de una solución innovadora a un problema actual de la seguridad de impacto se puede considerar lo siguiente. Uno de los peligros a los que se exponen los ocupantes de un automóvil es la posibilidad de ser golpeado por algún objeto externo, o inclusive por alguno de los demás ocupantes (especialmente por sus extremidades superiores). Tal vez una solución a evaluar sería aislar por completo a cada ocupante, de manera de generar un espacio vital al que ningún objeto pueda ingresar. Pero en los autos conceptuales presentados por las compañías no

²⁹ Muchos vehículos tienen algunos sensores que indican, por ejemplo, la presencia o no del acompañante para evitar que su airbag se active en caso de accidente, y así ahorrarle a la víctima el costo de su reposición.

hay novedades de relevancia en cuanto a los dispositivos de seguridad en general, y el objetivo fundamental del único vehículo diseñado especialmente en función de la seguridad fue perfeccionar los sistemas de información, aspecto que en la actualidad ya está funcionando eficientemente.

Para complicar más el panorama, los automóviles son cada vez más pesados, más potentes y más veloces, es decir, cada vez más peligrosos, exponiendo a sus ocupantes a impactos con energías de movimiento cada vez mayores. En este capítulo se comprobó que en apenas ocho años uno de los modelos más vendidos del mundo aumentó considerablemente su velocidad máxima, potencia y masa. Esto lo hace potencialmente más peligroso ante los impactos, ya que es capaz de desarrollar una mayor energía de movimiento, exponiendo a los ocupantes a un mayor peligro. Sin embargo, en el mismo período el vehículo en cuestión no introdujo mejoras en la seguridad: la estructura es esencialmente la misma, al igual que los cinturones de seguridad y airbags ofrecidos. O sea, que el Volkswagen Golf de 2002 ofrece simultáneamente unas prestaciones mucho mayores que las del modelo equivalente de 1994 y los mismos dispositivos de impacto, y por lo tanto una menor seguridad. Esta consideración se puede extender al resto de los automóviles modernos ofrecidos en el mercado que se puede comprobar siguen la misma tendencia indicada para el Golf.

En definitiva, tanto en los automóviles modernos como en aquellos que se están desarrollando, se puede decir que se privilegia intentar evitar que ocurra el accidente, probablemente en detrimento de la investigación de las maneras de minimizar los daños una vez que aquél ocurre. Lo cual representa una excelente oportunidad de mejora. Porque a diferencia de otros aspectos, la seguridad de los ocupantes ante un impacto siempre estuvo comprometida, para todos los modelos de automóviles, y para casi cualquier condición de circulación. Es decir, que cuando se mejora un dispositivo de visión o control, como el desarrollo de un sistema antideslizamiento para el mejorar la tracción del vehículo, lo que se hace es perfeccionar algo que ya está funcionando eficientemente. En cambio cuando se mejora un dispositivo de seguridad de impacto, como un nuevo tipo de cinturón de seguridad de cuatro puntos en lugar de tres, lo que se hace es evolucionar hacia un objetivo no alcanzado.

Reflexión

En 1961 John Gordon, presidente de la General Motor Company, se dirigió a su audiencia durante el Congreso Anual de Seguridad con estas palabras (10):

*"La Tesis general de esos ingenieros improvisados es que los coches pueden virtualmente llegar a ser a prueba de choques y a prueba de tontos. Que ese es el único camino práctico para conseguir una mayor seguridad y que se necesitan normas federales para el diseño de los vehículos. Esa Tesis es, por supuesto, **completamente irreal**. [-] La sugerencia de que abandonemos las esperanzas de enseñar a los conductores a evitar los accidentes de tránsito y de que nos concentremos en el diseño de autos que hagan inofensivas las colisiones **es una sorprendente combinación de derrotismo y de expresión de deseos**."*

Más de cuarenta años más tarde un folleto de Mercedes-Benz que trata sobre la historia de la seguridad pasiva en los automóviles comenta acerca de los vehículos del período 1959-1964 (11):

*"Estos vehículos [de producción] no tenían estructuras de seguridad ni zonas deformables progresivamente. Como resultado, no se producían grandes deformaciones, ni siquiera en caso de impactos a altas velocidades y los ocupantes estaban a merced de las correspondientes grandes fuerzas generadas. Sin cinturones de seguridad y con varios bordes afilados en el compartimiento de los pasajeros, **estos vehículos ofrecían poca esperanza de proteger efectivamente a los pasajeros**".*

Hoy se sabe que quien estaba equivocado era John Gordon (y los 25.000 ingenieros y científicos que trabajaban en la General Motor Company en esa época) y no los "ingenieros improvisados" a los que aludía. Los automóviles actuales no son ni a prueba de tontos ni a prueba de choques, pero son mucho más seguros que los contemporáneos a su discurso ante el Congreso Anual de Seguridad. Para ello debieron trabajar muchos miles de personas venciendo la sensación de derrotismo hasta convertir la expresión de deseos en realidad (que aunque imperfecta resulta ser mejor que la de 1961). Ahora bien, ¿qué aspecto de la tecnología de 1961 impedía a los ingenieros diseñar automóviles con estructuras de seguridad, zonas deformables progresivamente, cinturones de seguridad y sin bordes afilados dentro del compartimiento de los pasajeros? La respuesta a esto es: ninguno, **todo lo necesario estaba inventado**. De ahí que se puede imaginar a otro estudiante de ingeniería, muchos años hacia delante, escribiendo otra Tesis similar a ésta, y analizando la seguridad de los automóviles del año 2000. ¿Es posible que se sorprenda de la incapacidad de los ingenieros actuales de diseñar vehículos más seguros, de la misma manera que hoy sorprende la incapacidad de aquellos que en la década de los '60 no pudieron tomar los elementos que tenían a su disposición para mejorar la seguridad del automóvil? ¿Será el gran Dios Auto quien, con su aura de perfección, encandila a los diseñadores, distrayéndolos de sus posibles mejoras? Es que parece ser que cuando se piensa en encontrar al responsable de la tragedia cotidiana de los accidentes de tránsito se entra en una trampa. Se supone que los que fallan son los hombres que conducen, y esto parece lógico porque tranquiliza. Las leyes, los caminos, el sistema de tránsito y el automóvil no generan las mismas dudas. Las personas se sienten seguras suponiendo que si la ley permite circular a 130 km/h es porque el "sistema" se habrá encargado de evaluar que eso no es peligroso para los ocupantes del automóvil. También confían en que quienes diseñan y construyen automóviles lo hacen de manera de que si se choca a la velocidad legal de circulación nada grave suceda. Como decía Ralph Nader, las muertes y heridas, inclusive si ocurren dentro de lo que la ley permite, son consideradas siempre imprudencias o fatalidades, invariablemente responsabilidad del hombre o del Destino, nunca del Estado ni del automóvil. Pero la trampa consiste en olvidarse de que las leyes y los automóviles están hechos por hombres. Quienes, al igual que otros hombres (los que conducen) **muchas veces fallan**.

4.7. Referencias del capítulo

- 1) *Traffic and safety. Harmony, not conflict.* (BMW Group – 5/2001)
- 2) *Miles de millones: pensamientos de vida y muerte en la antesala del milenio.* Sagan C. (SineQuaNon – 1998)
- 3) Revista Quattroruote (*Italia* – 12/2002)
- 4) Revista Quattroruote (*Italia* – 1/1994)
- 5) Cadillac V-16: *worth its weight in prestige.* Ackerson R. (en *Standard Catalog of Cadillac* – Krause Publications – 1991)
- 6) Revista Quattroruote (*Italia* – 9/2002)
- 7) *Effectiveness of ADR 69: a case-control study of crashed vehicles equipped with airbags.* Morris A., Barnes J., Fildes B., Bentivegna F., Seyer K. (Department of Transport and Regional Services – Australian Transport Safety Bureau – 2001)
- 8) *Seat belt usage, and Japanese and Danish road accident statistics.* Nilsson G. (Nordic Road & Transport Research: 3 – 1999)
- 9) *Sensitivity Analysis of the HANS Head And Neck Support.* Gramling H., Hubbard R. (SAE Paper 2000-01-3541)
- 10) *Peligroso a cualquier velocidad.* Nader R. (Editorial Jorge Alvarez – 1966)
- 11) *The history of passive safety.* (Mercedes-Benz, obtenido de su sitio web)



5. Bases para modelos de análisis

"Entusiasta e inexperto, no sabía que a los cañones hay que acercársele sólo de lado o por la parte de la culata. Y él saltó frente a la boca de fuego, con la espada desenvainada, y pensando que les metería miedo a aquellos dos astrónomos. Y en cambio le dispararon un cañonazo en pleno pecho. Medardo de Terralba saltó por los aires. [-] El caso es que al día siguiente mi tío abrió el único ojo, la media boca, dilató la nariz y respiró. La fuerte fibra de los Terralba había resistido. Ahora estaba vivo y partido por la mitad."

Italo Calvino, *El vizconde demediado* (1952).

-
- **Modelos de simulación de colisiones**
 - **Mecanismos de daño al cuerpo**
 - **Resistencia biológica a impactos y aceleraciones**

5.1. Introducción y resumen del capítulo

Para poder evaluar la eficacia de la protección disponible en los automóviles modernos y establecer las bases de la seguridad de impacto es necesario estudiar con anterioridad algunos conceptos teóricos. Este es un breve análisis teórico de distintos modelos de simulación, de los mecanismos de daño y de las tolerancias del cuerpo humano que se corresponde con un recorrido por los conocimientos mínimos indispensables que se deben tener en cuenta para poder lograr la integración de todos los fenómenos que ocurren en un accidente.

Lo cierto es que si bien los fenómenos físicos que ocurren en un accidente de tránsito son extremadamente complejos como para describirlos con exactitud, existen modelos matemáticos que permiten predecir el comportamiento del automóvil y de sus ocupantes con una precisión adecuada para esta Tesis. Esto permite aproximar la secuencia de sucesos mediante cálculos simples, usando sistemas de resortes y masas, que de todas maneras serán suficientes para explicar lo que sucede en un accidente, y lo que debiera ocurrir para minimizar las consecuencias negativas sobre los ocupantes de un automóvil.

En cambio la complejidad de la biología humana es de tal magnitud que todavía no se ha logrado comprender del todo cómo se producen muchas heridas, o en qué medida la aceleración afecta al cuerpo humano, y lo que sigue es apenas una aproximación, en donde se han tomado coeficientes de seguridad generosos que compensan la falta de información precisa y que permitirán evaluar adecuadamente ciertos aspectos de los próximos capítulos. Desde hace mucho tiempo se estudia la forma de evitar lesiones en el cuerpo. Por ejemplo, cuatrocientos años antes de Cristo, Hipócrates señalaba en su tratado de heridas de la cabeza (1):

"De aquellos que se hieren en las partes próximas al hueso o en el hueso mismo, a causa de una caída, el que cae de una gran altura sobre un objeto duro y saliente está más expuesto a una fractura y una contusión del hueso, y su depresión a partir de la posición normal, que el que se golpea sobre una superficie nivelada y blanda; en este último caso, la herida será menos grave, o no se producirá".

Casi 2.500 años después, la rama de la Ciencia que estudia de la problemática de las heridas que se generan en los accidentes de tránsito se denomina "Biodinámica"³⁰. Los avances de los últimos años han sido más que significativos (ayudados por las nuevas herramientas de simulación que permiten las actuales computadoras), y, sin embargo, todavía no son suficientes. En efecto, de acuerdo al doctor Alvin Hyde el estado actual de la "Biodinámica" puede resumirse en el siguiente párrafo (2):

*"En el prefacio de la publicación japonesa [del Handbook of human tolerance – Japan Automobile Research Institute] uno de sus autores, J.H. Mc Elhaney puntualizó idóneamente que el campo de la biomecánica del trauma es como el campo de la mecánica del espacio antes de la época de Kepler, es decir, que en la actualidad la biomecánica del trauma está formada por una multitud de datos empíricos, pero **sin una teoría unificadora que permita extrapolar lo que sucedería en nuevas situaciones.**"*

Un buen ejemplo de esto último es un tipo de herida común que causa el 20% de las muertes por accidentes de tránsito (3) (4) (5). Se trata de un desgarramiento de la arteria

³⁰ Estudio de los efectos de procesos dinámicos, como el movimiento y la aceleración, sobre los organismos vivos.

aorta (la mayor arteria del cuerpo humano) en una zona cercana al corazón, que provoca que la víctima se desangre en pocos minutos a través del tajo. Al día de hoy todavía no está claro por qué ocurre, dado que la lesión se ha observado en personas jóvenes y adultas, en ocupantes con o sin cinturón de seguridad, y que sufrieron accidentes a altas velocidades o a la relativamente baja de 45 km/h. Hay muchos expertos que sostienen distintas teorías que explican el fenómeno e intentan predecir su ocurrencia, pero ninguna de ellas es aceptada como la única válida (2). Por otro lado, es extraño lo frecuente que resulta encontrar palabras como “murió instantáneamente” o “fallecieron en el acto” en un artículo referido a un accidente de tránsito. Pero también es extraño que una muerte de tipo instantánea es en general poco frecuente en otros ámbitos que no sean los choques de autos. Sólo los fenómenos de una violencia exagerada, como por ejemplo una explosión, pueden generar heridas que interrumpen la vida en un instante. Por supuesto que los accidentes automovilísticos también son capaces de provocar esto, por eso la intención de las próximas secciones es reflexionar acerca de los efectos que produce la magnitud de las fuerzas y aceleraciones a las que son expuestos los ocupantes de un vehículo que choca. Fuerzas y aceleraciones enormes, fuera de todo control, extremadamente peligrosas.

Resumen del capítulo

Del análisis de **modelos de simulación de colisiones** se puede deducir que:

- al momento de describir el comportamiento de un automóvil en un choque, el modelo más adecuado es el que propone un sistema de masas y resortes inelásticos
- existen una serie de razones que explican el por qué del descarte de otros modelos propuestos por distintos expertos consultados en la bibliografía (que consisten básicamente en que no se adaptan ni al objetivo ni a la profundidad necesaria del trabajo).

Los aspectos más importantes del análisis de los **mecanismos de daño al cuerpo** son los siguientes:

- los tejidos del cuerpo humano ofrecen una mayor resistencia mecánica cuando el tiempo de aplicación de la fuerza es breve (es decir que en un accidente de tránsito, que dura apenas décimas de segundo, dichos tejidos ofrecen la mayor resistencia posible).
- las heridas al cerebro pueden ser causadas por un impacto directo, o a través de la aceleración de la cabeza (es más peligrosa la aceleración de lado a lado que de atrás hacia adelante).
- las heridas en las extremidades (brazos y piernas) son consecuencia de impactos directos, teniendo en cuenta además, que el movimiento de fragmentos de hueso fracturados genera graves daños a los tejidos musculares y hemorragias internas masivas.
- las heridas en el abdomen también se provocan al sufrir un impacto directo, con la circunstancia agravante que al tratarse de una cavidad hidráulica incompresible, un golpe en un sector del abdomen puede generar un grave daño en otro lugar, alejado del punto de impacto. En el caso del pecho, una contusión en el

pulmón puede causar serios problemas respiratorios, y además de provocar que segmentos enteros del mismo colapsen, disminuyendo el flujo de oxígeno a todas las partes del cuerpo.

- los impactos directos o las altas aceleraciones pueden dañar severamente la médula espinal, un tipo de herida que no se puede tratar médicamente, ya que ningún tratamiento logra su recuperación.
- en definitiva, se puede deducir que un impacto en casi cualquier parte del cuerpo –sobre todo los de tipo violento, como los de los accidentes de tránsito– tiene la capacidad de provocar alguna discapacidad permanente, o incluso la muerte.

Pasando al análisis de la **resistencia a impactos y aceleraciones** de los ocupantes de un vehículo que sufre un accidente, lo importante a tener en cuenta es:

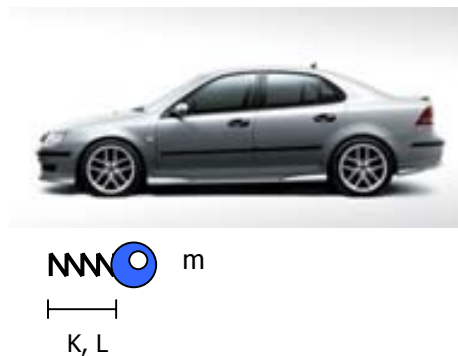
- la increíble y enorme biodiversidad de los seres humanos dificultan dicho análisis, y los expertos no terminan de elaborar una teoría unificadora. Así, las supuestas tolerancias del cuerpo humano se basan casi exclusivamente en resultados empíricos, casi siempre elaborados a partir de ensayos con maniqués u otros elementos mecánicos no biológicos.
- las regiones del cuerpo humano que se deben proteger especialmente, porque presentan serios riesgos de provocar la muerte o una discapacidad permanente al recibir un impacto directo, son: la cabeza; el cuello y médula espinal; el pecho; el abdomen.
- en cuanto a la resistencia humana a la aceleración el desconocimiento es mucho más profundo.
- los únicos ensayos serios se hicieron hace cerca de medio siglo atrás, con pilotos de aviones, para determinar los riesgos a los que se sometería a los futuros astronautas de la NASA.
- así y todo, es posible determinar que la resistencia a la aceleración disminuye a medida que el tiempo de exposición a ella aumenta, y que existen sentidos y direcciones más propicios.
- la dirección que implica menos daños al cuerpo es la transversal al cuerpo, y en sentido de empujar a la persona hacia atrás, justamente lo contrario de lo que ocurre en un accidente de tránsito frontal o lateral (los más frecuentes).
- para terminar, se propone un gráfico que indica la zona peligrosa de aceleración, tomando un importante coeficiente de seguridad que compensa el relativo desconocimiento de este campo de la ciencia.

5.2. Modelos de simulación de colisiones

La enorme complejidad de los fenómenos que ocurren durante los accidentes de tránsito obliga a desarrollar modelos de múltiples variables que sólo pueden ser evaluados a través de simulaciones con computadoras. Se hace imposible incorporar de manera sencilla al análisis la gran diversidad de velocidades, puntos de impacto, masas de los vehículos involucrados o el comportamiento estructural de los mismos. Sin embargo, es posible explicar parcialmente algunos de los sucesos más importantes del choque de un automóvil a través de un modelo simple, como el de masas y resortes. La mayoría de los autores consultados coinciden en señalar que un automóvil se comporta durante un accidente como si fuera una masa unida en su parte anterior a un resorte lineal inelástico (6) (7) (8) (9) (10). Dado que es sumamente útil para el trabajo dar una idea de la secuencia de sucesos y de las magnitudes físicas involucradas es que se va a dar por válido ese modelo, completando el análisis con comentarios sobre algunos modelos matemáticos alternativos propuestos por diferentes autores.

Modelo de un resorte lineal inelástico y una masa

El comportamiento de un automóvil frente a un impacto frontal se puede prever a través de un modelo de una masa y un resorte inelástico, lo cual significa transformar al automóvil en una masa puntual que represente la masa del vehículo, y un resorte inelástico de longitud aproximada a la parte frontal del automóvil:



El coeficiente de proporcionalidad K del resorte corresponde a lo que en la bibliografía en inglés se denomina *stiffness coefficient* (que se llamará de aquí en adelante *coeficiente de rigidez*) y representa la constante de proporcionalidad que caracteriza la fuerza del resorte que se opone al movimiento de una masa que lo comprime o lo estira, tal como postula la Ley de Hooke. Por otro lado m corresponde a la masa del vehículo, y L al largo del resorte, que a su vez se aproxima a la longitud de deformación del frente del automóvil durante un accidente. Sólo para ampliar el concepto de masa y resorte inelástico al resto de los choques el resto del vehículo se podría modelizar de la siguiente manera, para explicar los sucesos de los impactos laterales o traseros:

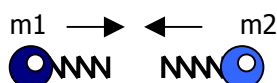


Pero el modelo de un resorte inelástico y una masa no es el único modelo propuesto en la bibliografía consultada. Por eso parece necesario indicar las razones por las que se eligió utilizar ese modelo en particular, indicando las desventajas que presentan las alternativas al sistema resorte inelástico/masa, tal como sigue a continuación.

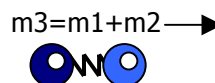
Comentarios acerca de un modelo para dos vehículos

Uno de los textos más citados en la bibliografía consultada es el de Mc Henry quien propone lo siguiente para el caso de colisiones frontales entre dos vehículos (9):

instante previo al choque



instante posterior al choque



Pero ese modelo, en donde los dos automóviles se *unen* y se comportan como un solo cuerpo luego del choque, asume que no existe choque elástico en el momento del accidente entre los dos vehículos, hecho que puede ocurrir sólo a bajas velocidades. Para comprobar esto último se puede tomar como ejemplo el ensayo de un accidente donde un Saab 900 (año 2000) impacta contra un camión Scania R114 Topline a 57 km/h. Si se observa la posición de la rueda con respecto al borde izquierdo de cada recuadro, se puede ver que después del impacto se produce un retroceso del vehículo (se tomó como punto de referencia el borde del camión, que en el ensayo estaba fijo).



Parece prudente, en consecuencia, no considerar el modelo propuesto por Mc Henry para el caso de colisiones entre dos vehículos ya que, una vez más, sólo es útil para colisiones a bajas velocidades, donde no se produce choque elástico.

Comentarios acerca de un modelo de dos resortes lineales inelásticos

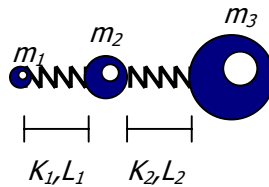
El modelo de un solo resorte lineal inelástico presenta algunos problemas. Por un lado, se basa en datos empíricos para modelizar el comportamiento de una estructura que no siempre se comporta de manera homogénea. Para apoyar este concepto, se puede citar a Neptune (11):

"Los datos disponibles demuestran que el coeficiente de rigidez para un vehículo dado es usualmente diferente para los distintos modos de ensayo de la NHTSA y el IIHS".

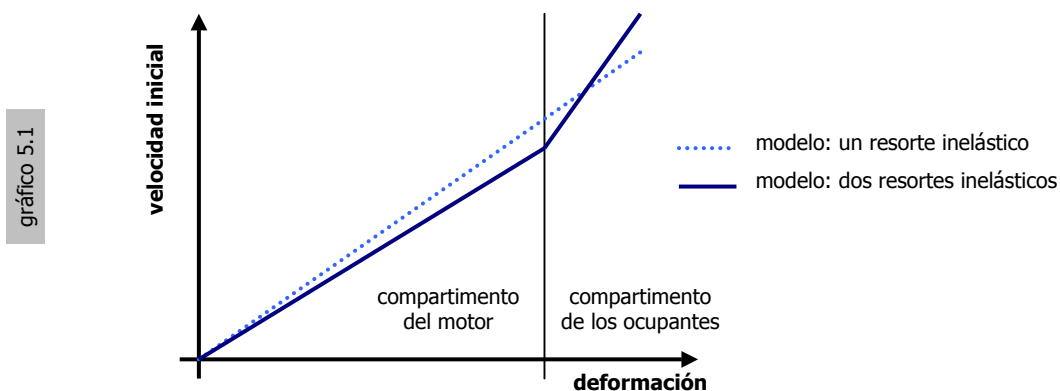
Es decir, que a veces los datos empíricos pueden no ser lo suficientemente consistentes como para inferir los resultados para el modelo con una precisión adecuada. Además, existe otro problema adicional. El mismo autor dice más adelante:

"Pocas veces los vehículos son ensayados a velocidades mayores a 35 millas por hora [56 km/h]. Consecuentemente, los coeficientes de proporcionalidad disponibles se obtienen de impactos que sólo generan deformación en el compartimento del motor".

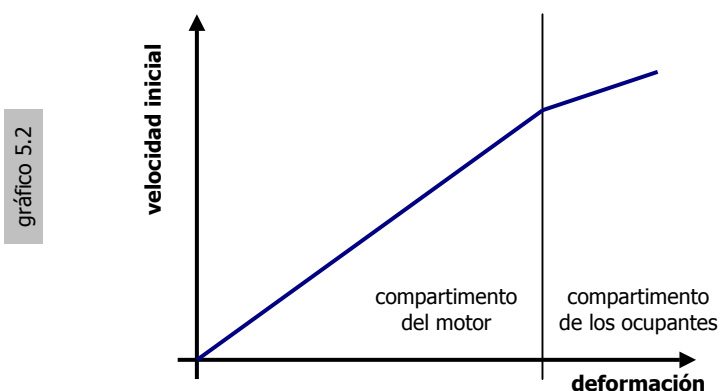
Un análisis lógico lleva a razonar que si la estructura que protege a los pasajeros se refuerza de manera de minimizar las intrusiones, el coeficiente de la misma debería ser distinto al del compartimento del motor. Por eso, otros autores, como el ya citado Neptune, al que se le suma Jawad (6), proponen el siguiente modelo, que se considera más ajustado a la realidad, y que consiste en un sistema de tres masas y dos resortes:



Donde m_1 corresponde a la masa del conjunto frontal, m_2 a la del motor y m_3 a la del compartimento de los pasajeros y el sector trasero del auto. K_1 , K_2 y L_1 , L_2 corresponden respectivamente a los coeficientes de proporcionalidad y a las longitudes de los resortes del sistema, tal como indica la figura. Como la amplitud del movimiento armónico simple es directamente proporcional a la velocidad inicial (la del impacto) el sistema brinda el siguiente gráfico de la deformación del vehículo en función de la velocidad (se agrega, para completar el análisis, el comportamiento del modelo con un solo resorte):



Una aclaración adicional que debe hacerse es que el modelo de dos resortes inelásticos planteado por los autores supone que no existe compresión del segundo resorte hasta tanto no se haya completado la compresión completa del primero. En cuanto a los datos empíricos se puede citar nuevamente el trabajo de Neptune donde se detalla el ensayo de dos vehículos (Ford Escort años 1981/85 y Isuzu Rodeo años 1993/95) cuyo resultado se puede traducir en un gráfico velocidad inicial/deformación (profundidad del choque) del siguiente tipo:



No se indican los valores numéricos porque es preferible concentrarse en la siguiente reflexión: del gráfico se deduce que la deformación del compartimento de los ocupantes ocurre a una tasa mayor que la deformación del compartimento del motor. Puesto en otras palabras, **el coeficiente de rigidez del compartimento donde se hallan las personas dentro del automóvil es menor que el del compartimento ocupado por el motor**. Esto contradice la teoría que indica que el habitáculo se refuerza para proteger a los ocupantes (al menos en los vehículos citados). Lo grave de este fenómeno es que, además, muchas carrocerías se deforman de tal manera que esa deformación llega hasta el habitáculo, inclusive a las bajas velocidades de los ensayos de programa EuroNCAP, tal como se puede observar en los siguientes ejemplos:



Ensayo EuroNCAP del Ford Mondeo (2002).



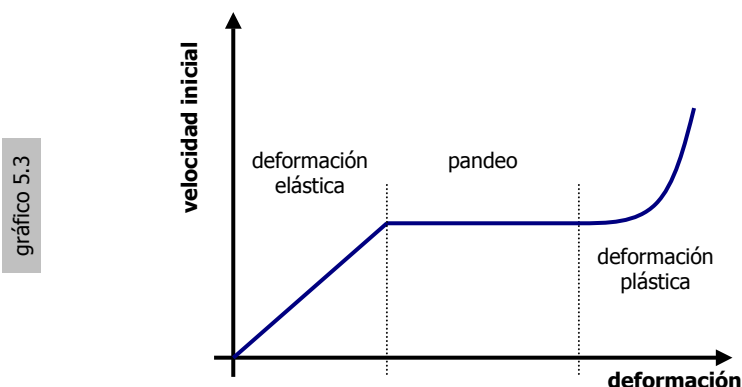
Ensayo EuroNCAP de un Rover 25 (2001).

Lamentablemente en el sitio web del programa EuroNCAP hay una sola fotografía para cada ensayo de cada automóvil, y la mayoría corresponde a las primeras centésimas de segundo del accidente, cuando todavía no se puede percibir la deformación de la carrocería. Esto implica que otros vehículos probablemente también sufran la deformación del habitáculo, aunque no se lo pueda reflejar con fotografías. De más está decir que mientras mayor deformación tenga el compartimento de los ocupantes, mayor será el riesgo al que éstos están expuestos, ya que los espacios entre los ocupantes y los objetos del interior del automóvil contra los que impactarán se acercan, y los ocupantes corren un riesgo mayor de ser aplastados por distintas partes de la carrocería.

Se puede decir, en definitiva, que **las ventajas de una carrocería progresivamente deformable se acaban al extenderse la deformación al habitáculo**. No parece existir ninguna razón lógica (desde el punto de vista de la seguridad vial) que justifique que el compartimento de los ocupantes se deforme, exponiendo peligrosamente a sus ocupantes a riesgos que se pueden evitar mediante un diseño más rígido del habitáculo. Resumiendo, el modelo de dos resortes y tres masas se ajusta de una manera más adecuada al comportamiento de la estructura de un automóvil moderno durante un accidente. Sin embargo, al momento de tener en cuenta los requisitos mínimos que debe cumplir un auto para evitar que sus ocupantes sufran daños durante un choque, se establecerá que el compartimento de los ocupantes no debe sufrir deformación alguna. Dicho en otras palabras, **la totalidad de la deformación deberá ocurrir fuera del habitáculo**. Esto implica volver al modelo de un resorte y una masa, explicado anteriormente, y considerarlo como el modelo válido para los análisis de este trabajo.

Comentarios acerca de un modelo de columna delgada

Para cerrar el breve recorrido por los distintos modelos propuestos para representar el comportamiento de los vehículos durante un accidente, se repasará el propuesto por Noon (7). Este modelo, con el supuesto de que el sistema resorte/masa no imita con precisión el comportamiento de los automóviles en accidentes de baja o alta velocidad, asume como válido que ese comportamiento es similar al de una columna delgada. Una columna delgada se comporta oponiéndose en principio de manera elástica a una fuerza de compresión. Pero si se aumenta la fuerza se produce el *pandeo* de la columna, haciendo que la columna se deforme en una dirección distinta a la de la aplicación de la fuerza, aunque todavía es capaz de recuperar su forma original si se quita dicha fuerza. A partir del límite elástico del pandeo, la columna se pliega de forma permanente sobre sí misma, como si fuera a un acordeón. Bajo este modelo, se puede graficar el desplazamiento en función de la fuerza axial ejercida sobre la columna delgada (que se relaciona directamente con la velocidad inicial del accidente):



La primera sección corresponde al comportamiento elástico de la columna que se comprime axialmente y recupera su forma original al eliminarse la fuerza de compresión. La segunda corresponde al pandeo, donde con muy poco (o ningún) aumento de fuerza la columna se desplaza considerablemente generándose deformación plástica. La tercera, por último, corresponde al período en que la columna gana rigidez debido a

la acumulación de masa cerca de su extremo fijo. Pero como todo modelo, éste tiene sus ventajas y desventajas, por eso se puede citar al propio Noon que aclara:

"La falla de un componente estructural se considera a partir del principio del pandeo elástico y, posiblemente, todavía antes. Demasiada distorsión dimensional en el régimen elástico puede inutilizar un componente. El objetivo de un buen diseño es evitar llegar al nivel donde la carga puede causar una distorsión dimensional excesiva o la ruptura del componente. Es por eso que mientras existe un estudio considerable de lo que ocurre en el período elástico, se le presta poca o nula atención a lo que sucede después de que ocurrió el pandeo".

En otras palabras, a pesar de que los primeros estudios acerca del comportamiento de columnas delgadas frente a la compresión axial se remontan a Euler –más de doscientos años atrás– y de que el modelo se acerca algo más a lo que sucede en la realidad, el conocimiento teórico del comportamiento de las columnas es todavía insuficiente (especialmente una vez que ha comenzado la deformación permanente) para lograr predecir el comportamiento de los automóviles a partir de asumir que reaccionan como si fueran columnas delgadas. Así se descarta el uso tanto de este modelo como de los anteriores, dando por explicado a través de este breve análisis que **el modelo de un solo resorte inelástico y una masa es el más adecuado para representar de manera sencilla los sucesos durante un accidente y las magnitudes involucradas en él**, y que es suficiente para el grado de profundidad que se pretende para el análisis de los aspectos de esta Tesis.

5.3. Mecanismos de daño al cuerpo

Otra parte importante de este análisis de los conceptos físicos y biológicos que se necesitan como base para los próximos capítulos corresponde al estudio de los mecanismos de daño al cuerpo humano, que sirven para explicar qué tipos de movimientos o impactos son capaces de generar algún perjuicio³¹. Para empezar, una de las propiedades más importantes para entender el daño de los tejidos del cuerpo es la viscoelasticidad, es decir, la capacidad de resistir a los esfuerzos en función de la tasa de aplicación de la fuerza, y no sólo en función del valor de dicha fuerza. Los seres humanos están formados por millones de células que contienen principalmente agua, comparables con pequeñas bolsas de gelatina heterogénea, que están conectadas entre sí a través de fibras elásticas³². Esos millones de células se combinan de manera de integrar los distintos órganos, desde la piel hasta el corazón, pasando por los huesos, pulmones, cabellos, y todo el resto del increíble organismo humano. Y cada parte del cuerpo, cada órgano, cada grupo de células, ofrece una distinta resistencia a los esfuerzos, y, además, una distinta resistencia a la tasa con la que se aplica ese esfuerzo. En el caso particular de los accidentes de tránsito, todo los esfuerzos generados por los impactos y aceleraciones se experimentan en tiempos extremadamente cortos, de centésimas de segundos. Aquí es bueno explicar que la viscoelasticidad de los tejidos del cuerpo implica que la resistencia de los mismos disminuye a medida que aumenta el tiempo de exposición al esfuerzo. O sea, que si un tejido es capaz de resistir una fuerza durante un determinado tiempo, es probable que si se expone al mismo esfuerzo durante un tiempo mayor se rompa, nunca ocurre al revés. Lo que lleva a pensar otra vez en la excesiva violencia de los esfuerzos que se generan sobre el organismo humano en un choque de automóviles, ya que al tratarse de sucesos de duración muy limitada en el tiempo, **los tejidos ofrecen la máxima resistencia posible**. Así y todo, ocurren muertes instantáneas, fracturas, y todo tipo de heridas a la mayoría de los órganos, por contacto directo o indirecto.

Ahora, para entender mejor los mecanismos de daño al cuerpo humano es conveniente hacer un análisis que incluya los siguiente grupos de órganos:

- cabeza
- extremidades (brazos y piernas)
- torso (abdomen y pecho)
- cuello y médula espinal

En las estadísticas consultadas existen algunas contradicciones en cuanto a la preponderancia de las heridas de cada uno de los distintos segmentos recién indicados. En algunos textos las heridas más comunes en los accidentes de tránsito corresponden a las heridas en la cabeza. Para otros, a las heridas en las extremidades. Lo cierto es que el resultado del tipo de muestreo hecho por cada autor, es decir de la cantidad de accidentes involucrados, de las velocidades de impacto, del equipamiento de dispositivos de seguridad del automóvil (airbag), del uso o no del cinturón de seguridad, entre tantos otros factores, y por lo tanto no parece que sea prudente indicar las importancias relativas de cada segmento sin contar con información más confiable. De todas maneras sí parece ser de utilidad analizar los mecanismos de daño a cada sector del

³¹ La mayoría de los conceptos de esta sección corresponden al libro del doctor Alvin S. Hyde "Crash injuries – how and why they happen" (Heridas debido a accidentes de tránsito – cómo y por qué ocurren) (2).

³² Una de esas fibras es, por ejemplo, el colágeno, cuya resistencia a la tracción es similar a la del acero.

cuerpo indicado, sin importar cual de ellos es el que resulta dañado con mayor frecuencia durante los accidentes de tránsito, ya que cualquier tipo de herida es perjudicial en menor o mayor medida, y no es conveniente dejar de analizar la totalidad del problema.

Mecanismos de daño en la cabeza

Los daños a la cabeza son extremadamente peligrosos, siendo una de las causas más comunes de las muertes de tipo instantáneo. El cerebro es el órgano que controla todas las funciones vitales y un impacto directo en él genera consecuencias devastadoras. Así, cualquier daño a la cabeza afectará profundamente a la víctima de un accidente, inclusive los que se producen en impactos a bajas velocidades. Las lesiones a las células del cerebro (neuronas, etc.) son hasta hoy irreparables. Además, en la cabeza se encuentran los órganos sensoriales más importantes (excluyendo la piel) y el sistema que regula el equilibrio. Por otro lado los daños al cerebro son particularmente peligrosos cuando no son tratados inmediatamente de manera adecuada. Muchos pacientes llegan hablando al hospital y a los pocos minutos mueren como consecuencia del daño interno. De más está decir que la cabeza está expuesta durante una colisión a todo tipo de esfuerzos y contusiones (particularmente en los choques frontales y laterales). Las siguientes son algunas de las consecuencias destacables de los accidentes de tránsito que afectan a la cabeza, incluyendo el cerebro y los órganos sensoriales:

- las heridas al cerebro pueden ser causadas por un impacto directo, o a través de la aceleración de la cabeza. Según del doctor Hyde las **aceleraciones en ángulo generan más daño que las aceleraciones lineales**, y el **movimiento de lado a lado produce más daño que el movimiento de atrás hacia delante** (o de adelante hacia atrás).
- **es tanto posible, como frecuente, que existan fracturas de cráneo sin daño cerebral, como daños cerebrales sin fractura de cráneo.** La parte superior del cráneo tiene en su interior una superficie suave. Por el contrario la parte inferior tiene una superficie rugosa, que es la causa de las contusiones de estas partes del cerebro. El movimiento relativo entre la base inferior del cráneo y el cerebro puede causar desgarros en los vasos sanguíneos y nervios que entran y salen del cerebro, con consecuencias graves (deficiencias de comportamiento y cognitivas además de problemas en la memoria).
- las heridas en el maxilar son frecuentemente dolorosas y requieren múltiples intervenciones quirúrgicas que resultan generalmente en discapacidades residuales, tanto estéticas como funcionales.
- el daño a la vista puede ser causado por el deterioro de uno de los nervios que van desde el cerebro a los ojos, o mediante el impacto directo al globo ocular. Hay que tener particular cuidado con los objetos que pueden impactar los ojos, tanto los del interior del automóvil, como los trozos de vidrios³³ o los objetos que ingresan dentro del habitáculo. Otros elementos que pueden impactar los ojos son los brazos de la propia víctima o de otro ocupante, ya que las extremidades superiores se mueven libremente durante el accidente.
- el oído y el equilibrio se controlan desde un mismo nervio (el denominado C8). Se han visto casos en que inclusive modestos impactos en la cabeza, sin pérdida de conocimiento, generan un pequeño orificio en una sección del cerebro de di-

³³ En general las ventanillas laterales son de vidrio templado, no laminado, que se desintegra en miles de astillas.

fácil acceso y que provocan discapacidades serias tanto auditivas como de equilibrio. Además, la zona donde se encuentra la lesión hace muy difícil el acceso para su operación, haciendo preferible dejar a la víctima con la discapacidad permanente ante el alto riesgo de la operación, que puede dañar otras partes del cerebro.

- existe el peligro de afectar los sentidos del gusto y del olfato a través de fracturas graves del rostro y de la nariz.
- por último, entre el 5 y el 10% de las muertes son provocadas por asfixia (2) debido a la aspiración de sangre o vómito (obstrucción de las vías respiratorias superiores).

Mecanismos de daño en las extremidades (brazos y piernas)

Recurriendo una vez más al doctor Hyde se puede considerar la siguiente frase:

"Las heridas en las extremidades son la causa más común de discapacidad permanente como resultado de un accidente de tránsito".

Esto no es de extrañar, ya que las extremidades nunca están sujetas a nada. Pueden moverse libremente e impactar contra cualquier objeto (inclusive contra el cuerpo de los otros ocupantes del vehículo). Por un lado, la mayoría de las fracturas de las extremidades superiores no ponen en riesgo la vida ni son especialmente complejas, pero por el otro **comprometen articulaciones, vasos sanguíneos y nervios, y pueden generar discapacidades significativas**. A lo que se suma que las heridas en las extremidades inferiores pueden generar muchas complicaciones que exceden el daño a esos órganos. Mientras que el contacto de la rodilla con el tablero puede ser la causa de heridas a esa articulación, también transmite la mayor parte de la energía del impacto al hueso femoral, pudiendo causar múltiples fracturas cuando la fuerza es considerable, y llegando también a fracturar la cabeza del fémur y el acetábulo (donde encaja el fémur). Además, **el movimiento de fragmentos de hueso fracturados genera graves daños a los tejidos musculares y hemorragias internas masivas**, tal como las fracturas de pelvis, que pueden generar desgarramientos de la vejiga y de la uretra. Se debe tener en cuenta que la mayoría de las heridas de las extremidades inferiores son consecuencia de una depresión del piso, de la intrusión de la pared que separa el habitáculo del motor, de la intrusión de la puerta (hasta aquí debido a la violación espacio vital de los ocupantes), del contacto de la víctima con el tablero o el volante, o de su contacto con otros ocupantes. Para terminar, se debe tener en cuenta que no es necesario que ocurra un choque a altas velocidades para generar un daño a esta región del cuerpo. En un estudio realizado en 1995 (12) se analizaron algo menos de 6.000 casos ocurridos en Inglaterra, y se determinó que el 50% de las heridas de las extremidades inferiores eran consecuencia de accidentes a velocidades menores a 60 km/h. El resto fue provocado por accidentes de entre 60 km/h y 80 km/h.

Mecanismos de daño en el torso (abdomen y pecho)

En la jerga médica, el abdomen difiere de lo que se denomina *cavidad peritoneal*, que es a lo que se refiere esta sección. Esta cavidad contiene muchas glándulas y órganos vitales como, entre otros, el hígado, el bazo, la vejiga, el páncreas, el estómago, los intestinos, y parte de la uretra. Menos la boca y el esófago todo el sistema digestivo se

encuentra en la cavidad peritoneal. Salvo los genitales exteriores y la uretra, todo el sistema genital y urinal está contenido en ella. La arteria aorta y la vena cava abdominales están ubicadas en la pared posterior de la cavidad, así como varios nervios y ganglios. La cavidad peritoneal está rodeada de una membrana que retiene a los órganos y que mantiene una presión estable en toda ella. Antes de seguir, se puede recordar que el Principio de Pascal establece que:

"El cambio de presión aplicado a un punto de un fluido en reposo se transmite a cada uno de los otros puntos".

Entonces, cuando se impacta el abdomen, éste actúa como si fuera una cavidad hidráulica incompresible (2). Si se lo golpea en el lado izquierdo, el hígado en la parte derecha del abdomen y la vejiga en la parte más baja del mismo van a estar expuestos a la misma presión que el sector golpeado. Con la circunstancia agravante que el daño a muchos de estos órganos puede ser causa de muerte o de serias lesiones. Por ejemplo una herida o lesión al hígado, un órgano blando y que se desmenuza fácilmente y por donde circulan un litro y medio de sangre por minuto, tiene el potencial de causar grandes hemorragias³⁴. Un golpe violento en el momento en que la vejiga está llena de líquido puede generar que ésta estalle, condenando a la víctima a vivir con un sistema de drenaje permanente de la orina. En cuanto al daño a la cavidad peritoneal éste puede ser causado por un golpe contra el conjunto del volante de dirección, por la intrusión de otros componentes del vehículo en el espacio de los ocupantes, por el deslizamiento del automovilista por debajo del cinturón de tres puntos³⁵, o por la compresión aguda del abdomen generada por el cinturón de seguridad (13). De todas maneras, según el doctor Hyde:

"No hay suficientes buenos estudios acerca de la tolerancia abdominal a los impactos para escribir un tratado minucioso del tema".

Y por lo tanto la ciencia médica debe avanzar mucho todavía para lograr un conocimiento adecuado de los mecanismos de daño a la cavidad peritoneal, aunque se debe entender que cualquier impacto es capaz de generar un grave perjuicio a la víctima.

En lo que se refiere al pecho, la mayoría de los órganos que residen en él, como el corazón y los pulmones, y muchos de los que transitan a través de él hacia alguna otra parte del cuerpo (como el esófago, la vena cava y la arteria aorta) pueden considerarse órganos vitales, lo que implica que dañar cualquiera de ellos puede ser fatal. Es importante destacar que **las heridas en esta zona pueden ser fatales en el corto plazo, pero en el caso contrario, no tienen consecuencias graves a largo plazo**, justo al revés de lo que sucede con las extremidades. Las complicaciones derivadas del trauma en esta zona del cuerpo pueden ser de dos tipos distintos: respiratorias o circulatorias. Con respecto a las complicaciones respiratorias, en el pecho existe una zona denominada "espacio intrapleurál" donde reside una membrana que permanece por debajo de la presión atmosférica durante todas las fases de la respiración. Cualquier daño al pecho que altere esa membrana, y su presión negativa, perjudica el movimiento de aire a los pulmones o inclusive interrumpe la respiración. Debido a lo difícil de tratar esta "bomba de vacío", si no se hace de manera adecuada y rápidamente, **este tipo de herida es mortal en el corto plazo**. Por otro lado, cualquier suceso que inhiba al diafragma de la capacidad de contraerse generará el cese del movimiento de aire a los pulmones. Esto puede ser causado por el daño al nervio frénico, o a los músculos o huesos de la pared del pecho. Otra complicación respiratoria es

³⁴ Según la edad y la textura física, en el cuerpo humano circulan entre cuatro y seis litros de sangre, es decir que por el hígado pasa un volumen equivalente a la totalidad de la sangre cada cuatro o cinco minutos.

³⁵ Fenómeno denominado "submarining" en inglés.

consecuencia de contusiones en el pulmón, que se originan como consecuencia de un golpe directo. Siempre que haya más de una costilla fracturada, aunque no es siempre necesario que haya costillas rotas, los alvéolos dañados no pueden intercambiar oxígeno con el flujo sanguíneo de manera normal. Esta disminución de la cantidad de oxígeno presente en la sangre genera un fenómeno de desvío³⁶ con el cruce del flujo de sangre en el interior del corazón, pasando del lado derecho al izquierdo, lo que a su vez provoca que la sangre de las arterias se diluya con sangre no oxigenada, reduciendo aún más la cantidad total de oxígeno presente en la sangre. Una contusión del pulmón puede provocar que segmentos enteros del mismo colapsen, agravando los efectos, y **disminuyendo aún más el flujo de oxígeno a todas las partes del cuerpo**. Entre las partes más susceptibles a la falta de oxígeno se encuentra el cerebro, para quien breves lapsos de disminución de oxígeno tienen consecuencias severamente adversas. Y breves se refiere en este caso a minutos. **Si además el cerebro está dañado, la falta de oxígeno puede ser fatal**. Las complicaciones circulatorias son todavía más peligrosas. El 25% de las muertes en accidentes viales ocurren como consecuencia de heridas a los órganos circulatorios principales, como el corazón, la arteria aorta u otros vasos sanguíneos principales (2). Un estudio estima que sólo del 10% al 30% de las víctimas de estas heridas sobreviven lo suficiente como para llegar a ser atendidos adecuadamente (14). Entre las lesiones más comunes del sistema circulatorio se encuentra el mencionado desgarramiento de la arteria aorta. Se trata de una herida que puede ser causada por contacto directo o no, lo que sugiere que el uso o no del cinturón de seguridad no parece importar, y que no es necesario que se dañe ninguna otra parte del pecho para que la arteria se rompa. Más de la mitad de esas heridas ocurre en el mismo lugar a 2,5 cm de donde emerge la arteria subclaviana, en el istmo de la arteria aorta. Uno de los estudios (3) indica que el 95% de las víctimas de esta ruptura sufrieron un Δv de entre 40 km/h y 80 km/h. Y que todos fueron expuestos a **fuerzas oblicuas o transversales**, lo que sugiere que esto ocurre cuando actúa alguna fuerza de corte.

Mecanismos de daño en el cuello y en la médula espinal

En un papiro escrito alrededor del año 2500 AC se decía que una herida en la médula espinal era un tipo de herida que no vale la pena tratar médicamente, ya que ningún tratamiento logra su recuperación. Cuatro mil quinientos años más tarde los médicos mantienen la misma opinión. Según el doctor Hyde:

"Muy poco de lo que podemos hacer hoy en día influye en la recuperación o en la falta de recuperación del tejido del sistema nervioso una vez que éste ha sido dañado".

Muchos de los golpes a la columna vertebral generan daños a la médula espinal, un suceso que, de acuerdo al lugar de la lesión, puede derivar en la muerte instantánea o también en una discapacidad de tipo permanente. Las cargas axiales sobre la cabeza, generalmente de tipo de compresión, pueden en algunos casos generar daños a la parte superior de la médula espinal (articulación atlanto-occipital). La compresión de otras partes de la columna vertebral también puede provocar lesiones en las secciones medias de la médula. Ambos tipos de heridas, si bien poco frecuentes, tienen consecuencias generalmente graves. Un ejemplo de la forma de sufrirlas es a través de un golpe contra el techo, hecho que puede ocurrir cuando el automóvil sale de la ruta y cae en un desnivel profundo, ya que el ocupante golpea el asiento y luego rebota

³⁶ "Shunting" en inglés.

hasta golpear contra la parte superior del habitáculo. En un estudio de la SAE (15) se analizan cuatro casos reales en donde las víctimas de accidentes con bajas variaciones de velocidad en el sentido de circulación³⁷, pero con sucesos que incluyeron la compresión de la columna vertebral, **resultaron con parálisis de tipo permanente**. En las fotos de dos de los vehículos involucrados se observa que el daño al automóvil es casi nulo, lo cual es buen ejemplo de la importancia de analizar conjuntamente lo que sucede en el exterior del auto y lo que sucede en el interior del mismo.

Por otro lado, **la principal causa de fracturas en la columna es la flexión a la que se ve sometida durante el accidente**. Las fracturas en las dos primeras vértebras de la columna³⁸, por ejemplo, implican complicaciones en las arterias que circulan por la médula espinal, generando desde la formación de aneurismas hasta la muerte inmediata. Por debajo de las dos primeras vértebras, las fuerzas involucradas en un accidente generan comúnmente consecuencias neurológicas catastróficas, con grandes daños a la médula espinal. Cuando la fuerza es de tensión en lugar de flexión lo que se genera es una distensión en lugar de una fractura. Esto generalmente ocurre al ser el automóvil embestido de atrás, en un tipo de herida muy común, denominada en inglés "whiplash injury". El peligro de este tipo de heridas es que sus consecuencias son de muy largo plazo y en el 10% de los casos **los síntomas se manifiestan recién luego de varios años de ocurrido el accidente** (16). Otro mecanismo de daño a la médula espinal se observa cuando el ocupante es arrojado hacia delante con violencia y retenido por el cinturón y el airbag, ya que su columna vertebral y médula espinal son sometidas a flexión, a lo que se suman generalmente fuerzas de rotación o de flexión lateral, con lo que **la combinación de esfuerzos puede provocar serias fracturas y daños a la médula**. En definitiva, las consecuencias del daño a la columna vertebral que provoca lesiones en la médula espinal se pueden apreciar en función de la altura donde se genera el daño. Comenzando de abajo hacia arriba, el daño en la zona lumbar genera paraplejía y serias complicaciones en el aparato urinario y sexual. Si la lesión se produce algo más arriba, a las consecuencias ya nombradas se le suman deficiencias motrices en los músculos abdominales y del pecho, pudiendo generar complicaciones respiratorias. Las peores consecuencias son generadas por las heridas a la médula espinal a la altura del cuello, en las vértebras cervicales, donde la víctima pierde por completo el control de casi todas las funciones musculares (cuadriplejía). El daño en esta parte de la columna, tal como se indicó al principio, también puede derivar en la muerte instantánea de la víctima.

³⁷ Menos de 10 km/h en uno de los casos.

³⁸ Las vértebras se enumeran de arriba hacia abajo, comenzando por las que corresponden al cuello.

5.4. Resistencia biológica a impactos y aceleraciones

Hace cuatro mil millones de años existía en la Tierra un paraíso de moléculas orgánicas complejas (aminoácidos y nucleótidos, entre otras), inmersas en un único océano de agua líquida, debajo de una atmósfera de hidrógeno, nitrógeno y apenas un poco de oxígeno. En ese contexto dio lugar el nacimiento de la primera célula, luego de la unión de moléculas con funciones especializadas. Mil millones de años después evolucionaron los primeros organismos multicelulares, básicamente algas azules o verdes. Durante otros dos mil quinientos millones de años de fotosíntesis esos organismos primitivos lograron aumentar geoméricamente la cantidad de oxígeno en la atmósfera, y favorecieron la aparición de los primeros animales en el período Cámbrico, hace unos quinientos millones de años. Recién diez millones de años atrás daban las primeras señales sobre nuestro planeta unas criaturas que se parecían a los seres humanos modernos y desde allí, hasta que apareció el primer *homo sapiens*, pasaron otros ocho millones de años más. Lo que hacen miles de millones de años de evolución es asombroso y estalla frente a nuestra vista; la biodiversidad del planeta Tierra es prodigiosa, las distintas especies se cuentan por millones, y nosotros, los humanos, no escapamos a esta sorprendente variedad de características.

Esta paráfrasis de un ensayo de Carl Sagan puede explicar las razones por las cuales cada persona es única desde varios puntos de vista. En particular, en lo que se refiere a este estudio, cada uno tiene una constitución distinta, y una manera de reaccionar distinta frente a los accidentes. Las respuestas biológicas humanas existen solamente en términos estadísticos, de acuerdo a como se espera que un cierto porcentaje de la población humana se comporte frente a determinado estímulo. Así es que las posibilidades de supervivencia varían en función de una multitud de particularidades de cada individuo. En palabras de Hyde (2):

"No observen detenidamente las tablas de tolerancia humana por mucho tiempo, ya que no son demasiado útiles a menos que representen la variabilidad estadística que caracteriza a la biología".

Comentario acerca de las tolerancias biológicas aproximadas

Con todo lo vital y fundamental que es para este trabajo poder determinar algunos parámetros generales de resistencia del cuerpo humano frente al impacto a o las aceleraciones, es escaso lo que se puede sacar en limpio. Es que las numerosas interpretaciones de cada experto y los valores que indican muchas veces son contradictorios entre sí. Y además, no está del todo claro cómo se puede extrapolar un valor de una tolerancia a una situación real y concreta. La mayor dificultad a la que se enfrentan los expertos tiene que ver con la imposibilidad de hacer ensayos con seres humanos que permitan confirmar las extrapolaciones. Lo más frecuente es que los investigadores usen maniqués muy sofisticados para intentar predecir lo que le ocurriría a un ser humano si es sometido a las mismas fuerzas y aceleraciones. Lamentablemente, Hyde confirma algo que se podía intuir (2):

"Como es bien sabido, los "dummies" no siempre replican la respuesta de un ser humano en el caso de un accidente, y en el mejor de los casos, sólo representan un cierto porcentaje de la población en riesgo. De esta manera, los estudios de accidentes del mundo real son el único método a través del

cual se puede obtener algún tipo de discernimiento acerca del verdadero desempeño cuando están involucradas personas reales”.

Además agrega que **no se debe extrapolar directamente lo ocurrido a un “dummy” en un ensayo a lo que le ocurriría a un humano en un accidente real.** Otros investigadores intentan establecer paralelos entre las respuestas de ciertos animales como chimpancés o ratas y las respuestas eventuales de los seres humanos. Pero una mayor conciencia por el respeto a los animales y las numerosas asociaciones que luchan por el cese de su utilización en experimentos hacen que este tipo de estudios sea cada vez menos frecuente. Por último, la manera más precisa de estudiar las respuestas del cuerpo humano frente a un accidente es la más discutida y polémica de todas. En un artículo aparecido el año pasado en la Revista La Nación (17), Esteban Peicovich decía, a raíz de la noticia de que algunos fabricantes alemanes estaban usando cadáveres en lugar de maniqués en las pruebas de impacto:

“Los fabricantes de automóviles se han desilusionado de los maniqués usados en pruebas de choque. Exigen mayor eficiencia. Y verismo. Requieren un cuerpo lo más cercano al piloto normal de cada día. Y, como se sabe, no hay nada más parecido a un vivo que un muerto. La idea (como todo lo global) cuajó por barata. Un cadáver que un deudo solitario (o abandonado) dona a una universidad pasa a trabajar en una planta de pruebas. Aprende en el acto: lo ponen al volante y lo envían a rebotar contra un muro a 200 km/h (o lo tiran de un puente)”.

En general todos niegan hacer o haber hecho ensayos con cadáveres, y difícilmente la sociedad acepte que se hagan, por más vidas que potencialmente pudieran salvar los resultados obtenidos. En definitiva, a pesar de escaso rigor científico que pueden llegar a presentar los siguientes conceptos acerca de las tolerancias humanas aproximadas, el que sigue se puede considerar como un buen resumen, dadas las circunstancias desfavorables.

Influencia de los factores humanos

La primera pregunta que se debe responder trata el tema de la influencia del sexo y la edad en la capacidad de resultar ileso o sobrevivir durante un accidente de tránsito. Sin dudas éste es un aspecto vital a considerar, ya que las normas de diseño deberían establecer los valores admisibles por el cuerpo humano para que los automóviles resulten lo más seguro posible, teniendo en cuenta a la mayoría de la población. En muchos textos se hace referencia a que el ser humano no puede tolerar aceleraciones mayores a los 60 g (esto depende del tiempo durante el que se es sometido a ella, como ya se verá). Pero, ¿eso corresponde a la resistencia de un hombre o de una mujer? ¿Esa aceleración se puede tolerar a los 20 años y a los 60 años también? Para responder a esto se puede empezar por algunas consideraciones tomadas del texto de Hyde que hacen referencia a las diferencias de resistencia en función del sexo y la edad de quien sufre un accidente:

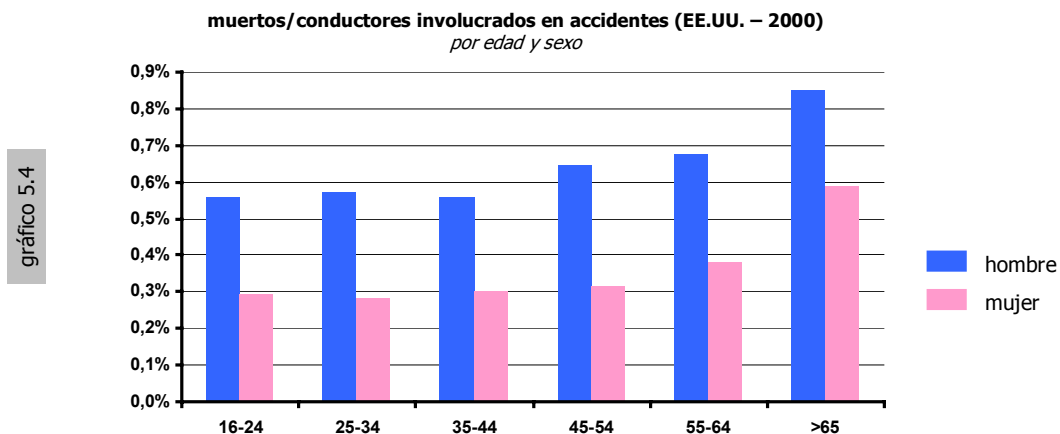
- i) **los hombres pueden morir como consecuencia de heridas que las mujeres de la misma edad logran sobrevivir y las mujeres mueren con más frecuencia durante el accidente en sí mismo** (los hombres mueren con más frecuencia luego del accidente, durante la recuperación).

- ii) **se tienen distintas probabilidades de morir o de sufrir heridas a cada edad** (una herida que se hubiera logrado sobrevivir a los 20 años generalmente se convierte en fatal a los 40 años).
- iii) **la misma lesión puede generar distinto grado de discapacidad a medida que el ser humano envejece.**
- iv) **la historia nutricional** (relacionada, entre otras cosas, con la cantidad de calcio en los huesos) **o las enfermedades crónicas, como la diabetes o enfermedades neuromusculares, tienen un profundo efecto en la capacidad de las personas que sufren un accidente de sobrevivir a una herida o a un conjunto de ellas.**

De todo esto se puede deducir que no todos pueden resistir de la misma manera esas aceleraciones de 60 g. Y a las diferencias naturales de sexo y edad se le agrega, como se ha dicho, las características singulares de cada individuo. A propósito se puede citar una vez más a Hyde quien dice que:

"La variación de las características mecánicas pasivas del tejido elástico y de los huesos de cada persona es mucho mayor que la que se podría atribuir a las diferencias de sexo o edad."

Para apoyar los conceptos de resistencia diferenciada se debe recurrir a los datos del informe anual que realiza la NHTSA (18) de donde se puede construir el siguiente gráfico:



En la población considerada se encuentran solamente los conductores³⁹ que han sufrido accidentes durante el año 2000 en los Estados Unidos. Se debe tener en cuenta que la intención del gráfico es indicar una tendencia, ya que desde el punto de vista estadístico pueden haber ciertos sesgos, porque no todos los accidentes tienen las mismas características (probablemente los accidentes que sufren los conductores más jóvenes ocurran a mayor velocidad que los de las personas adultas, los automóviles sean distintos, etc.). Así y todo, las tendencias a grandes rasgos confirman las consideraciones hechas anteriormente: **las mujeres resisten mejor los accidentes que los hombres, y los jóvenes mejor que los adultos.**

³⁹ Es decir que no se incluye al total de los ocupantes.

Tolerancia biológica a los impactos

En la sección anterior donde se analizaron de los mecanismos de daño al cuerpo se hizo referencia a las consecuencias que genera en cada sector del cuerpo una fuerza aplicada en un determinado tiempo. Ningún impacto es intrascendente para el organismo y no es la intención de esta sección establecer límites numéricos⁴⁰. Se debe tener en cuenta que muchas veces es difícil relacionar esas tolerancias límites con los sucesos que ocurren dentro del automóvil, ya que es raro que las fuerzas se apliquen en un solo punto, o que las fuerzas sean puras (habitualmente se combinan esfuerzos de tracción, corte, y compresión al mismo tiempo). Por eso es preferible indicar qué partes del cuerpo son más sensibles a los impactos, en especial en lo que se refiere a las consecuencias sobre la víctima, analizados desde el punto de vista de su capacidad de provocar la muerte o una discapacidad permanente. Otra aclaración previa que se debe hacer es que los impactos de un accidente son en general de una magnitud mucho mayor a la que los seres humanos pueden resistir. Como ejemplo se puede razonar que golpear la cabeza contra el volante con una diferencia de velocidad relativa de 80 km/h casi equivale a estar parado junto a una ruta y recibir un golpe con una barra de parte del ocupante de un auto que pasa junto a nosotros a esa velocidad. Y en un accidente de tránsito es común estar expuesto a este tipo de golpes.

Haciendo un rápido repaso por las regiones del cuerpo basado en los mecanismos de daño expuestos en la sección anterior, y empezando por la cabeza, un impacto directo en ella implica un alto riesgo de sufrir una lesión que provoque una discapacidad permanente o la muerte. Lo mismo sucede con el cuello, una región particularmente sensible, ya que un golpe en el lugar puede afectar la médula espinal, la arteria y la vena principales, y el sistema respiratorio. En cambio un impacto en las extremidades superiores significa un bajo riesgo de muerte, y una probabilidad media de sufrir una discapacidad permanente. Ya se ha dicho que las heridas en el pecho pueden ser mortales en el corto plazo o, por otro lado, no generar ninguna discapacidad permanente. Muy distinto es el caso del abdomen, donde un golpe fuerte puede causar la muerte o una discapacidad permanente (con la probabilidad de pérdida de algún órgano como un riñón o la vejiga). Por último, un impacto en las extremidades inferiores puede poner en riesgo medio de muerte a la víctima si el desplazamiento de los huesos genera algún daño interno, o si se lesionan las arterias principales. En este caso se hace referencia a la parte superior de las piernas, ya que en la sección inferior de las extremidades inferiores el riesgo de muerte es muy bajo. Todo cambia al momento de considerar el riesgo de que se genere una discapacidad permanente, algo a lo que este sector del cuerpo es particularmente sensible. Lo dicho anteriormente se puede resumir en el siguiente cuadro, que indica el riesgo relativo de cada región del cuerpo en función de recibir un impacto directo severo:

tabla 5.1

región del cuerpo	riesgo de muerte	riesgo de discapacidad permanente
cabeza	alto	alto
cuello y médula espinal	alto	alto
extremidades superiores	bajo	medio
pecho	alto	bajo
abdomen	alto	alto
extremidades inferiores	medio/bajo	alto

⁴⁰ Como por ejemplo el que indica que para fracturar los huesos faciales, incluyendo la mandíbula, bastan de 700.000 Newton a 3.300.000 Newton de fuerza (2).

El mismo cuadro se puede representar a través de dos figuras similares a las usadas para indicar los resultados de los ensayos del programa EuroNCAP:

riesgo de muerte en función de la zona de impacto



riesgo de discapacidad permanente en función de la zona de impacto



riesgo alto
riesgo medio
riesgo bajo

Como se puede observar, los impactos más peligrosos son aquellos en la cabeza, el cuello, el pecho y el abdomen, ya que tienen alto riesgo de generar la muerte o discapacidades permanentes. En orden de peligrosidad les siguen los impactos en las extremidades inferiores, que presentan un riesgo medio o bajo de muerte, pero un alto riesgo de provocar discapacidades permanentes. Por último, es poco probable que los golpes en las extremidades superiores determinen la muerte de la víctima, pero sí pueden causar en algunas ocasiones discapacidades permanentes. O sea, que si se combinan ambos riesgos, un impacto en casi todas las zonas del cuerpo humano puede derivar en un serio peligro para la víctima:

riesgo combinado de muerte o discapacidad permanente en función de la zona de impacto



riesgo alto
riesgo medio
riesgo bajo

Como conclusión, todo indica que **lo deseable es no sufrir ningún tipo de impacto severo en ninguna parte del cuerpo, y que se deben proteger especialmente la cabeza, el cuello, el pecho y el abdomen de los ocupantes, ya que los golpes en esas zonas ponen en riesgo de muerte a la víctima.**

Tolerancia biológica a la aceleración

Lo primero que se debe hacer es establecer claramente las diferencias que existen entre los impactos y las aceleraciones violentas, desde el punto de vista de lo que representan para el cuerpo humano. No es raro leer en muchos artículos sobre el tema de la seguridad vial comentarios como que *"los ocupantes de un automóvil son sometidos*

durante un accidente a aceleraciones de 250 g, lo que equivale a una caída libre desde un décimo piso". Lo cierto es que ese tipo de comentarios es inexacto. No importa si uno cae desde un piso 10 ó desde el extremo superior del Empire State Building, la aceleración a la que se es sometido es siempre 1 g. Ahora, en el momento de impactar el suelo, la situación cambia. No es lo mismo, evidentemente, caer desde un metro de altura que desde cien metros, a pesar de que la aceleración sea la misma. Porque lo que influye en la severidad de las consecuencias que sufre la víctima no es la aceleración, sino, entre otros, la velocidad, la masa del cuerpo, o la dureza y la forma del objeto contra el que el cuerpo impacta. En otras palabras, **lo grave es el impacto y no la aceleración**⁴¹. La contracara de este último comentario es que todo impacto produce una desaceleración. El hecho que los tejidos y órganos del cuerpo estén unidos entre sí de manera de permitir del movimiento relativo entre ellos hace que, mientras que una parte del cuerpo se detuvo al golpear el objeto, esos tejidos y órganos tiendan a continuar el movimiento, encontrando rápidamente una contención en lo que los rodea, y deteniéndose a través de una brusca desaceleración. Pero los efectos devastadores de los impactos hacen que el efecto de la desaceleración sea prácticamente despreciable. Esto se puede ilustrar mediante el siguiente ejemplo. Si un automovilista sin cinturón de seguridad choca contra el volante a 80 km/h ($\cong 22,2$ m/s) y desplaza a este último diez centímetros hacia atrás, habrá sufrido una desaceleración de:

$$a = \frac{v^2}{2x} = \frac{(22,2 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 0,1 \text{ m}} \cong 2.460 \text{ m/s}^2 \cong 250 \text{ g (durante un tiempo de 0,009 s)}$$

Pero impactar el volante a 80 km/h equivale a golpear un volante en el suelo dejándose caer desde la siguiente altura:

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{(22,2 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} \cong 25 \text{ m} \cong 10 \text{ pisos}$$

Es decir, que probablemente las consecuencias del terrible golpe sobre el pecho o sobre la cabeza dejen el efecto de la brusca desaceleración en un segundo plano (que, ya se verá, no es mucho mayor a la teóricamente admisible). Por eso para diferenciar claramente los efectos de la desaceleración en el cuerpo humano, separados de los efectos de los impactos, se debe recurrir a los ensayos que se hicieron en la NASA buscando ampliar el conocimiento de este fenómeno para determinar muchos de los aspectos de las misiones espaciales⁴². Estos estudios realizados en la Base Holloman de la Fuerza Aérea entre 1946 y 1958 incluyeron ensayos de desaceleración sin impactos, utilizando un acelerador lineal que consistía en un carro autopropulsado que corría sobre rieles, con la participación de voluntarios de la fuerza aérea y de animales (generalmente chimpancés). Lo que queda claro de ese estudio (y de acuerdo a otras bibliografías al respecto) es que **la resistencia del cuerpo humano a la aceleración depende del tiempo durante el cual se es sometido a esa aceleración**. Los seres humanos resisten sin problemas la aceleración terrestre, y hay algunos ejemplos de resistencia de unos g adicionales, por lo menos por unos breves instantes, como los pilotos de Fórmula 1 quienes llegan a soportar 5 ó 6 g en algunas curvas. La mayoría de las montañas rusas se diseñan de manera que los usuarios no sean sometidos a aceleraciones superiores a los 3 g (y hasta el día de hoy no se ha demostrado que alguien haya muerto como consecuencia de esas aceleraciones). Lo que se debe tener en cuenta es que esos valores son relativamente bajos, por lo menos si se comparan con

⁴¹ Inclusive en el texto de la NASA (National Aeronautics and Spatial Administration) del que se extrajeron la mayoría de los conceptos de esta sección (19), hay partes en donde se mezclan algunos conceptos, por ejemplo en comentarios como este: "los voluntarios fueron sometidos a una fuerza de unos 30 g", confundiendo fuerza con aceleración.

⁴² Aceleraciones admisibles en el momento del despegue y en el reingreso en la atmósfera terrestre, por ejemplo.

los valores que se alcanzan durante un accidente automovilístico, y sobre todo que el tiempo durante el que sufren esas aceleraciones es muy corto. Cuando un ser humano es sometido a aceleraciones mayores durante un tiempo relativamente prolongado comienzan a producirse lesiones serias.

Esto se pudo comprobar durante los ensayos realizados en la base Holloman por la NASA, donde muchos de los animales murieron durante las pruebas. Esos decesos fueron provocados tanto por la magnitud absoluta de la aceleración, como por el tiempo a los que eran expuestos. Lo que sirvió para concluir que una alta aceleración durante un tiempo corto es igualmente peligrosa que una baja aceleración durante un tiempo prolongado. Y por analogía la teoría se extendió a los seres humanos, con los cuidados del caso.



El Coronel Stapp es uno de los pocos hombres que se han sometido a altas aceleraciones con fines de investigación.

Por eso para los voluntarios humanos se tomaron todos los recaudos necesarios para evitar daños importantes, sometiéndolos a aceleraciones de magnitudes que crecían progresivamente, haciendo las pruebas en las mismas máquinas que se utilizaban para los chimpancés. Así, en los ensayos hechos con la participación principal del Coronel Stapp y del Capitán Beeding, se pudieron resistir sin consecuencias graves, entre otras, las siguientes aceleraciones:

- 25 g durante 1,1 segundos, y 46 g durante 0,2 segundos.

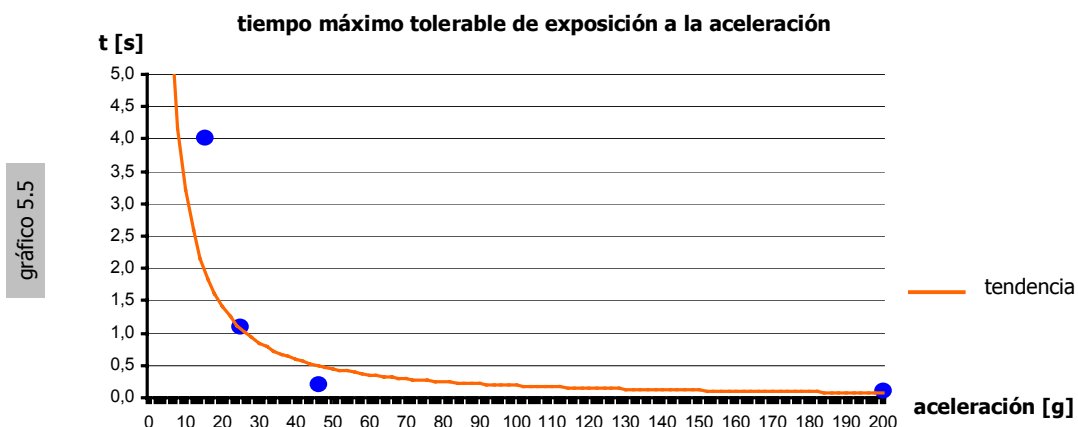
Otros ensayos realizados en un acelerador centrífugo en el Aero Medical Laboratory de Wright Field (perteneciente a la armada de los Estados Unidos) determinaron las siguientes aceleraciones tolerables por el cuerpo humano:

- 12 g durante 240 segundos, y 15 g durante 4 segundos

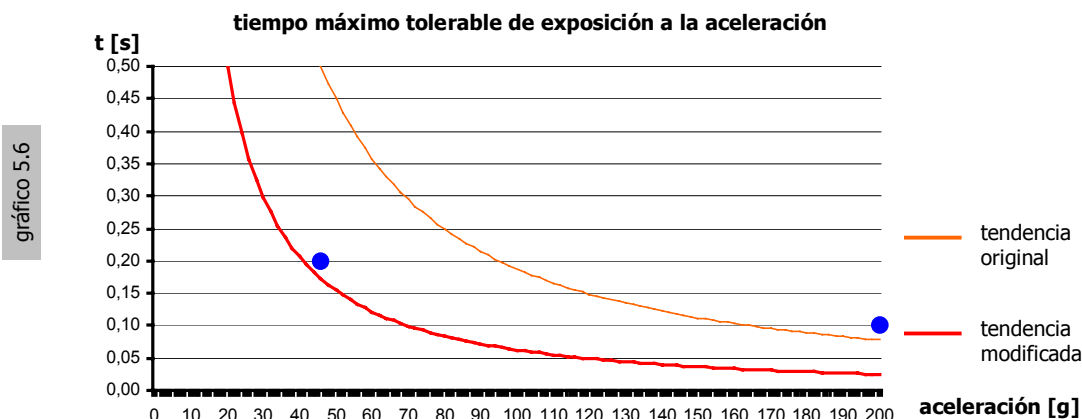
Del libro del doctor Hyde se puede tomar la referencia del siguiente límite de tolerancia (2):

- 200 g durante 0,01 segundos

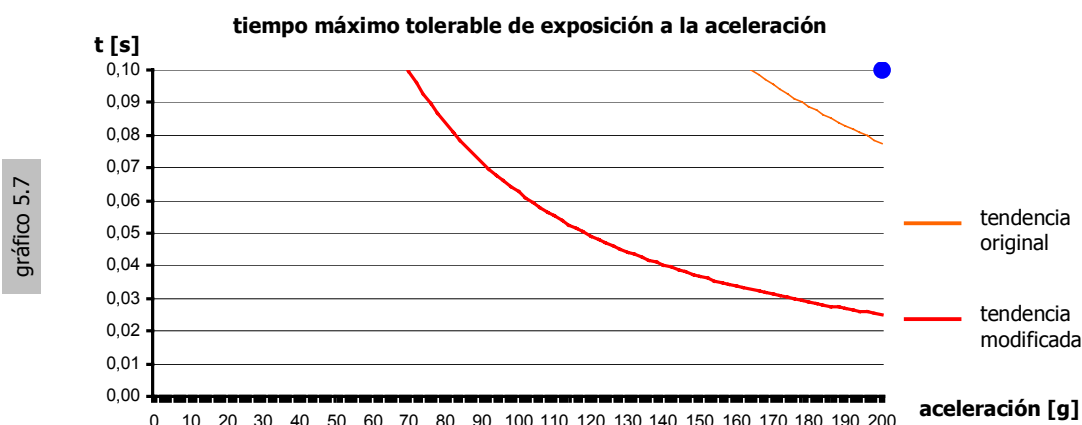
Con esos datos se puede construir el siguiente gráfico para observar el tiempo máximo al que se puede someter a una persona a una determinada aceleración (medida en g):



La curva en naranja se puede considerar una tendencia con una aproximación de baja precisión, ya que sólo se cuentan con unos pocos puntos disponibles (marcados en azul, con el punto [12 g, 240 s] incluido en el cálculo pero fuera de la escala del gráfico). La curva se hace asintótica en 1 g, que corresponde a la aceleración terrestre, sin límite de tiempo para la exposición a ella. Además, se puede considerar un error bastante apreciable en la curva, que deja dos de los cuatro puntos visibles bastante alejados de ella. Por eso es necesario concentrar el análisis en la zona de menores tiempos, que es la que corresponde a los fenómenos que ocurren durante los accidentes de automóviles. Se consideró una curva que corresponde a la misma tendencia de la curva naranja, pero que toma valores algo menores, de manera de estar por debajo del punto del ensayo de la NASA que indica que se puede resistir 46 g durante 0,2 s. La nueva curva (en rojo) se puede observar en el siguiente gráfico:



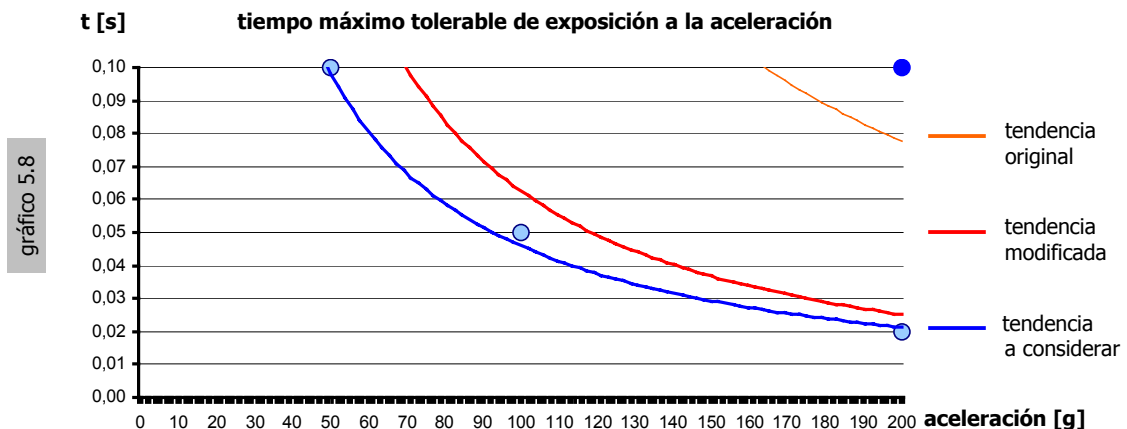
Obsérvese que, por ejemplo para aceleraciones de 200 g, la curva toma valores de tiempo máximo de exposición que están muy por debajo del punto tomado del libro de Hyde. Es decir, que si bien la bibliografía indica que se podrían resistir 200 g durante 0,1 segundos, la curva predice que esa aceleración se podría tolerar sólo durante unos 0,03 segundos. Es que dado el aparentemente escaso conocimiento de los expertos es preferible tomar altos coeficientes de seguridad para estar seguros de que la gran mayoría de la población podría, eventualmente, sobrevivir sin consecuencias a largo plazo a determinada aceleración durante un determinado período de tiempo. Desde ya que no es la intención de esta sección establecer ninguna teoría sobre la resistencia humana ni mucho menos, sino solamente tomar un valor de referencia para hacer algunos cálculos más adelante. En particular será de utilidad para los próximos capítulos analizar con mayor profundidad qué aceleraciones se pueden soportar por menos de 0,1 s (tiempo que coincide con la duración de los sucesos de un accidente de tránsito). Por eso se modifica una vez más la escala del mismo gráfico de acuerdo a lo siguiente, para observar con un detalle mayor la tolerancia máxima a la aceleración:



Siguiendo la misma línea de razonamiento en cuanto a la conveniencia de ser cuidadosos con los valores, se puede considerar un factor de seguridad de adicional. Por eso, si del gráfico se obtiene (curva roja) que 75 g se pueden resistir por 0,1 segundos, se establece que se pueden resistir sólo 50 g por el mismo tiempo. Con el mismo criterio explicado, los tiempos máximos de tolerancia que a partir de ahora se van a considerar válidos (y adecuadamente prudentes) para 25, 50, 100 y 200 g son los que se detallan a continuación:

- **25 g durante 0,2 segundos** (cinco veces menos que lo indicado por la NASA)
- **50 g durante 0,1 segundos**
- **100 g durante 0,05 segundos**
- **200 g durante 0,02 segundos** (cinco veces menos que lo indicado por Hyde)

Si se colocan los puntos en el gráfico anterior se pueden comparar los valores que se van a tomar como referencia, con los que inferidos de la bibliografía consultada:

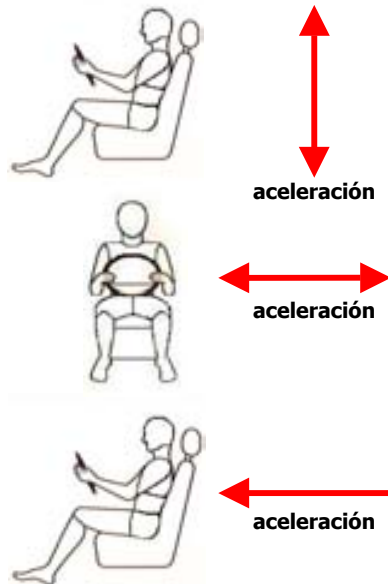


Hasta aquí lo que se refiere a los valores absolutos de aceleración tolerables, y al tiempo máximo de exposición a cada uno de ellos. Ahora se debe analizar otro aspecto, que se refiere a la dirección y sentido de la aceleración. Del informe de la NASA surge que la aceleración dirección longitudinal al cuerpo (paralela a la columna vertebral) es mucho más peligrosa que la aceleración en dirección transversal. Otra consideración –muy importante– que hicieron los expertos, y que además fue comprobada mediante estudios con chimpancés, es que la tolerancia a la aceleración es mayor si la persona está sentada con su espalda dirigida hacia el sentido de la aceleración, o sea, **exactamente al revés de lo que le sucede al ocupante de un automóvil en el momento de sufrir un accidente**. En pruebas donde algunos chimpancés fueron sometidos a casi 250 g, los que estaban sentados de la manera indicada anteriormente sobrevivieron sin daños permanentes, mientras que ninguno de los que estaban sentados mirando hacia delante lograron sobrevivir a las lesiones provocadas. Se puede recordar que en la sección anterior el doctor Hyde también indicaba que la aceleración lateral genera mayores daños al cerebro debido a los movimientos relativos del mismo con la base rugosa del cráneo. Resumiendo los conceptos relacionados con el fenómeno de aceleración y la tolerancia a ella de parte de los seres humanos se puede decir que, **para mejorar las probabilidades de supervivencia la aceleración debe, además de ser menor a ciertos valores en un tiempo dado, tener:**

- una dirección transversal al cuerpo.
- un sentido tal que empuje al ocupante hacia atrás.

Esto se puede ejemplificar a través de los siguientes esquemas:

direcciones y sentidos menos favorables



direcciones y sentidos más favorables



De donde se puede ver claramente que, excepto en el caso de los choques traseros, **la gran mayoría de los accidentes de tránsito exponen a los ocupantes a las situaciones menos favorables desde el punto de vista de la tolerancia a la aceleración.**

5.5. Conclusión del capítulo

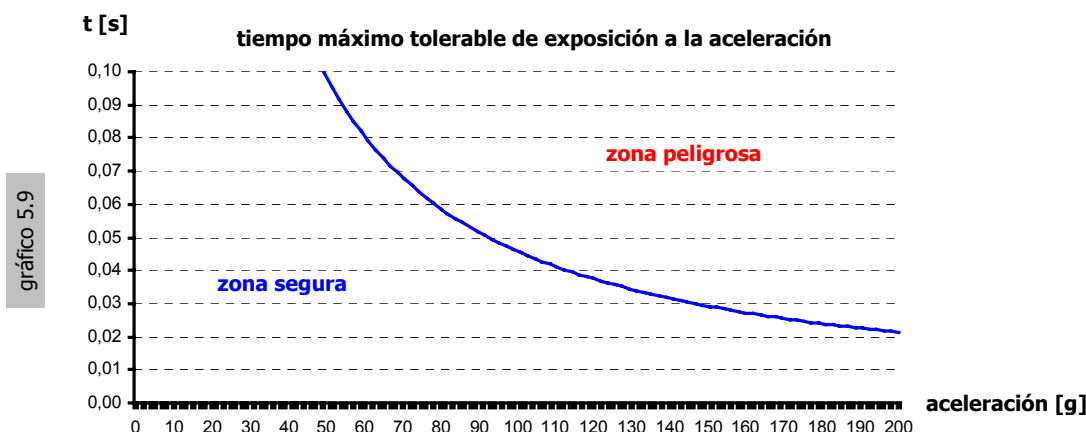
El modelo matemático que mejor se adapta a los requerimientos de esta Tesis para analizar el comportamiento de un automóvil durante un impacto es el que consiste en un sistema de una masa puntual y un resorte de tipo inelástico. Existen otros modelos propuestos por distintos expertos que presentan algunas desventajas con respecto al modelo citado, por lo menos en lo que respecta a las necesidades del trabajo. Para alcanzar mayor precisión en los resultados del análisis se debe recurrir a programas de computadora, que tampoco se corresponden con el objetivo de los próximos capítulos.

Además, los modelos más sofisticados se alimentan de datos empíricos realizados en condiciones menos severas que las de los accidentes reales, y por lo tanto no siempre sirven para indicar con precisión lo que ocurre con la estructura de un automóvil en los impactos a altas velocidades. De ahí que, una vez más, el modelo de una masa y un resorte inelástico sea el más adecuado para analizar los sucesos más importantes de un accidente de tránsito. El mismo concepto además se utilizará para modelizar lo que ocurre con los ocupantes y con el cinturón de seguridad, extendiendo los beneficios del modelo simplificado propuesto.

En cuanto a los mecanismos de daño al cuerpo humano y la resistencia a los impactos y aceleraciones, el estado de la Ciencia no permite establecer con claridad ni las formas de proteger adecuadamente a los seres humanos que sufren un accidente, ni los límites que estos últimos son capaces de soportar, a lo que se suma que cada persona reacciona de manera distinta a un mismo estímulo. La Biomecánica se encuentra en un estado de desarrollo donde los conocimientos acerca de los mecanismos de daño al cuerpo humano se limitan a una gran variedad de datos empíricos que no siempre permiten llegar a una explicación integral del fenómeno que provoca la lesión. Por otro lado, los últimos –y únicos– estudios relativamente exhaustivos con respecto a la resistencia a las aceleraciones se hicieron cerca de cincuenta años atrás, con voluntarios humanos que no lograban representar la enorme biodiversidad de la raza humana. Esto supone un grave problema debido a que esta falta de información puede llevar a los diseñadores de automóviles a construir vehículos que exponen a sus ocupantes a aceleraciones peligrosas durante el proceso de un impacto. Las posibilidades de ampliar el conocimiento actual de este campo de la biología humana son muy limitadas, debido a que los ensayos con animales o maniqués no permiten extrapolar adecuadamente los resultados de manera de predecir lo que sucedería con un ser humano. Por otro lado los ensayos con voluntarios vivos (o con cadáveres) están fuera de toda posibilidad, y en consecuencia lo más conveniente resulta ser considerar amplios márgenes de seguridad que permitan cubrir a la mayor parte de la población.

Así, y tomando en consideración los altos coeficientes de seguridad necesarios para compensar la falta de conocimiento, se pueden extraer algunas conclusiones sobre las cuales se basarán los próximos cálculos y estudios: por un lado, dado que los impactos resultan más peligrosos que las altas aceleraciones, se supone preferible someter a los automovilistas a una desaceleración importante antes que exponerlos a un impacto directo (o a un aplastamiento); en lo que respecta a las aceleraciones, se establece en un gráfico los límites de tiempo que resultan seguros para cada valor de aceleración; para terminar, se considera que la aceleración transversal al ocupante, y en sentido de generar un movimiento hacia atrás, es la menos peligrosa. Estas tres consideraciones son de suma importancia para el trabajo –y para los posibles futuros análisis– y tienen como objetivo establecer un marco de estudio que permita tanto evaluar la eficacia de los dispositivos de pro-

tección de los automóviles modernos, como al mismo tiempo diseñar nuevos elementos de seguridad de impacto, que darán lugar a la propuesta definitiva. Para terminar, lo que sigue es el gráfico que indica el tiempo máximo de tolerancia a la aceleración, deducido en función de las condiciones de borde de este capítulo (y que considera márgenes de seguridad lo suficientemente amplios como para compensar los posibles errores de la bibliografía consultada):



Reflexión

Existen dos graves carencias de conocimiento en el campo de la seguridad vial. Por un lado, en los aspectos que se refieren al comportamiento de la estructura del automóvil frente a un impacto. Y por el otro en lo que hace a las maneras de prevenir las heridas serias que generan los golpes o las altas aceleraciones a los que se someten los ocupantes de un vehículo en un accidente. En el primer caso, es necesario realizar ensayos que permitan estudiar en detalle lo que sucede con dicha estructura en un rango amplio de velocidades de impacto. Las pruebas actuales se hacen con una velocidad máxima de 64 km/h (que se reduce a 50 km/h en los impactos laterales) y por lo tanto sólo se conoce con una precisión adecuada el comportamiento de la zona del compartimiento del motor del auto. Los programas de simulación por computadora disponibles permiten predecir lo que ocurre con la carrocería de un automóvil frente a un accidente, pero todos se nutren de información empírica obtenida en los ensayos de impacto, por eso es necesario aumentar la velocidad de esas pruebas, de manera de poder entender y analizar los mecanismos de deformación de todo el automóvil (especialmente del habitáculo) a cualquier velocidad. La dificultad que se presenta en el segundo caso citado es que no es factible realizar ensayos con seres humanos para ampliar el conocimiento actual acerca de la resistencia a impactos o aceleraciones, y de la manera de minimizar las lesiones que provocan. Por lo tanto los avances son pequeños, basados en datos obtenidos en pequeñas muestras tomadas de algunos accidentes donde parte de los parámetros fundamentales (como velocidad y dirección del impacto, por ejemplo) muchas veces se deben deducir. A lo que se debe sumar el hecho que la necesidad de remover rápidamente el obstáculo del camino hace que mucha de la información potencialmente útil se pierda definitivamente.

Por eso, todo parece indicar que si bien resulta imposible utilizar a los seres humanos como conejillos de indias de los estudios de tolerancia humana, lo cierto es que todos los años varios millones de personas en todo el mundo se exponen a esta situación de ensayo y error. Los automóviles y sus dispositivos de protección se diseñan en función del conocimiento limitado de los mecanismos de daño y tolerancias, y se espera que

en el caso de un accidente los ocupantes resulten con el menor daño posible. Y si, por ejemplo, algún muestreo hecho por alguna institución respetable indica que hay demasiadas lesiones cuyo origen es el inflado del airbag, se baja la potencia de inflado de los mismos. Así se alimenta nuevamente el circuito, renovando con la nueva medida la **esperanza** de estar actuando en el sentido correcto.

Para terminar, se debe volver al tema del desconocimiento parcial de parte de los diseñadores de los mecanismos de daño y de la resistencia del cuerpo humano a golpes y aceleraciones. De esta manera, los ensayos se trasladan a la vida real, lejos de los laboratorios y luego, en función de los resultados estadísticos, se ajustan los parámetros de los elementos que protegen a los automovilistas. Bajo este razonamiento es que **los ocupantes de automóviles se pueden emparentar en muchos casos con simples conejillos de indias.**

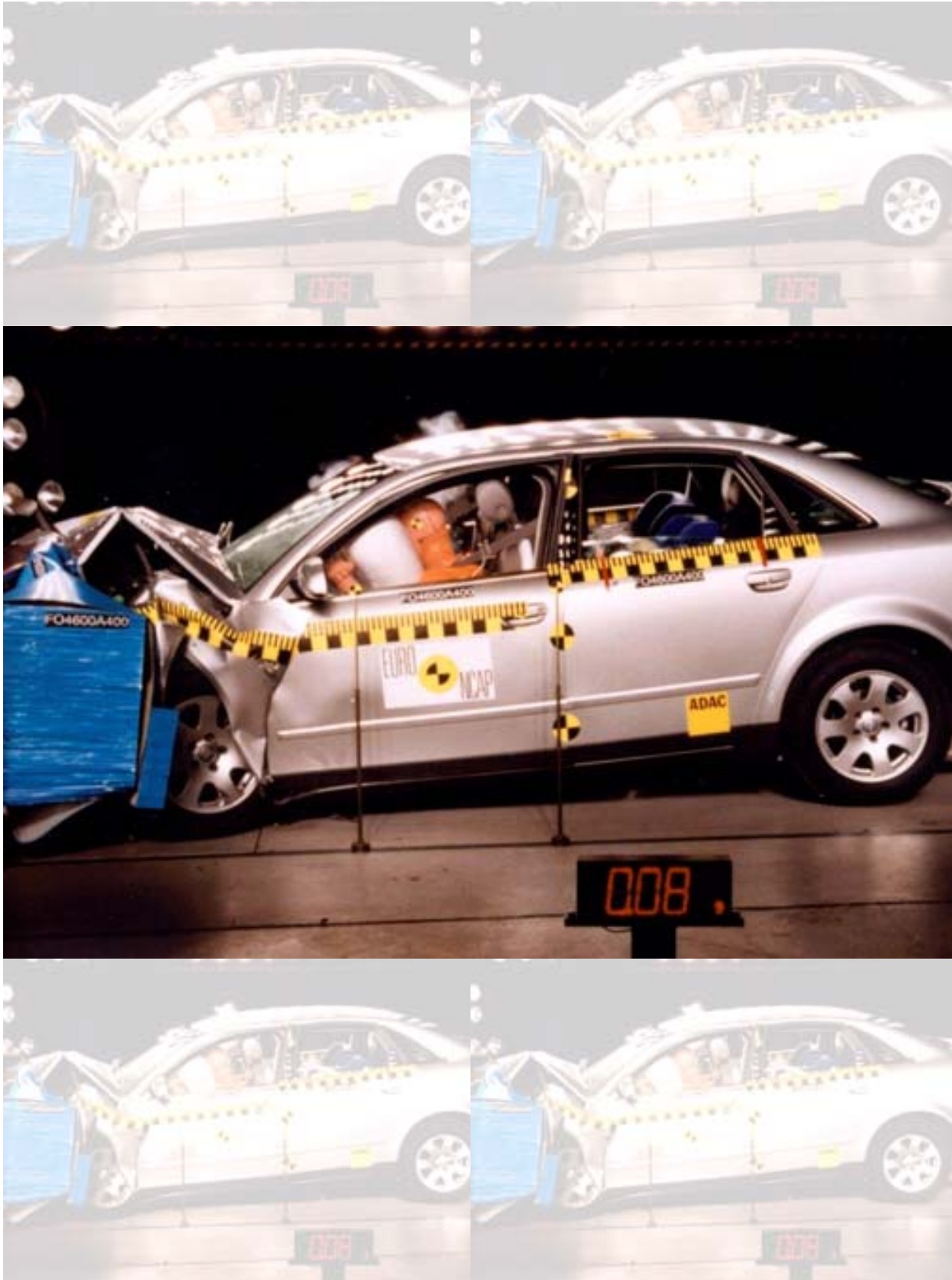


Se desconocen los efectos sobre el cuerpo que generan los accidentes a velocidades mayores a las de los ensayos de impacto.

5.6. Referencias del capítulo⁴³

- 1) *Peligroso a cualquier velocidad*. Nader R. (Editorial Jorge Alvarez – 1966)
- 2) *Crash injuries – how and why they happen*. Hyde A.S. (Hyde Associates Inc. – 1992)
- 3) **Rupture of the thoracic aorta and its relationship to road traffic accident characteristics*. Newman R.J., Rastogi S. (Injury 15 – 1984)
- 4) **Traumatic rupture of aorta*. Greendyke R.M. (JAMA 195:7 – 1966)
- 5) **Biomechanics of non-penetrating aortic rupture: a review*. Viano D.C. (SAE paper 831608 – 1983)
- 6) *Compatibility in frontal collisions: mass and stiffness ratio*. Jawad S. (ACME Department – University of Hertfordshire – Paper 98-S1-O14)
- 7) *Engineering analysis of vehicular accidents*. Noon R. (CRC Press – 1994)
- 8) *Speed kills, or does it not and why?* Kallberg V., Luoma J. (Technical Research Center of Finland – 1996)
- 9) **Reconstruction of motor vehicle accidents, a technical compendium: Computer aids for accident investigation*. Mc Henry R. (SAE PT-34)
- 10) **Traffic accident reconstruction: Work, energy and speed from damage in traffic accidents*. (Northwestern University Traffic Institute)
- 11) *A comparison of crush stiffness characteristics from partial-overlap and full-overlap frontal crash tests*. Neptune J. (SAE 1999-01-0105 – 1999)
- 12) *Lower extremity injuries and their causation in frontal car crashes: real-world accident data collection*. Thomas P., Bradford M., Charles J., Fay P. (Pelvic and lower extremities Conference / Washington – 12/1995)
- 13) **Submarining injuries of 3 point belted occupants in frontal collisions – description, mechanisms and protection*. Leung Y.C., Tarriere C., Lestrelin D., Got O. Guillon F., Patel A., Hureau J. (SAE paper 821158 – 1982)
- 14) **Myocardial rupture caused by trauma*. Dow R.W. (Surgery 91 – 1981)
- 15) *Spinal Burst or Compression Fractures within Automotive Crashes Due to Vertical Force Components*. Molz F., Warren Bidez M., Zeidler F., Breitner R. (SAE Paper 970498)
- 16) **Survey of one hundred cases of whiplash injuries after settlement of litigation*. Gotten N. (JAMA 162 – 1956)
- 17) *Morir da trabalho*. Peicovich E. (Revista La Nación – 3/2003)
- 18) *Traffic Safety Facts 2000*. (National Highway Traffic Safety Administration – U.S. Department of Transportation – 2002)
- 19) *History of research in space biology and biodynamics at the U.S. Air Force Missile Development Center Holloman Air Force Base, New Mexico 1946 – 1958*. (Historical Division Office of Information Services Air Force Missile Development Center Air Research and Development Command Holloman Air Force Base, New Mexico - NASA)

⁴³ Las referencias que comienzan con un asterisco corresponden a textos citados en la bibliografía consultada y que han sido leídos en su totalidad.



6. Evaluación de la protección actual

"La razón principal por la cual el automóvil ha sido el único vehículo que ha escapado a un análisis serio por parte de la opinión pública es que no se ha dado la información necesaria para que ello ocurra; además, no se ha presentado en el mercado la competencia que hubiera permitido al consumidor exigir, con la ayuda del gobierno, un producto seguro, eficiente, que no contamine el aire y que pueda ser producido económicamente. La expectativa del público en cuanto a innovaciones se ha mantenido deliberadamente en un nivel muy bajo y ha sido orientada casi exclusivamente a pequeños cambios anuales de estilo".

Raph Nader, *Peligroso a cualquier velocidad* (1965)

-
- **Patrones de accidentes viales**
 - **Bases de la seguridad en accidentes**
 - **Comportamiento de la estructura del automóvil moderno**
 - **Comportamiento los dispositivos de sujeción**
 - **Análisis de resultados de programas de ensayo**

6.1. Introducción y resumen del capítulo

Los automóviles modernos cuentan con más y mejores dispositivos de protección ante accidente que sus antecesores, aunque al mismo tiempo las condiciones de los accidentes han ido cambiando, involucrando cada vez mayores energías, aumentando entonces su peligrosidad. Es por eso, y de acuerdo a lo dicho en los capítulos anteriores, que esa protección sigue siendo insuficientemente efectiva al momento de evitar la creciente cantidad de muertes y lesiones que a diario provocan los accidentes de tránsito en el mundo. O sea, que lo importante no es determinar qué tipo de avances se han logrado en los últimos años en referencia a la seguridad de los ocupantes de un automóvil sino la medida en que esos nuevos dispositivos satisfacen las necesidades cambiantes.

En este contexto, los ensayos que se hacen a los vehículos representan apenas un choque "medio", dejando afuera a los accidentes más peligrosos. En este capítulo se analizan los patrones más relevantes de los accidentes viales de donde se puede deducir que es bastante probable que la media de la velocidad a la que ocurren los impactos se acerque a los 64 km/h de los ensayos más difundidos. Lo cual significa que tal vez la mitad de los accidentes ocurran a velocidades mayores, y ni la industria automotriz ni los organismos oficiales demuestran conocer que sucede con los automóviles en impactos mayores a la velocidad anteriormente citada. Tampoco se evalúan las respuestas ante los vuelcos ni los incendios, dejando fuera de los ensayos dos fenómenos poco frecuentes pero altamente peligrosos. A esto se le suma el hecho que los choques entre un vehículo y un objeto fijo –que se ensayan– son sustancialmente distintos a los que se producen entre dos vehículos –y que no se ensayan a pesar de ser no solamente los más frecuentes sino los más peligrosos–.

Y en esto el automóvil puede considerarse un producto que queda fuera de toda lógica de diseño, ya que es impensable que algo se proyecte en función de límites que representan las condiciones de uso medias, en lugar de hacerlo en función de las condiciones de uso más exigentes, y sobre eso aplicar coeficientes de seguridad adecuados. Ensayar algo en función del parámetro promedio es tan absurdo como el siguiente ejemplo. Se puede suponer que el ascensor de un edificio con capacidad para cuatro personas suben a veces cuatro, otras tres, otras dos y otras una sola. Y que en promedio dicho aparato viaja con dos personas a bordo. Considerando entonces el promedio de dos personas a bordo alguien que esté evaluando la seguridad del ascensor –y que comparta los criterios de ensayos de quienes evalúan a los automóviles– podría decir que se debería ensayar la resistencia del cable, de los frenos, etc., para una masa de unos 150 kg. (dos personas de 75 kg. cada una). Si todo funciona correctamente se puede sentir satisfecho de que la mayoría de las personas que viajan en el ascensor lo harán de manera segura. Claro que luego de esto el ascensor se podría desplomar con cuatro personas a bordo, contradiciendo su función y exponiendo innecesariamente a los ocupantes inadvertidos. Y por absurda que parezca esta situación lo cierto es que algo bastante similar es lo que ocurre con los ensayos de los automóviles, donde las velocidades de los impactos probablemente sean de una magnitud cercana a la del promedio de los accidentes de tránsito, pero que son sensiblemente inferiores a las que los vehículos pueden desarrollar, inclusive haciéndolo de acuerdo a lo que dicen las leyes.

Por eso es que en este capítulo se va a analizar la capacidad que ofrecen los automóviles actuales de proteger a sus ocupantes, en las condiciones más severas de circulación, considerando los límites legales. Comenzando por los patrones de los accidentes de tránsito, y luego de establecer las bases de la seguridad, se pa-

sará a evaluar la capacidad de los dispositivos de seguridad más relevantes (la carrocería y los medios de sujeción) en las condiciones indicadas.

Resumen del capítulo

Antes de comenzar con la evaluación de la protección que ofrecen los automóviles modernos es importante analizar algunos **patrones de accidentes viales** para poder tener una idea integradora acerca de cuales son las condiciones de borde del problema de los accidentes, y en función de ellas hacer las correspondientes evaluaciones:

- la gran mayoría de los vehículos involucrados en un accidente son automóviles o camionetas.
- son mucho más frecuentes los choques entre múltiples vehículos que aquellos donde interviene uno solo.
- la velocidad media de los accidentes en los EE.UU. probablemente sea de unos 70 km/h.
- en el caso de los accidentes fatales ese valor probable sube a 83 km/h (y en el 72% de los casos ocurren en lugares donde el límite de velocidad supera los 64 km/h).
- los accidentes más frecuentes, de acuerdo al punto inicial del impacto son, en orden, los accidentes frontales, los laterales y por último los traseros.
- las posiciones del auto menos seguras son las que corresponden al conductor, y acompañante delantero, seguidas por el quinto ocupante. Desde otro punto de vista, esto equivale a decir que no todos los ocupantes están protegidos de la misma manera.
- existen tres fenómenos de extrema peligrosidad que se deberían evitar: la eyección de los ocupantes, el vuelco del vehículo y el incendio del mismo.

Con respecto a las **bases de la seguridad en accidentes**, y de acuerdo a una segmentación de las funciones que deben desempeñar los dispositivos de seguridad de acuerdo al momento en que actúan, los objetivos que se deben alcanzar son:

- controlar el perfecto funcionamiento y uso de los dispositivos de seguridad.
- establecer el riesgo potencial (básicamente a través de la velocidad de circulación) y ajustar la configuración del vehículo de acuerdo a cada circunstancia.
- recoger y procesar la información necesaria para que actúen los dispositivos de protección durante el impacto.
- mantener la integridad estructural del espacio vital de los ocupantes.
- evitar la penetración de objetos al espacio vital de los ocupantes.
- absorber la totalidad de la energía de movimiento del vehículo y de los ocupantes (para evitar choques de tipo elástico o cambios instantáneos de velocidad), manteniendo la desaceleración en niveles tolerables.
- evitar cualquier contacto con las superficies potencialmente peligrosas del interior del vehículo.

- proteger a los ocupantes en caso de producirse un incendio.
- dar aviso a los servicios de atención médica más cercanos.
- permitir la rápida extracción de las víctimas para ser atendidas.

Los aspectos más relevantes del **comportamiento de la estructura del automóvil moderno** son los siguientes:

- para evitar impactos directos es necesario mantener la integridad estructural del habitáculo –respetando el espacio vital de los ocupantes– pero en el caso de los vehículos modernos se puede comprobar que la deformación del habitáculo en accidentes a altas velocidades es de una magnitud considerable, especialmente en los impactos frontales y laterales, aunque en el caso de los choques traseros la deformación no parece ser peligrosa. A esto se suma que las superficies vidriadas ofrecen una resistencia mecánica insuficiente a la intrusión de objetos externos, que pueden dañar severamente a los ocupantes del vehículo.
- de acuerdo con lo analizado en el capítulo anterior, es imprescindible que el habitáculo no sea expuesto a altas aceleraciones, y por lo tanto se debe evitar que ocurran choque de tipo elástico o variaciones instantáneas de velocidad.
- con el tipo de estructura actual, es imposible evitar que ocurran choques de tipo elástico o variaciones instantáneas de velocidad en el caso de impactos entre dos vehículos que circulan en igual dirección y sentidos contrarios.
- para los impactos contra objetos fijos, los automóviles actuales no pueden evitar que ocurran choques de tipo elástico en impactos frontales de más de 80 km/h.
- en el caso de los impactos laterales, y suponiendo que el habitáculo tuviera la rigidez necesaria para no aplastar a los automovilistas, los choques elásticos se producirían a velocidades tan bajas como 20 km/h.
- por último, en los impactos traseros la estructura tiene una longitud suficiente para evitar choques elásticos, siempre y cuando se trate de automóviles de tres volúmenes (es decir con baúl trasero).

El análisis del **comportamiento de los dispositivos de sujeción** incluye los siguientes puntos de importancia:

- los conductores no sujetos se exponen a choques de una violencia extrema al ser lanzados contra el interior del vehículo.
- el cinturón de seguridad, incluso en accidentes de baja velocidad, tiene la capacidad de retener adecuadamente el cuerpo de los automovilistas, pero no puede evitar que el conductor golpee con su cabeza el volante.
- la eficacia del cinturón de seguridad se ve seriamente comprometida cuando el habitáculo es sometido a un choque de tipo elástico, o a una variación instantánea de la velocidad, ya que en esos casos el ocupante se expone a un tipo de impacto similar al que sufriría de no estar sujeto. Así, se puede estimar que el cinturón de seguridad es:
 - a) poco o nada eficaz en accidentes a velocidades > 80 km/h.
 - b) medianamente eficaz en accidentes a velocidades entre 50 km/h y 80 km/h.

c) muy eficaz en accidentes a velocidades < 50 km/h.

- la eficacia del cinturón de seguridad aumenta con el uso del pretensionador, generando picos de aceleración menores, durante un tiempo mayor, con respecto al cinturón de seguridad convencional que, según lo que indican los expertos, implicaría menores riesgos para los ocupantes. Sin embargo, para actuar de manera correcta, se debería contar con los datos pertinentes (masa de los ocupantes, velocidad del impacto, etc.) medidos con anterioridad al accidente.
- de todas maneras, el cinturón de seguridad es el responsable de salvar unas 315.000 muertes anuales sólo en los Estados Unidos, y por lo tanto, es uno de los factores principales de la reducción de la cantidad de víctimas por kilómetro recorrido tomando como comparación los datos de varias décadas atrás, cuando su uso no era obligatorio.
- en cambio el airbag contribuye en una menor medida a la seguridad de los ocupantes, y en algunos casos inclusive la empeora (cuando el impacto no es frontal por ejemplo).

Del **análisis de resultados de programas de ensayo** se puede resaltar:

- los dos objetivos de los programas de mayor difusión son: proveer información a los potenciales compradores de automóviles para ayudarlos a tomar la mejor decisión de compra; e incentivar a los fabricantes de autos a mejorar la protección que sus vehículos ofrecen a los ocupantes durante los impactos, y al mismo tiempo a hacer que sean menos propensos a sufrir vuelcos.
- la información provista por ellos, además de ser útil es de libre y fácil acceso, ha demostrado ser un buen incentivo para que los fabricantes mejoren la seguridad de los automóviles.
- quedan sin resolver: una mayor integración entre los distintos programas, una mejora en la cantidad y calidad de información, y, fundamentalmente, la realización de ensayos que expongan a los automóviles a condiciones más severas (mayores velocidades de impacto, choques entre vehículos que circulan en sentidos contrarios, vuelcos e incendios).
- para terminar, algunas estimaciones que indican que los automóviles que representan la media actual de los vehículos ensayados, es decir aquellos que reciben cuatro estrellas en el programa EuroNCAP, en caso de accidente grave tienen aproximadamente un 65% de probabilidad de causar heridas serias o fatales a sus ocupantes.

6.2. Patrones de accidentes viales

Usando el mismo argumento del capítulo 2, la base de datos adecuada para indicar algunas tendencias relevantes de las características de los accidentes de tránsito corresponde a la elaborada por la NHTSA (1). Y, como es conveniente separar los sucesos que ocurren con el automóvil de los que ocurren en el interior del mismo, se van a considerar dos grupos de estadísticas. Por un lado las correspondientes al **automóvil**:

- a) tipos de vehículos que intervienen en los accidentes.
- b) cantidad de vehículos involucrados en una colisión.
- c) velocidad a la que ocurren los impactos.
- d) sector del automóvil que sufre el primer impacto.

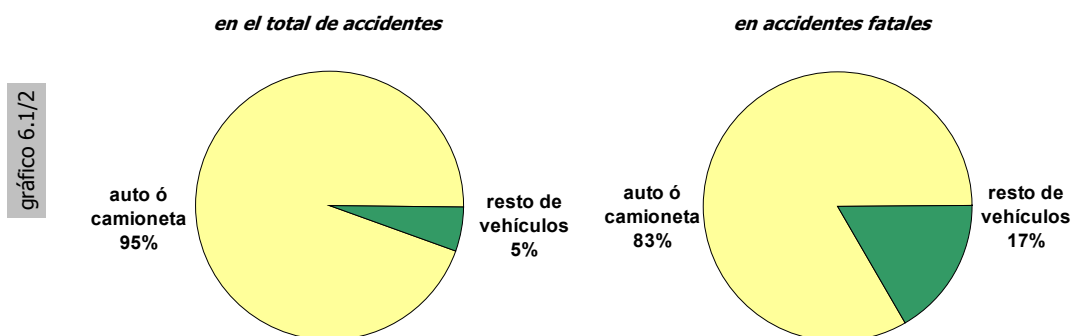
Y por el otro lado algunos indicadores desde el punto de vista de los **ocupantes**:

- a) riesgo asociado a la posición ocupada en el vehículo.
- b) riesgo asociado a la eyección de los ocupantes.
- c) riesgo asociado al vuelco del automóvil.
- d) riesgo asociado al incendio del automóvil.

Tipos de vehículos que intervienen en los accidentes

Hasta ahora se han usado "vehículo" y "automóvil" como sinónimos, pero lo cierto es que además de los autos, las estadísticas involucran camionetas, camiones, autobuses y motocicletas. La intención de esta sección es concentrarse en las primeras dos categorías de las estadísticas de la NHTSA ("cars" y "light truck") que incluyen los automóviles, las camionetas del tipo "todoterreno" y los familiares. La razón de esto es que se trata de los vehículos de mayor matriculación no sólo en Estados Unidos sino en todo el mundo, y de los que comúnmente representan la mayoría de los vehículos involucrados en accidente, como se puede ver aquí:

Tipo de vehículo involucrado (EE.UU. – 2000)

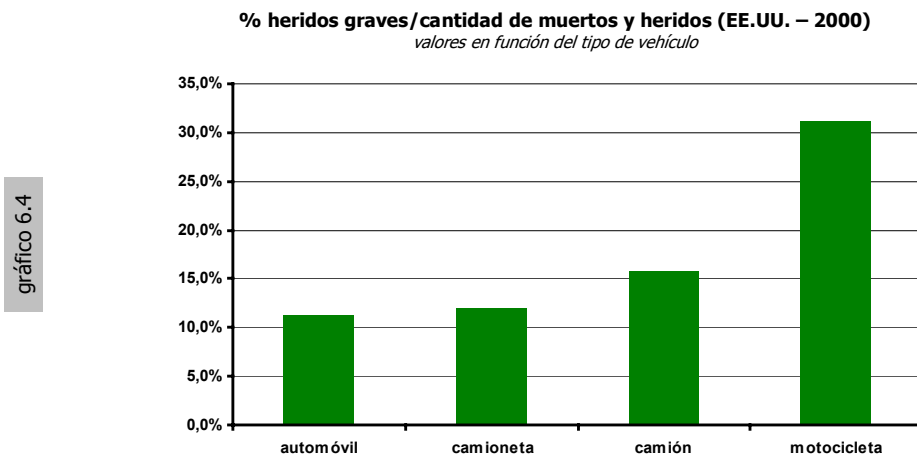
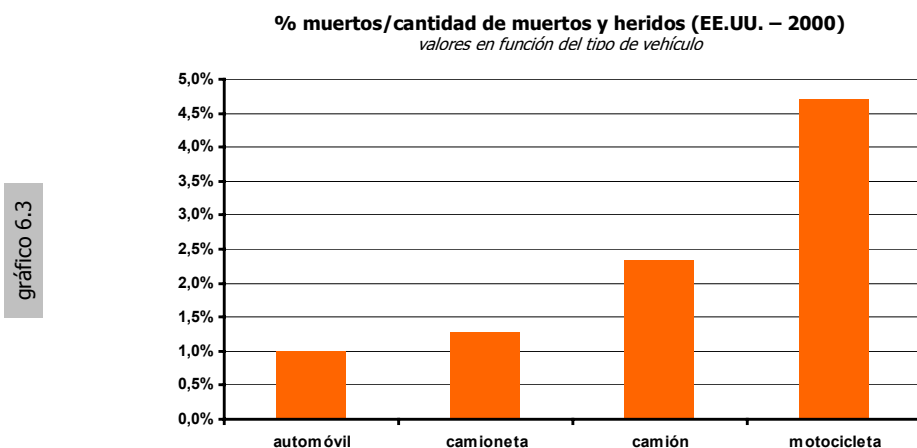


La mayor proporción del resto de los vehículos en accidentes fatales se puede explicar básicamente por la gran cantidad de víctimas que circulaban en motocicletas, tal como

se puede deducir del siguiente cuadro de riesgo relativo para los ocupantes según el tipo de vehículo ocupado:

tabla 6.1

	tipo de vehículo ⁴⁴			
	automóvil	camioneta	camión	motocicleta
mueitos	20.492	11.418	741	2.862
heridos graves ⁴⁵	232.000	108.000	5.000	19.000
heridos leves	1.820.000	779.000	26.000	39.000
% muertos/total muertos y heridos	1,0%	1,3%	2,3%	4,7%
% heridos graves/total muertos y heridos	11,2%	12,0%	15,8%	31,2%



Es sorprendente que los automóviles sean un tipo de vehículo que genera menos riesgos (entendido como menor cantidad de muertos y heridos graves como porcentaje del total de víctimas de accidentes en Estados Unidos en el año 2000) que las camionetas o los camiones. En lo que hace a las motocicletas, resulta lógico que, siendo que el ocupante del vehículo forma parte de la carrocería del mismo, la cantidad de muertos y heridos superen con creces las proporciones del resto.

⁴⁴ No incluye 736 muertos y 27.000 heridos en otros tipos de vehículos.

⁴⁵ Víctimas de heridas que generaron algún tipo de discapacidad permanente.

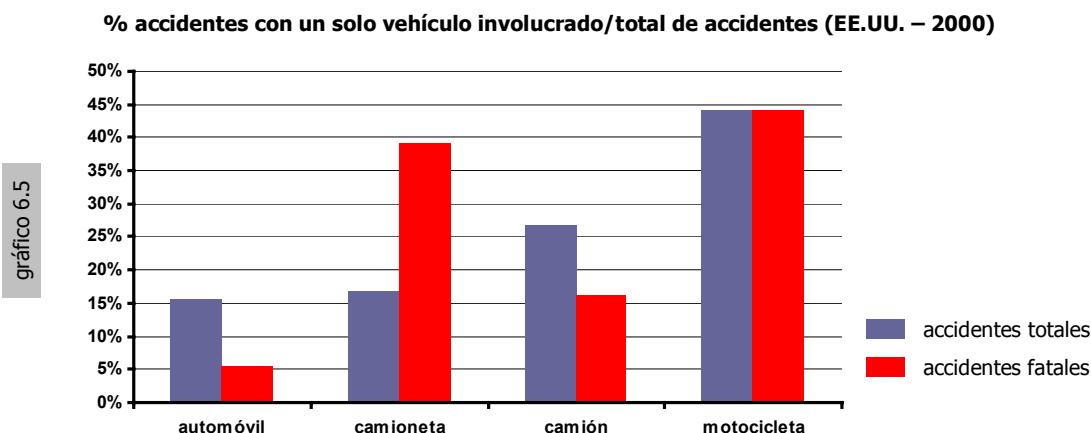
Cantidad de vehículos involucrados en una colisión

Otro de los aspectos relevados en el informe de la NHTSA es la cantidad de vehículos involucrados en cada accidente, separados en accidentes donde interviene un solo vehículo (chocando contra un poste o un árbol, por ejemplo) y accidentes con más de un automóvil. Los datos permiten realizar el siguiente cuadro:

tabla 6.2

cantidad de vehículos involucrados	cantidad en unidades por tipo de vehículo			
	automóvil	camioneta	camión	motocicleta
accidentes totales				
un solo vehículo	1.090.000	650.000	122.000	31.000
múltiples vehículos	5.800.000	3.201.000	334.000	39.000
accidentes fatales				
un solo vehículo	1.028	7.934	802	1.302
múltiples vehículos	17.288	12.361	4.121	1.638

De aquí se puede observar **que hay una mayor proporción de accidentes entre múltiples vehículos**. Un segundo aspecto a analizar tiene que ver con la gravedad de los accidentes en donde participa un solo vehículo:



Una de las conclusiones que se pueden hacer del gráfico es que en el caso de los automóviles **los accidentes donde hay un solo vehículo involucrado no son solamente menos frecuentes que los que donde intervienen más de uno, sino que además son menos peligrosos** (hay menos proporción de accidentes fatales con un solo automóvil involucrado que accidentes totales en la misma condición). La otra conclusión es que en el caso de las camionetas la situación es distinta. La proporción de accidentes fatales con un solo vehículo involucrado aproximadamente duplica la proporción de accidentes totales, lo que indica el choque de una camioneta contra un objeto fijo es mucho más peligroso que el de un automóvil. Esto es un indicio de que la energía de movimiento es un factor de vital influencia en el resultado de un accidente, ya que las camionetas son vehículos cuya masa promedio es mucho mayor que la de los automóviles, y en consecuencia esa mayor energía cinética del impacto los convierte en eventos de mayor peligrosidad.

Velocidad a la que ocurren los impactos

Las estadísticas de la NHTSA no indican la velocidad a la que ocurren los impactos, como consecuencia de que pocas veces se la registra ya que es necesario recurrir a peritos especializados para determinarla⁴⁶. Existe, sin embargo, una buena manera de aproximar un valor a través de la velocidad de circulación permitida en el lugar del accidente. En la siguiente tabla se pueden ver los valores correspondientes al año 2000 para los Estados Unidos:

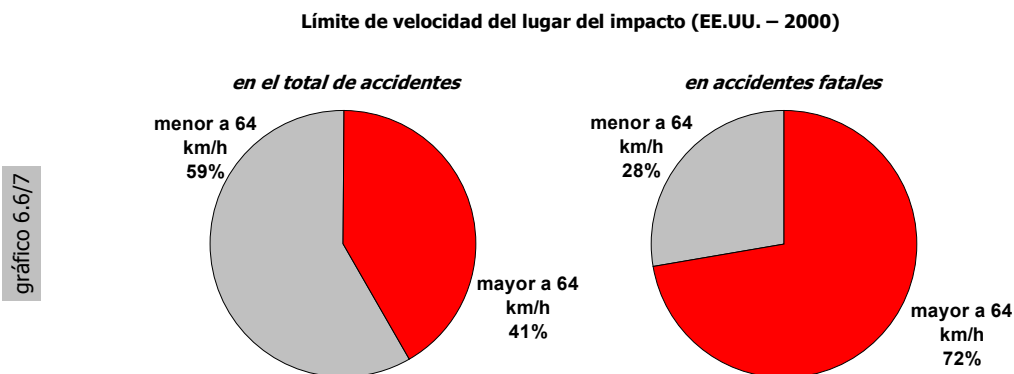
tabla 6.3

límite de velocidad	cantidad de accidentes en unidades	
	accidentes totales	accidentes fatales
< 48 km/h	1.650.000	3.841
entre 49 km/h y 64 km/h	2.078.000	6.284
entre 65 km/h y 80 km/h	1.209.000	6.595
entre 81 km/h y 88 km/h	898.000	12.026
entre 89 km/h y 112 km/h	534.000	7.542

En consecuencia, las velocidades promedio, ponderadas en función de la cantidad de accidentes ocurridos en cada zona con su correspondiente límite de velocidad (y bajo la suposición de que el accidente ocurrió a la velocidad máxima permitida en cada zona) son:

- **en el total de accidentes: 70 km/h.**
- **en accidentes fatales: 83 km/h.**

Sin embargo, se debe considerar que los 112 km/h de velocidad máxima permitida en los Estados Unidos son menos que los de la mayoría de los países, incluyendo por supuesto el nuestro, donde el límite es de 130 km/h (lo que implicaría una velocidad promedio para los accidentes algo mayor). Otro aspecto interesante a observar es la proporción de accidentes que ocurren a menos de 64 km/h y compararla con la proporción de accidentes a mayor velocidad:

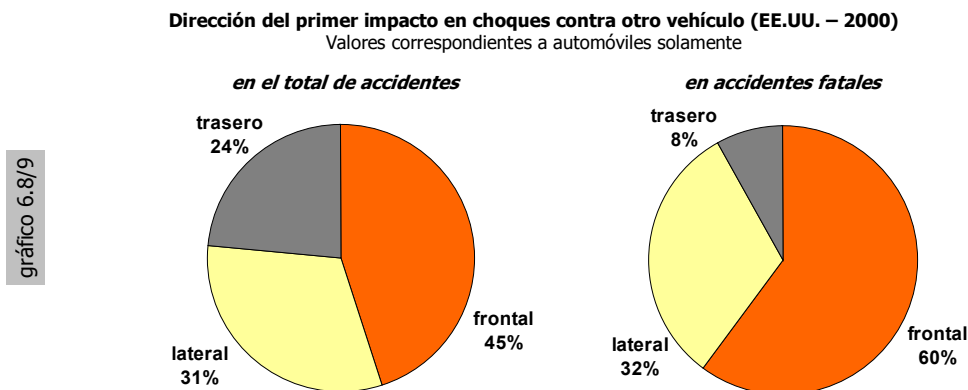


O sea que algo más del 40% del total de accidentes probablemente ocurran a velocidades mayores a 64 km/h, a lo que se suma que la gran mayoría de los accidentes fatales involucrarían velocidades mayores a 64 km/h. Sin embargo, esa es la velocidad máxima de los ensayos de impacto que se realizan en la actualidad.

⁴⁶ Como se dijo, en algunos casos la necesidad de remover rápidamente los obstáculos del camino hace que sea imposible reconstruir adecuadamente la situación como para precisar la velocidad de los vehículos involucrados.

Sector del automóvil que sufre el primer impacto

Dentro del informe que se está usando como base para el análisis de esta sección existen datos discriminados por tipo de vehículos y otros consolidados en un total general. En el caso de la dirección principal del impacto la NHTSA indica las cantidades que corresponden a cada tipo de vehículo por separado, y como el objetivo de esta Tesis es estudiar las mejoras posibles en los automóviles, se van a considerar los valores correspondientes a ese tipo de vehículos, con los cuales se pueden construir los siguientes gráficos:



Queda claro entonces que **los choques más peligrosos y frecuentes son los frontales, seguidos por los laterales, y por último los traseros**. Es bueno comentar que si bien los dos principales tipos de accidentes son ensayados con regularidad, no hay informes de los programas del tipo EuroNCAP que incluyan el desempeño de los automóviles en accidentes traseros.

Riesgo asociado a la posición ocupada en el vehículo

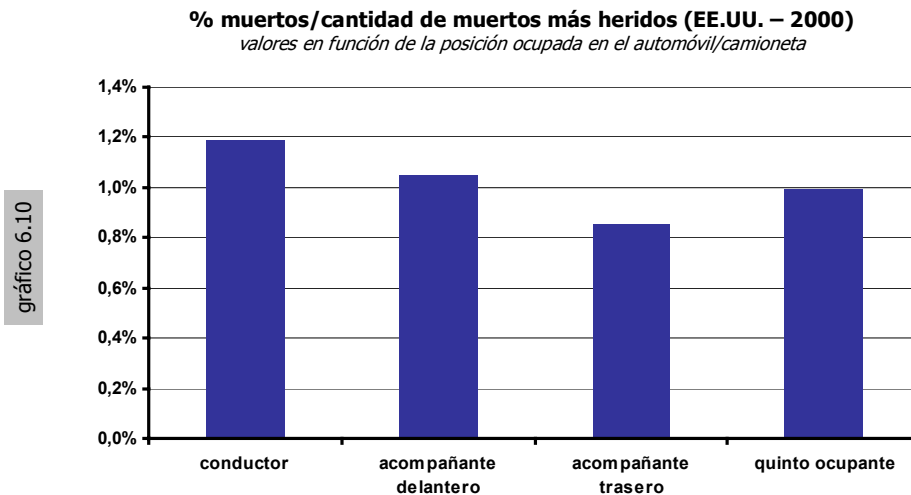
La mayoría de las campañas de seguridad recomiendan colocar a los menores en los asientos traseros, que son los más seguros de un automóvil. Muchos países inclusive obligan por ley a los padres a sentar a sus hijos en esos lugares. Esto se confirma en las estadísticas, tal como se puede observar a continuación:

tabla 6.4

	conductor	acompañante delantero	acompañante trasero	quinto ocupante ⁴⁷
cantidad de personas muertas	23.927	6.465	2.192	442
cantidad de personas heridas	1.988.000	609.000	255.000	44.000
% muertos/(muertos + heridos)	1,19%	1,05%	0,85%	0,99%

De donde se puede obtener el siguiente gráfico:

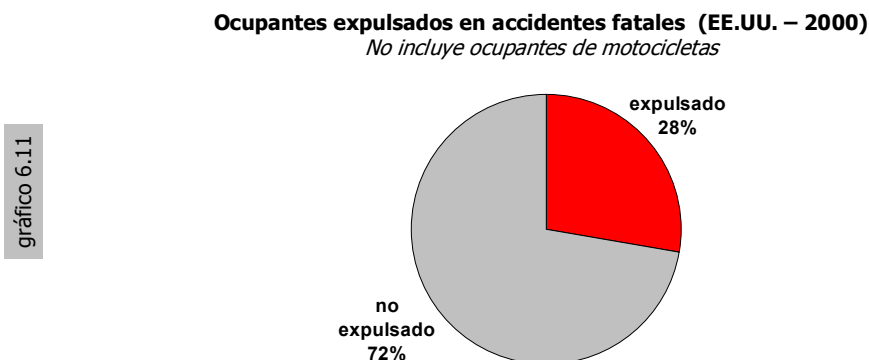
⁴⁷ Ocupante de la posición central del asiento trasero.



Se puede observar que el pasajero que ocupa la posición central del asiento trasero corre un riesgo mayor que los otros dos ocupantes, tal como resulta lógico si se considera que muchos autos proveen un cinturón de seguridad lumbar (de dos puntos en lugar de tres) y que ese quinto ocupante tiende a filtrarse entre los dos asientos delanteros, yendo a incrustarse contra el tablero, mientras que los otros ocupantes del asiento trasero golpean contra los más mullidos respaldos de los asientos de los ocupantes delanteros. Por último, los conductores corren más riesgos, probablemente debido a la presencia de elementos potencialmente peligrosos como el volante y algunas partes del tablero (incluyendo también los pedales), a diferencia de los acompañantes que tienen mayor espacio libre de objetos.

Riesgo asociado a la eyección de los ocupantes

Según la fuente consultada, en los Estados Unidos menos del 0,1% de los ocupantes que sufren accidentes es expulsado del vehículo, pero cuando eso sucede las consecuencias son muy graves⁴⁸:



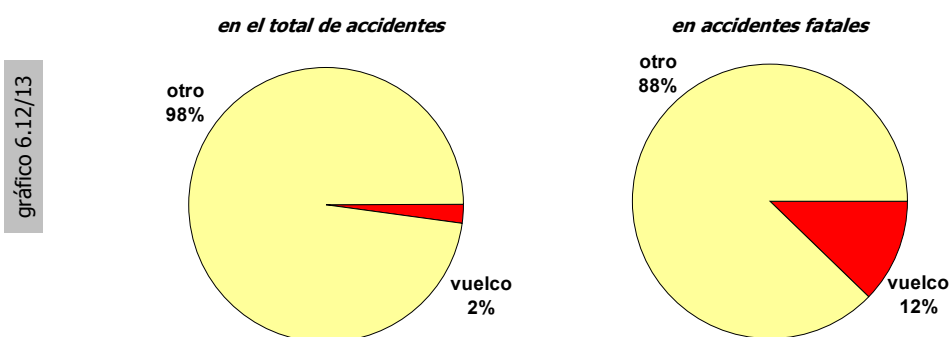
⁴⁸ Los valores del gráfico no incluyen a los ocupantes de motocicletas.

Así se observa la gran peligrosidad que entraña ser expulsado del vehículo, siendo **un fenómeno que provoca alrededor del 30% de las muertes de los ocupantes de vehículos.**

Riesgo asociado al vuelco del automóvil

La situación anterior se repite en el caso de los vuelcos, que representan un pequeño porcentaje de los accidentes totales, pero que aumentan sensiblemente su participación en el caso de los accidentes fatales:

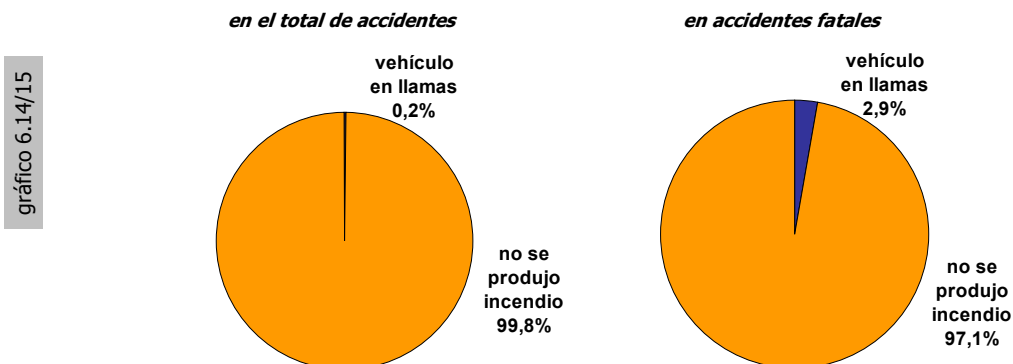
Accidentes con vuelcos involucrados (EE.UU. – 2000)



Riesgo asociado al incendio del automóvil

Por último se suma a los dos casos anteriores el fenómeno de los incendios, de baja frecuencia de ocurrencia, pero de extrema peligrosidad hasta el punto de representar un porcentaje mucho mayor del total de accidentes fatales comparados con el mismo índice en el total de accidentes:

Accidentes con ocurrencia de incendio (EE.UU. – 2000)

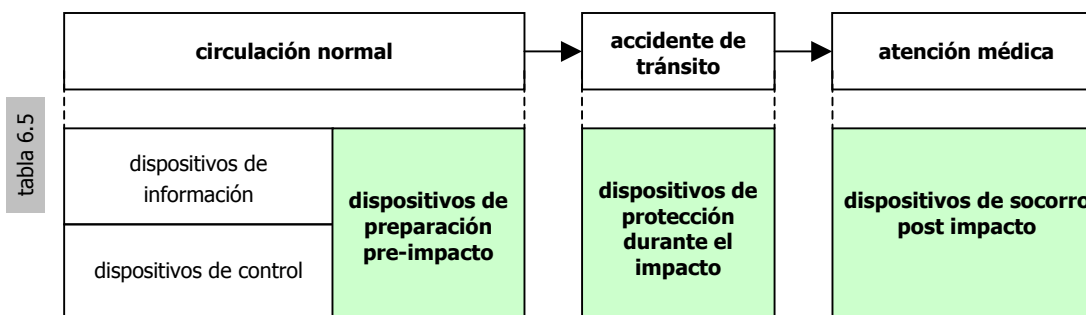


6.3. Bases de la seguridad en accidentes

Para poder evaluar la seguridad de impacto disponible (y proponer las innovaciones factibles) era necesario saber las características principales de los accidentes de tránsito, tal cual se acaba de analizar. En general se esgrime que el límite de velocidad de 64 km/h del ensayo de un impacto frontal es el que corresponde al promedio de los choques reales. Sin embargo, recién se pudo comprobar que la gran mayoría de los accidentes fatales de los Estados Unidos –el 72%– ocurren en lugares donde el límite de velocidad supera los 64 km/h. De las conclusiones de la última sección entonces se deduce que la gran mayoría de los accidentes ocurren entre dos vehículos, y que los accidentes fatales probablemente ocurran comúnmente a velocidades mayores a los 64 km/h de los ensayos actuales. Esto lleva a la necesidad de evaluar lo que ocurre con los automóviles en impactos a altas velocidades y, para ser prudentes, se puede suponer que un vehículo puede chocar a la velocidad máxima de circulación, o sea 130 km/h. Eso corresponde a accidentes frontales, pero los accidentes laterales o traseros ocurren en general en los ámbitos urbanos donde las velocidades de circulación son sensiblemente inferiores. Por eso, si bien también pueden haber accidentes en autopistas donde el auto sale del camino y termina chocando de costado contra un objeto fijo, es preferible considerar una velocidad máxima de impacto menor, de unos 80 km/h, teniendo en cuenta en el peor de los casos siempre van a haber fuerzas de rozamiento importantes que limiten el desplazamiento en sentido transversal. A esto se le suma la necesidad de evaluar la capacidad del automóvil de proteger a sus ocupantes en caso de vuelco o incendio, dos sucesos poco frecuentes pero de alta peligrosidad. En definitiva, un vehículo moderno debería tener la capacidad de proteger a los automovilistas ante los siguientes eventos:

- choque frontal a 130 km/h contra un objeto fijo u otro vehículo.
- choque lateral o trasero a 80 km/h contra un objeto fijo u otro vehículo.
- vuelco.
- incendio.

A esos patrones de accidentes se le pueden sumar, además, ciertas consideraciones elaboradas a partir de los conceptos del capítulo pasado (en lo que hace a la capacidad biológica de los seres humanos de resistir impactos o aceleraciones, entre otras cosas). De esta manera, se pueden establecer las bases de la seguridad en los accidentes de tránsito, y para ello se puede partir de la misma segmentación del capítulo 4:



Es importante destacar una vez más que los dispositivos de información y control influyen en la **generación** del accidente, mientras que el resto influye en su **resultado**. A continuación, entonces, se encuentra el análisis de las funciones que debería desempeñar cada uno de los tipos de dispositivos de seguridad indicados, en caso de accidente.

Comentario acerca de los dispositivos de información y control

Tal como se indicó en el capítulo 4, los dispositivos de información y control con los que cuentan los vehículos modernos son los adecuados para las condiciones de tránsito actual. Existen algunos pocos aspectos a solucionar, la mayoría de los cuales se pueden encontrar en el "concept car" de Volvo denominado "Safety Concept Car" o SCC y cuyas características salientes ya se encuentran detalladas en el capítulo citado. Esto significa que desde el punto de vista tecnológico los diseñadores de automóviles están en condiciones de dotar a los vehículos de producción de aquellas pocas mejoras necesarias en la calidad de información y de control que requiere el automovilista y por lo tanto no se van a analizar las funciones de estos dispositivos.

Aunque tal vez la única mejora de importancia en este aspecto que queda por desarrollar es la posibilidad de que el conductor del vehículo deje de ser un ser humano, y que el vehículo sea guiado por un sistema automático, controlado por computadoras y supervisado por una multitud de satélites que deberían recoger la información de la posición y velocidad de varios cientos de millones de automóviles. Pero éste no es el ámbito para discutir la conveniencia o no de este sistema, tema que por otro lado excede el objetivo de este trabajo.



El Volvo SCC reúne en un solo vehículo la solución a los pocos aspectos de la seguridad de información que quedan por mejorar.

Funciones de los dispositivos de preparación pre-impacto

Es muy importante tener en cuenta que desde que se produce el primer impacto en un accidente hasta que el vehículo finalmente se detiene transcurre bastante menos que un segundo (el tiempo varía de acuerdo a la velocidad inicial del accidente, el coeficiente de rigidez de la carrocería y la masa del automóvil, entre otros). En el siguiente ensayo frontal a 64 km/h se puede observar que luego de apenas 0,1 segundos el frente del automóvil se deformó por completo y el ocupante impactó contra el airbag:



Si el accidente se produce a una velocidad mayor, los tiempos se reducen, y por lo tanto **el lapso disponible para efectuar alguna acción preventiva se hace de una magnitud ínfima**. En este contexto es difícil pensar en funciones posibles para los dispositivos de preparación pre-impacto que actúen una vez ocurrido el primer impacto, ya que para actuar tan rápidamente es necesario involucrar grandes fuerzas aplicadas en tiempos muy cortos –y por lo tanto violentas–, que podrían generar algún daño a los ocupantes. Por ejemplo, si se considera que una de las acciones de dichos dispositivos podría ser levantar las ventanillas para reducir la posibilidad de la intrusión de objetos externos (si es que estuvieran bajas), es difícil pensar en que se puedan levantar en menos de 0,1 segundos; no sólo porque requeriría de un motor muy potente o de algún otro dispositivo enérgico (una explosión que la empuje hacia arriba por ejemplo) sino porque, además, ese suceso podría comprometer alguna de las extremidades superiores de los ocupantes que se mueven libremente y que podrían quedar en camino del vidrio que está subiendo, entre otros riesgos. Por otro lado existe un ejemplo de suceso violento pre-impacto posible de realizar: el accionamiento del airbag. En la siguiente foto se observa que el airbag está casi completamente inflado en 0,06 segundos, antes de que el ocupante se desplace hacia delante:



Pero no se debe dejar de tener en cuenta que la función que cumple el airbag es consecuencia de las falencias de la estructura interior del automóvil (que no es capaz de ofrecer superficies inofensivas ante un impacto) y de los dispositivos de sujeción (que no pueden sostener la totalidad del cuerpo humano durante el accidente), y que, en consecuencia, el airbag podría ser sustituido por otros dispositivos. A esto se suma el riesgo potencial de que el proceso de inflado del airbag genere lesiones a los ocupantes, o que no alcance a protegerlos eficientemente debido a que no existe el registro ni de la velocidad ni de la masa del ocupante al inicio del impacto. Y como tampoco existe la posibilidad de variar la velocidad del inflado o la presión del gas para hacer frente a las distintas energías de movimiento que se generan, el airbag actúa bajo una serie de parámetros fijos y en circunstancias imprecisas. Y justamente este último aspecto es el que se debe destacar acerca de los dispositivos de preparación pre-impacto. Dado que los intervalos de tiempo entre el comienzo del accidente y el fin de éste son demasiado pequeños, los dispositivos de preparación deben aprovechar el tiempo en que pueden actuar adecuadamente, o sea, **antes de que ocurra el accidente**.

Empezando por el principio, dichos dispositivos deben asegurar el **uso correcto** de los elementos de seguridad con los que cuenta el automóvil, incluyendo la verificación su estado⁴⁹. A medida que el auto empieza a moverse, el sistema de control que gestiona los dispositivos pre-impacto debe evaluar, en función de la velocidad de circulación, la conveniencia de **activar algunos elementos preventivos**. Una circunstancia adecuada para que los dispositivos pre-impacto actúen es por ejemplo cuando luego de pasar los 50 km/h de velocidad los pretensionadores del cinturón de seguridad comiencen a actuar progresivamente, ajustando el cinturón de seguridad, en una acción que al ser menos violenta puede ser por un lado más eficaz y generar menos daño al ocupante que si se hiciera en el momento del accidente desde cero (el grado de tensión alcanzado debe ser una función de la velocidad de circulación y de la masa del automovilista, medidas con anterioridad). Por último, nada de esto daría resultado **sin una multitud de sensores que recojan la información necesaria** para proteger a los ocupantes en caso de accidente. Ejemplos de esta información son: las masas de cada ocupante, la velocidad de circulación, el lugar del impacto, la velocidad del objeto que impacta el vehículo, la dirección del impacto, entre otras. Esto permitiría a los dispositivos de seguridad de impacto ajustar su modo de actuar a cada circunstancia, mejorando significativamente el resultado⁵⁰. Resumiendo lo dicho hasta el momento, las funciones principales de los dispositivos de preparación pre-impacto deberían ser:

- controlar el perfecto funcionamiento y uso de los dispositivos de seguridad.
- establecer el riesgo potencial (básicamente a través de la velocidad de circulación) y ajustar la configuración del vehículo de acuerdo a cada circunstancia.
- recoger y procesar la información necesaria para que actúen los dispositivos de protección durante el impacto.

Funciones de los dispositivos de protección durante el impacto

En un accidente de tránsito ocurren varios sucesos que ponen en peligro la vida de los ocupantes de los vehículos involucrados, los cuales se pueden agrupar, desde el punto de vista del ocupante, en dos tipos. Los sucesos que incluyen algún tipo de impacto al cuerpo humano, y los que someten a este último a un proceso de deceleración (de los cuales, el más peligroso es el cambio instantáneo de velocidad⁵¹). En el capítulo anterior se explicaron las razones de la mayor gravedad relativa de los impactos directos al

⁴⁹ Un ejemplo de esto es que el vehículo no pueda avanzar a menos que todos los ocupantes tengan correctamente colocados sus respectivos cinturones de seguridad; otro sería que si el conductor suelta una de sus manos del volante por más de cinco segundos el auto encienda las luces de emergencia y empiece a reducir su velocidad, para obligar a aquél a sostener siempre el volante con ambas manos.

⁵⁰ La mayoría de los dispositivos de seguridad están configurados de forma de actuar de una sola manera, cubriendo un cierto espectro de situaciones. Así, la presión del airbag y la velocidad de inflado del mismo son únicas, cuando existen diferencias enormes en las energías de movimiento que deben absorber según cada situación. Y los diseñadores deben ajustar esos parámetros a la situación más común o frecuente. Si el conductor que sufre un accidente a 64 km/h tarda cerca de 0,1 segundos en desplazarse hasta llegar a golpear su cabeza contra el volante, el airbag se configura de manera de completar su inflado en un lapso menor. El problema surge cuando el impacto ocurre a una velocidad mayor, y dicho dispositivo no se encuentra listo cuando la cabeza del ocupante llega al lugar donde debería haber una mullida bolsa de aire (con el riesgo adicional que implica que la bolsa se esté inflando y golpee la cabeza a 200 km/h). De manera bastante similar, la presión del gas del airbag se ajusta a un impacto a la velocidad más frecuente, y al peso más común. Un ocupante más liviano que el promedio se va a enfrentar con un airbag más duro que el que correspondería, y uno más pesado con otro más suave que el adecuado. Por eso, y a pesar de que la función de adaptarse a cada circunstancia corresponde a los dispositivos de protección que actúan durante el impacto, éstos no pueden actuar eficientemente sin la información vital que les deben proveer estos dispositivos pre-impacto.

⁵¹ Ver próxima sección "Comportamiento de la estructura del automóvil moderno" para entender mejor la diferencia entre una alta aceleración, y una variación instantánea de la velocidad.

cuerpo humano con respecto a los procesos de deceleración en los accidentes de tránsito, con lo cual se debe prestar particular atención a minimizar el potencial de daño de los mecanismos que conducen a un golpe directo a los automovilistas⁵². Las pruebas, ya citadas, realizadas por la NASA en la década del '50 también indicaron que el cuerpo humano es capaz de resistir altas aceleraciones durante breves momentos, siempre y cuando no existan impactos, y la sujeción del cuerpo se haga de la manera adecuada. Pero lo cierto es que es muy poco frecuente que existan procesos durante un accidente vial en donde se someta al ocupante solamente a una desaceleración pura, sin un impacto. Excepto en los casos de choques frontales a baja velocidad, donde el cinturón de seguridad y el airbag logran detener al automovilista sin que impacte el interior del automóvil, en la gran mayoría de los casos alguna parte del cuerpo humano entra en contacto violentamente con alguna superficie potencialmente peligrosa. Por eso, cuando en la década del '60 la Universidad de Cornell (Estados Unidos) indicó tres requisitos generales y fundamentales para que un vehículo sea capaz de proteger a sus ocupantes durante un choque, se puso especial énfasis en la necesidad de evitar los impactos peligrosos⁵³. En esa lista se puede observar que dichos requisitos tenían como objetivo principal **evitar el impacto del ocupante con las superficies potencialmente peligrosas del vehículo** (o de los objetos que pueden penetrar en el habitáculo) y casi no se hace mención de la aceleración. Ahora bien, tomando como base ese trabajo, y como todos los aspectos analizados hasta el momento permiten expresar de una manera un poco más precisa los mismos conceptos de la Universidad de Cornell, los tres requisitos que deben cumplir el habitáculo, las estructuras interna y externa del vehículo, y los dispositivos de sujeción, para que un automóvil logre proteger adecuadamente a sus ocupantes en un accidente de tránsito son los siguientes:

- 1) **un habitáculo** indeformable que conserve la integridad estructural del espacio vital de los ocupantes ante cualquier impacto, sin permitir la penetración de ningún objeto dentro del compartimento de los pasajeros.
- 2) **una estructura externa** al habitáculo capaz de absorber la totalidad de la energía de movimiento del automóvil (es decir, capaz de evitar un choque de tipo elástico que implique una variación instantánea de la velocidad) manteniendo la desaceleración del habitáculo dentro de valores tolerables, y **unos dispositivos de sujeción** capaces de absorber la totalidad de la energía de movimiento de los pasajeros, sin causar daños fisiológicos a los ocupantes durante el proceso (generando un proceso de desaceleración por debajo de los límites tolerables).

⁵² A propósito se puede también encontrar un breve comentario en el libro anteriormente citado de Ralph Nader (2): "En el otoño de 1917 dos Jennies canadienses (pequeños aeroplanos conocidos técnicamente como JN-4) chocaron a una altura de 210 metros sobre una pista de aterrizaje de Texas. De los cuatro aviadores que tripulaban los biplazas, el único sobreviviente fue un cadete de la aeronáutica llamado Hugh De Haven. Mientras estaba en el hospital recobrándose de sus serias heridas internas [...] se preguntaba por qué no había muerto. Cuando se curó inspeccionó los restos de los dos aviones y observó que de las cuatro cabinas, la utilizada por él estaba prácticamente intacta, mientras que las demás se habían hecho pedazos. El espíritu inquisidor de De Haven dio origen a un principio considerado fundamental en el presente siglo por quienes se ocupan de la noble tarea de salvar vidas: el cuerpo humano puede soportar fuerzas decelerativas enormes a causa de choques o caídas. Para poder tolerar esos impactos, el ser humano necesita disponer a su alrededor de una estructura a prueba de aplastamiento."

⁵³ De la referencia (2) los tres requisitos eran: primero, dotar al automóvil de una **caparazón exterior** sólida que conserve su integridad estructural bajo el impacto y que absorba toda la energía que sea posible, sin permitir la penetración destructiva del objeto contundente dentro del compartimento de los pasajeros; segundo, eliminar todo saliente o borde duro de la **superficie interior** de la cápsula, evitando que ciertos componentes del vehículo (tal como los ejes de dirección o el motor) penetren en el compartimento de los pasajeros; al mismo tiempo, la aplicación de materiales capaces de absorber energía para reducir las fuerzas de impacto sobre el cuerpo humano, en todos aquellos puntos de contacto probables; y tercero, proveer a todos los pasajeros de **sistemas de sujeción**, y no necesariamente cinturones de seguridad como único recurso, para disminuir al máximo posible su desplazamiento relativo, y el brusco contacto con el interior del vehículo; adicionalmente esos sistemas no deben ocasionar daños fisiológicos como resultado de su funcionamiento.

- 3) si se produce un desplazamiento relativo entre el ocupante y el vehículo, una **estructura interna** que evite el contacto de los pasajeros con cualquier superficie potencialmente peligrosa del interior del vehículo.

Puestos los conceptos anteriores en forma de lista, los dispositivos de protección durante un impacto deberían:

- mantener la integridad estructural del espacio vital de los ocupantes.
- evitar la penetración de objetos al habitáculo.
- absorber la totalidad de la energía de movimiento del auto y de los ocupantes (para evitar choques de tipo elástico o cambios instantáneos de velocidad).
- evitar cualquier contacto con las superficies potencialmente peligrosas del interior del vehículo.

Funciones de los dispositivos de socorro post impacto

La extrema gravedad de las heridas de un accidente de tránsito hace que la vida de las víctimas dependa en gran medida del tiempo que media entre el impacto y el ingreso a la sala de emergencia, por eso es vital que, una vez ocurrido dicho accidente, las víctimas reciban auxilio médico con la mayor celeridad posible.

Y al respecto existen tecnologías desarrolladas en la actualidad que permiten que el auto accidentado emita una señal de auxilio al centro de atención más cercano al lugar del impacto para dar aviso al personal de emergencias. Una condición adicional es que la carrocería del automóvil no se haya deformado de manera excesiva como para **no permitir la rápida extracción de los ocupantes** (muchas veces los bomberos deben cortar el techo para sacar a las víctimas, perdiendo un tiempo precioso).



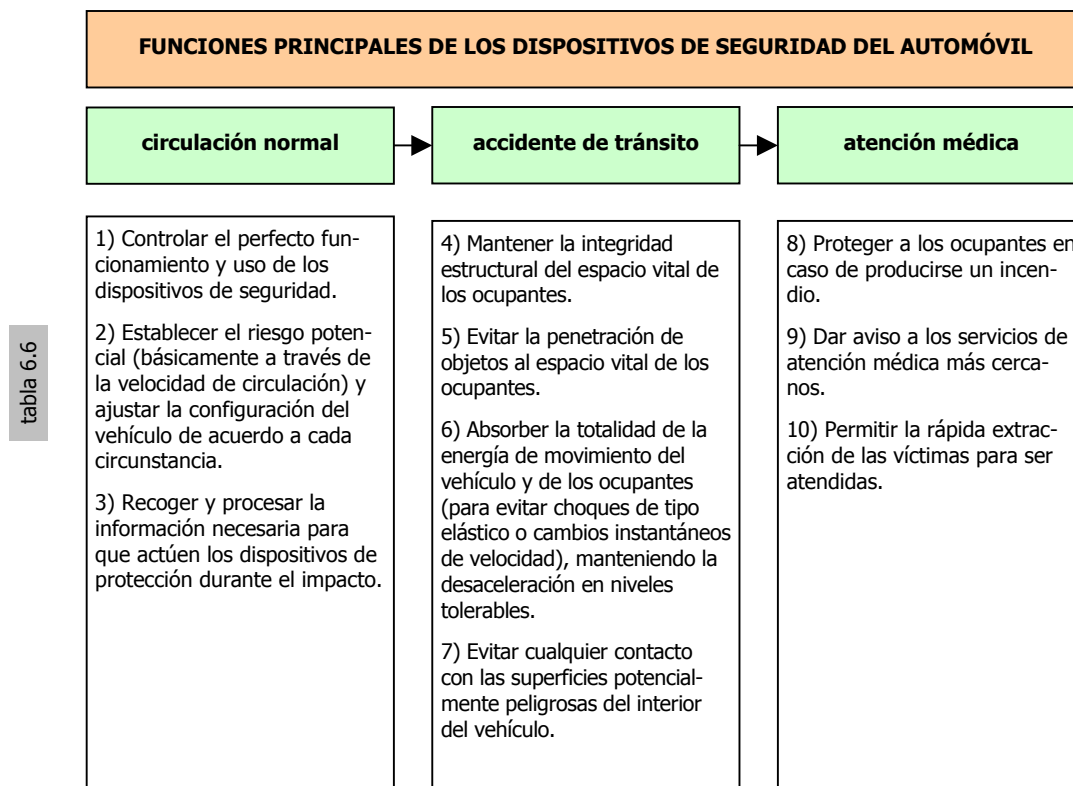
En este accidente se debió cortar los parantes delanteros y plegar el techo para auxiliar a los automovilistas atrapados.

Por último, todo los esfuerzos nombrados serían en vano si los ocupantes del automóvil sobreviven al impacto, pero mueren carbonizados al incendiarse el vehículo. Por eso es absolutamente necesario aislar al habitáculo de las llamas que se pueden producir como consecuencia de los derrames de combustible tanto del propio automóvil como del resto de los vehículos involucrados en el accidente. Así, las principales funciones de los dispositivos de socorro post impacto son:

- proteger a los ocupantes en caso de producirse un incendio.
- dar aviso a los servicios de atención médica más cercanos.
- permitir la rápida extracción de las víctimas para ser atendidas.

Síntesis de las bases de la seguridad en accidentes

A manera de resumen de esta sección del capítulo, el siguiente cuadro sintetiza todas las funciones principales de los dispositivos de seguridad que deben actuar antes, durante y después del impacto, de acuerdo a lo explicado en los párrafos precedentes:



Estas funciones deberán ser llevadas a cabo por los distintos dispositivos del automóvil genéricamente agrupados en cinco grupos:

- dispositivos de gestión de información
- estructura exterior
- habitáculo
- dispositivos de sujeción
- estructura interior

En el próximo capítulo se hará un exhaustivo análisis de las innovaciones factibles en los últimos cuatro grupos funcionales, pero en la sección siguiente, al momento de evaluar la protección que ofrecen los vehículos modernos, se prefiere, por una cuestión de simplicidad y claridad, limitar dicha evaluación por un lado a la "estructura" (que incluye la estructura exterior, el habitáculo y la estructura interior) y por el otro a los dispositivos de sujeción. Analizando en particular solamente la capacidad de evitar los impactos y las aceleraciones peligrosas a los ocupantes.

6.4. Comportamiento de la estructura del automóvil moderno

Como se acaba de decir, es imprescindible para la seguridad de los automovilistas que sufran un accidente de tránsito que la estructura del automóvil evite que sufran cualquier impacto directo en el cuerpo, y que evite las aceleraciones peligrosas (especialmente los choques de tipo elástico). A lo largo de esta sección se podrá comprobar, con el grado de precisión adecuado a este trabajo, que los vehículos modernos no son capaces de cumplir con esos requisitos, especialmente en los impactos a altas velocidades, que son precisamente los que generan víctimas fatales o heridas que conducen a discapacidades de tipo permanente.

Deformación del habitáculo y preservación del espacio vital de los ocupantes

Es importante aclarar que además de las funciones que la estructura debe cumplir para proteger a los ocupantes existe una función que **NO** debe cumplir: absorber la energía de movimiento del impacto. Ya se ha visto, por otro lado, en el capítulo 4 la deformación excesiva que genera en el habitáculo de un vehículo moderno un choque a velocidades relativamente reducidas (como las de los ensayos que se hacen en la actualidad). A eso se pueden sumar dos casos más tomados de los ensayos del IIHS (Insurance Institute for Highway Safety):



El primer caso se trata del impacto frontal a 64 km/h de una camioneta Ford F-150, una de las más vendidas en los Estados Unidos. En esa foto se observa claramente que parte de la energía de movimiento del vehículo se transformó en energía de deformación del habitáculo, afectando seriamente el espacio vital de sus ocupantes, poniéndolos en riesgo de recibir un impacto directo. Algo similar sucedió con el choque lateral fotografiado en segunda instancia, donde un poste a 50 km/h deformó significativamente el habitáculo del Lincoln Towncar ensayado, al punto que la puerta ocupa gran parte del espacio donde antes estaba el conductor. Este último ejemplo muestra que dicho conductor recibe un impacto directo que a su vez lo lanza hacia el acompañante, generando un segundo choque. En definitiva, la deformación del habitáculo en un vehículo moderno es un evento de una frecuencia significativa, tratándose además de un fenómeno extremadamente peligroso para todos los ocupantes. Es cierto que muchos expertos esgrimen que si el automóvil se diseñara con una rigidez mayor las aceleraciones a la que sería expuesto el habitáculo serían peligrosas para los automovilistas. Pero de acuerdo a lo analizado en el capítulo anterior, se ha demostrado que es preferible someter a los ocupantes de un automóvil a una alta aceleración por un tiempo extremadamente corto, sin un impacto directo, antes que permitir que sean

golpeados violentamente por objetos internos o externos, o que sean aplastados por la carrocería que se deformó. Esa es la razón por la cual en las próximas secciones se analizará por separado el comportamiento de la estructura exterior (entendiendo esto como el sector de la carrocería que no incluye el habitáculo) y el del habitáculo, que para muchos de los cálculos se va a suponer indeformable, como parece ser conveniente.

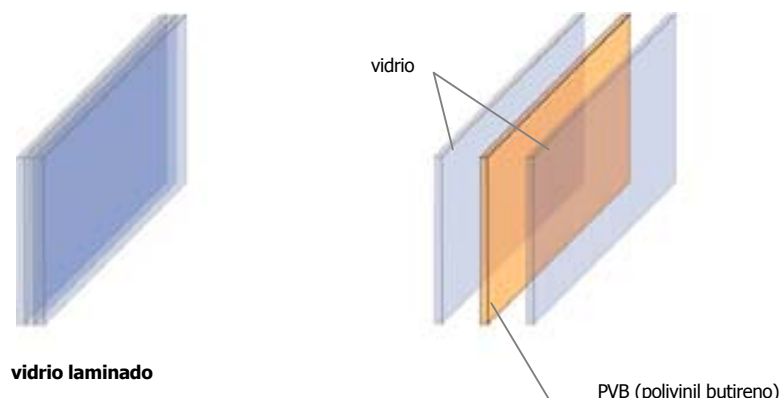


La fotografía es más que elocuente. En un impacto lateral, la estructura de un automóvil moderno permite que el habitáculo se deforme excesivamente, aplastando a los ocupantes del vehículo más cercanos al costado de la colisión.

Pero la preservación del espacio vital de los ocupantes no se limita a la indeformabilidad del habitáculo. Existe un problema adicional provocado porque el habitáculo está construido con otros materiales además de acero (o aluminio). De nada sirve proteger a los ocupantes mediante una estructura indeformable si luego algún objeto peligroso puede penetrar en el habitáculo y dañarlos. En la siguiente foto se puede ver un ciervo que entró por completo al lugar que ocupaban los pasajeros delanteros a través del parabrisas:



En el caso de las ventanillas, tal como se analizó en el capítulo 4, la resistencia a las intrusiones es todavía inferior a la que ofrece el parabrisas, por lo tanto los ocupantes están expuestos a ser golpeados por objetos contundentes que entran a través de dichas superficies vidriadas. El tipo de compuesto ayuda a entender las razones de esta situación: los vidrios de las ventanillas son del tipo templado, que se deshacen en pequeñas astillas inofensivas al ser golpeados, pero que no ofrecen la menor resistencia ante un impacto directo; en cambio el parabrisas está construido a partir de vidrio laminado, con una capa de PVB (polivinil butireno) que mantiene las astillas sujetas en una matriz plástica, evitando que se desprendan:



Pero la resistencia mecánica de este tipo de compuestos es limitada, y los parabrisas actuales permiten la intrusión de objetos al habitáculo. Es bueno recordar que originalmente la intención de este tipo de parabrisas era evitar que las astillas de vidrio dañaran la cabeza de los ocupantes delanteros. Pero desde la adopción masiva del cinturón de seguridad y del airbag dicha función ha dejado de tener el mismo sentido, permitiendo un sensible aumento de resistencia.



Muchos objetos que impactan directamente en el parabrisas pueden traspasarlo, poniendo en riesgo a los ocupantes.

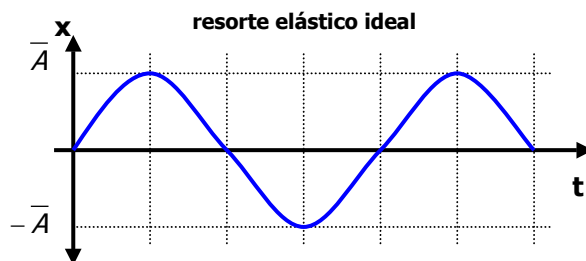
Colisiones de sistemas de masas y resortes inelásticos

Hasta ahora se ha puesto en evidencia la imposibilidad del automóvil moderno de proteger adecuadamente a sus ocupantes frente a los impactos directos que son consecuencia de la deformación del habitáculo, en accidentes a altas velocidades. Por otro lado, también se debe analizar la aptitud de la estructura exterior para evitar aceleraciones peligrosas, para lo cual es necesario explicar con anterioridad algunos aspectos físicos importantes que van a ayudar a que se entiendan mejor los próximos análisis⁵⁴. Como se ha dicho en el capítulo anterior, el modelo de masas y resortes inelásticos permite analizar la manera en que se comportaría la estructura de un automóvil, y las

⁵⁴ Para ampliar todavía más los conceptos relacionados con los cálculos de este capítulo y del próximo se puede consultar los Anexos, donde se hace un resumen de la base física y de las ecuaciones utilizadas.

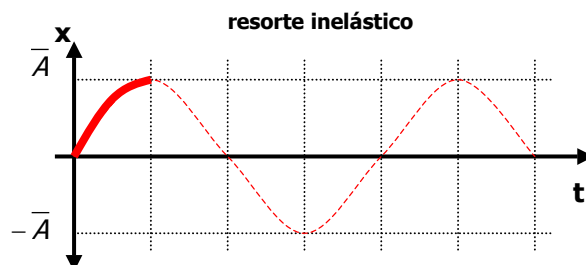
magnitudes de las aceleraciones a las que es sometido el habitáculo en un accidente de tránsito. Las que siguen son las consideraciones mínimas que se deben tener en cuenta para analizar el fenómeno, de manera simple y conceptual. Comenzando por la diferencia entre un resorte elástico y uno inelástico que consiste en que este último no es un elemento capaz de deformarse y luego recuperar su longitud original, sino que una vez que se comprime mantiene la longitud alcanzada cuando se elimina la fuerza que opera sobre él. Este concepto se puede entender un poco mejor a partir de la comparación del comportamiento de un resorte elástico ideal con el resorte de tipo inelástico. Si se grafica la posición de una masa sujeta a un resorte ideal de tipo elástico en función del tiempo se obtiene la siguiente curva sinusoidal:

gráfico 6.16



En cambio la posición de la misma masa sujeta al resorte inelástico del tipo que se usa para modelizar el frente del automóvil se limita al primer cuarto del primer período del movimiento armónico simple, es decir:

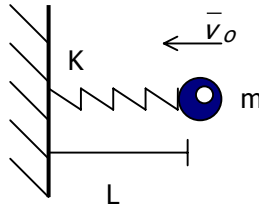
gráfico 6.17



Otro concepto muy importante de los resortes (elásticos o inelásticos) es que si resultan tener una longitud menor a la amplitud teórica del movimiento armónico simple, se puede generar un choque de tipo elástico. Esto es de vital importancia ya que un choque de tipo elástico genera un cambio instantáneo de velocidad, que es un suceso extremadamente peligroso para un ser humano, porque implica aceleraciones de magnitud enorme⁵⁵. Es decir que casi cualquier tipo de variación de velocidad instantánea generará algún tipo de daño a los ocupantes de los vehículos. Mientras mayor sea la variación de velocidad absoluta y menor sea el tiempo en que ocurre esa variación, mayor será la aceleración a la que son sometidos los automovilistas, y peor será el daño. La forma de evitar que ocurra un choque de tipo elástico es a través de las carac-

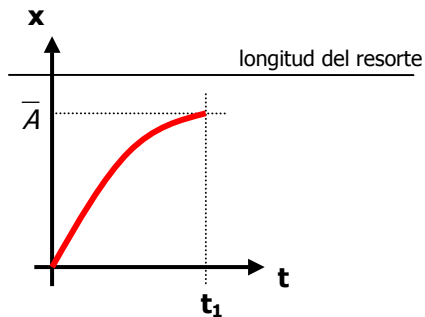
⁵⁵ Se puede hacer una consideración adicional acerca del cambio de velocidad instantáneo ($t \rightarrow 0$). Como la velocidad es una función continua, se puede probar que no existen discontinuidades en la función, y por lo tanto que no se generan aceleraciones "infinitas". Sin embargo, se trata de un cambio de velocidad en un tiempo lo suficientemente pequeño como para ser considerado prácticamente nulo, y por lo tanto se generan aceleraciones que tienden a infinito. Se debe tomar nota entonces de que en el momento de generarse un choque elástico, aún en el caso de variaciones de velocidad relativamente pequeñas, el cuerpo se somete durante un breve lapso de tiempo a aceleraciones de una magnitud considerable.

terísticas del resorte, que son dos: la longitud (L), y la rigidez, asociada al coeficiente de proporcionalidad (K).

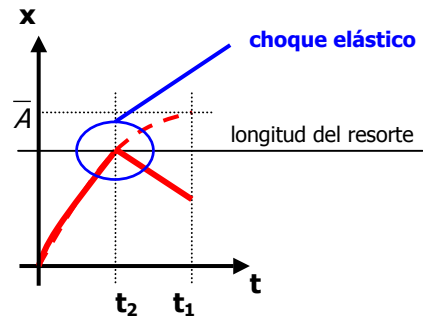


En el caso de un resorte como el de la figura (que podría ser considerado un modelo para un vehículo que impacta un objeto fijo) para evitar que se produzca un choque elástico entre la pared y la masa se debe frenar por completo el movimiento de esta última antes de que llegue a la pared. De las ecuaciones (10.19) y (10.20) se puede concluir que la velocidad de la masa será nula cuando la función $\cos \omega.t$ tome el valor cero. En ese mismo instante, la función en $\sin \omega.t$ toma el valor 1, y por lo tanto el desplazamiento de la masa es igual a la amplitud del movimiento armónico simple. Es fundamental entonces que, **para que no se produzca un choque elástico entre la masa y la pared, la longitud del resorte sea superior a la amplitud del movimiento armónico**. Si la longitud del resorte es menor que la amplitud del movimiento armónico, la masa tendrá una cierta velocidad al momento de llegar a la pared, siendo sometida a un tipo de desplazamiento similar al que se puede observar en el segundo de los siguientes esquemas:

longitud del resorte mayor que la amplitud del movimiento armónico



longitud del resorte menor que la amplitud del movimiento armónico



En el caso de un choque entre un automóvil y una pared, la amplitud del movimiento armónico depende de los siguientes factores, de acuerdo a la ecuación (10.18):

$$\bar{A} = \frac{1}{\sqrt{\frac{K}{m}}} \cdot \bar{v}_o$$

Si se considera que el coeficiente de proporcionalidad del resorte (K) y la masa del vehículo (m) permanecen constantes, la amplitud del movimiento armónico resulta entonces directamente proporcional a la velocidad inicial del impacto. Hecha esta breve introducción es posible pasar a analizar el comportamiento de la estructura de un vehículo moderno.

Datos empíricos que permiten estimar el coeficiente de rigidez

Para caracterizar el movimiento de un automóvil durante un accidente, utilizando el modelo de una masa y un resorte inelástico, se necesitan cuatro parámetros:

- la velocidad inicial en el momento del impacto.
- la masa del vehículo.
- la longitud del resorte.
- el coeficiente de rigidez del resorte.

Los primeros tres datos se pueden obtener o suponer fácilmente, pero el último se debe estimar a partir de los resultados empíricos obtenidos en ensayos de choques. Las fuentes de estos datos son algunos organismos estatales o privados que realizan este tipo de ensayos como la NHTSA o el IIHS, ambos de los Estados Unidos. En Europa, Japón y Australia existe el programa NCAP donde se realizan distintos tipos de ensayos que permiten deducir los coeficientes de rigidez de algunos vehículos. No es fácil obtener datos empíricos de dichos coeficientes de rigidez, ya que la información generada por los institutos citados no se da a conocer públicamente. Además, los valores de los coeficientes para cada vehículo varían según la velocidad del ensayo o según los impactos de la prueba sean frontales puros, o frontales solapados.



De todas maneras, de los textos consultados se pueden citar tres ejemplos numéricos de donde deducir los coeficientes de rigidez. Uno de los autores, Campbell (3), propone una relación entre la amplitud del movimiento armónico y la velocidad inicial del impacto, basada en datos tomados de ensayos con vehículos de los años 1971/1972, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A = -0,22 + 0,066.v_0 \quad \text{con } [A] = \text{m}; [v_0] = \text{m/s}$$

Otro de los expertos, Neades (4), ejemplifica por otro lado la manera de convertir los datos empíricos de los ensayos en un coeficiente de rigidez útil, de donde se puede deducir la siguiente fórmula (válida sólo para un vehículo Volvo 850 de 1995):

$$A = -0,07 + 0,034.v_0 \quad \text{con } [A] = \text{m}; [v_0] = \text{m/s}$$

Por último, el doctor Alvin Hyde (5) indica, desde su experiencia como médico dedicado a la atención de víctimas de accidentes, que la profundidad del choque se puede caracterizar, como regla general aproximada, como "*una pulgada por cada milla y media de velocidad de impacto*", lo cual traducido al sistema MKS permite obtener:

$$A = 0 + 0,035.v_0 \quad \text{con } [A] = \text{m}; [v_0] = \text{m/s}$$

Considerando que el libro es de 1992, la fórmula es llamativamente aproximada a la estimada para el Volvo 850 cuyo ensayo se realizó unos años más tarde. Por motivos de simplificación es esta última fórmula la que se va utilizar como representación del comportamiento de un vehículo moderno frente a un accidente, expresada de esta manera:

$$A \cong 0,035.v_o \quad (6.1)$$

Esta expresión simplificada permite obtener un coeficiente de rigidez aproximado, a través de lo siguiente. De la ecuación (10.17) y de la expresión anterior se deduce:

$$A = \frac{v_o}{\omega} \Rightarrow \omega = \frac{v_o}{A} = \frac{v_o}{0,035.v_o} = \frac{1}{0,035} \Rightarrow \omega \cong 28,57$$

Recurriendo a la ecuación (10.16):

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \Rightarrow K = (\omega \cdot \sqrt{m})^2 \Rightarrow K = \omega^2 \cdot m = (28,57)^2 \cdot m = 816,25 \cdot m \Rightarrow$$

$$\Rightarrow K \cong 816,25 \cdot m \quad (6.2)$$

$$[K] = \text{N/m}; [m] = \text{kg}.$$

Estimación de los parámetros de un automóvil (Saab 9-3)

El Saab 9-3 es considerado uno de los automóviles más seguros del mundo. En promedio tiene una masa de unos 1.500 kg. (el valor no es el mismo para las distintas versiones que se ofrecen en el mercado) y una longitud total de 4,64 metros.



Del valor de masa citado y de la ecuación (6.2) se puede deducir el coeficiente de rigidez aproximado, que resulta ser:

$$K \cong 816,25 \cdot m \cong 816,25 \cdot 1500 \text{ kg} \cong 1.225.000 \text{ N/m}$$

No se debe dejar de tener en consideración que **este parámetro, que se va a considerar válido de ahora en más, está estimado en función de la bibliografía consultada, y que puede no ser el que corresponda con el vehículo en la realidad.** Se trata, sobre todo, de un ejercicio teórico para indicar en un auto en concreto los efectos de cierto

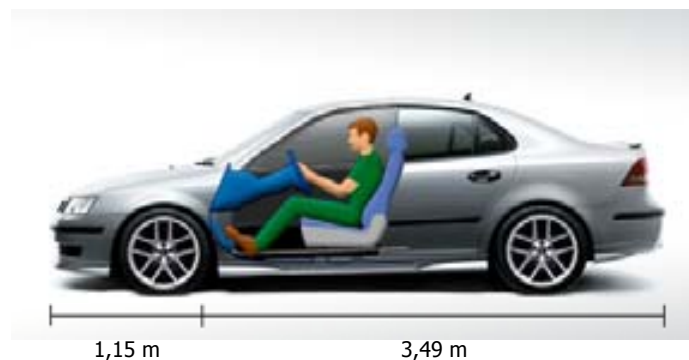
tipo de impactos, a determinadas velocidades⁵⁶. El otro parámetro del resorte que se debe estimar es la longitud, y para determinarla se debe estudiar la profundidad del impacto en la carrocería, y el límite a partir del cual el frente ya no se deforma más. Para llegar a un valor aproximado se puede recurrir al ensayo del programa EuroNCAP, de donde se puede observar la siguiente foto de un impacto de un Saab 9-3:



Estimando de manera visual la profundidad del impacto se puede decir que la zona que se comprime en el impacto es aproximadamente igual a la zona sombreada con color rojo en la siguiente foto, de donde también se puede deducir su largo:



Como comentario adicional es importante tener en cuenta que la zona deformable no debería tener una longitud mayor a 1,15 m, porque esto implicaría una deformación del espacio ocupado por el conductor o su acompañante:



Por otro lado, existe un problema, que es el conjunto formado por el motor y la caja de cambios del automóvil, ya que aquél no se deforma con el impacto, y ocupa un es-

⁵⁶ Además el valor indicado supone que a lo largo de la longitud del resorte no hay diferencias de comportamiento, y que no existe otra deformación más allá de la parte frontal del vehículo. Esto equivale a suponer que la rigidez del habitáculo es la suficiente como para mantener la forma de éste en los impactos a las velocidades que se van a usar para los cálculos, sin bien el vehículo en cuestión puede llegar a sufrir algún tipo de deformación en un impacto real, inclusive a velocidades muy inferiores a las de los cálculos.

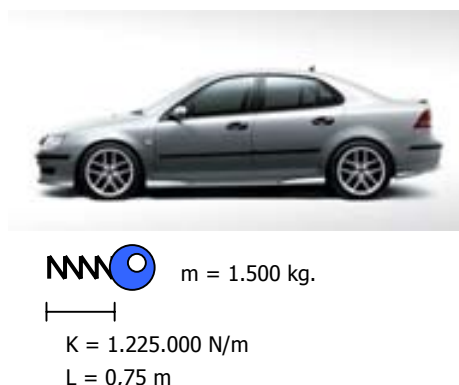
pacio que limita la longitud del resorte, y **que en la foto del ensayo no se observa ya que se trata de un impacto desfasado**. Para este trabajo se va a considerar que el ancho del conjunto es de unos 0,40 metros, lo que significa reducir la longitud del resorte de 1,15 metros a 0,75 metros:



Para validar el modelo adoptado, se puede analizar lo sucedido con el ensayo del choque frontal puro entre un Saab 900 y un camión Scania mostrado en el capítulo anterior. De las fotos se deduce que existe un choque de tipo elástico cuando la velocidad del impacto es de 57 km/h ($\cong 15,8$ m/s). Se desconoce la velocidad de rebote, pero por ahora se puede suponer simplemente que es mayor que 0. También se asume que el peso es similar al del modelo 9-3 (1.500 kg.) y que el coeficiente de rigidez, que también es función de una constante y del peso, es el mismo. Volviendo a la ecuación (10.17) se puede obtener la amplitud teórica del movimiento armónico simple de un Saab 900 que impacta a 15,8 m/s contra un objeto fijo:

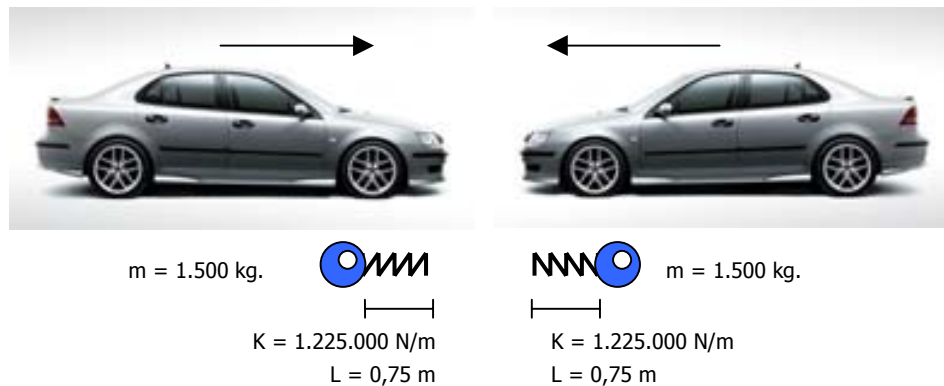
$$\bar{A} = \frac{\bar{v}_o}{\omega} = \frac{1}{\sqrt{\frac{K}{m}}} \cdot \bar{v}_o = \frac{1}{\sqrt{\frac{1225000 \text{ N/m}}{1500 \text{ kg}}}} \cdot 15,8 \text{ m/s} \cong 0,55 \text{ metros}$$

Si el vehículo rebotó, esto significa que la amplitud del movimiento armónico era mayor que la longitud del resorte inelástico teórico del frente del automóvil. Para una velocidad de rebote mayor a 0, se deduce entonces una longitud del resorte menor a 0,55 metros. Esto confirma también que parece lógico no considerar la longitud de 1,15 metros de la primer estimación. Ahora bien, mientras más corto sea el resorte, el automóvil tendrá una menor capacidad de absorber la energía del impacto. Por eso no parece adecuado reducir más la longitud del resorte teórico del Saab 9-3, ya que es de esperar que este vehículo, al ser un modelo más nuevo que el Saab 900, tenga una mejor respuesta a los impactos. En conclusión, validado de esta manera el modelo, el comportamiento de un automóvil Saab 9-3 durante un impacto frontal se puede aproximar mediante un modelo de una masa y un resorte, de acuerdo a los siguientes parámetros:



Consideraciones para los impactos entre dos vehículos

Aún suponiendo que uno de los dos vehículos circula en condiciones que permiten que no se produzcan ni un choque de tipo elástico, ni aceleraciones potencialmente peligrosas, la introducción de una variable externa desconocida (como es la energía cinética del otro automóvil) hace que **el más común de los impactos⁵⁷ sea el que supone la mayor incertidumbre**, y en consecuencia, el de resultados más difíciles de predecir. Se puede por ejemplo considerar un choque entre dos vehículos actuales, de masa similar, y que circulan a distintas velocidades, en la misma dirección y sentidos contrarios. Tomando el modelo del Saab 9-3 desarrollado se puede suponer la siguiente situación:



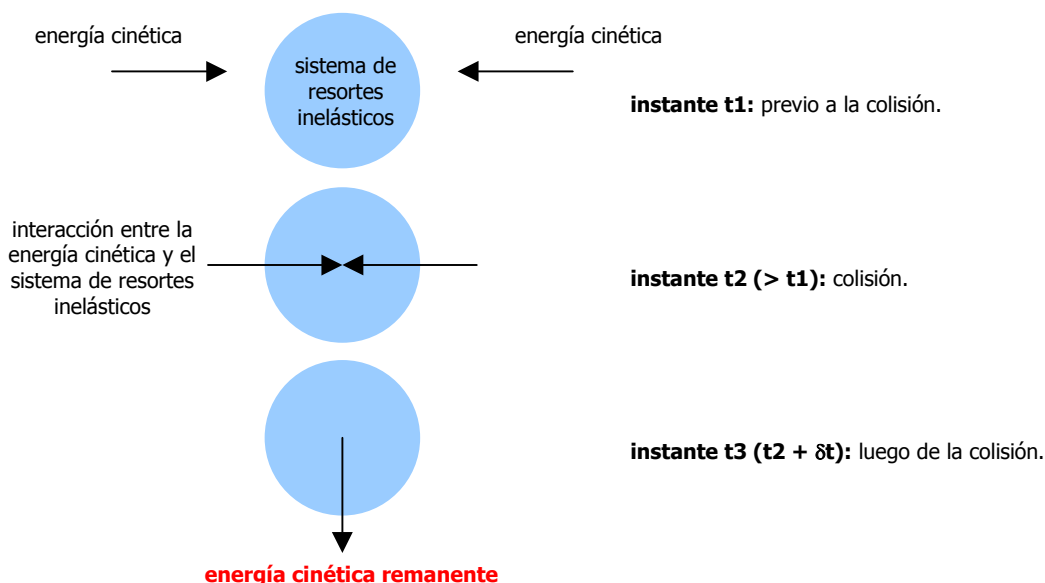
La estructura frontal de los vehículos tiene la capacidad para transformar energía cinética en energía potencial, que a su vez en el caso particular de los automóviles se traduce en una deformación permanente del resorte inelástico. Pero esa capacidad de transformación se ve limitada por la posibilidad de absorber energía potencial elástica del resorte, de acuerdo a la ecuación (10.15). La máxima energía potencial puede absorber el resorte del modelo indicado es la que corresponde al largo total del resorte (0,75 m en este caso). Así se puede calcular la energía potencial máxima que podría absorber cada uno de los dos vehículos del dibujo anterior:

$$E_{pe} = \frac{1}{2} K \cdot (\bar{x}^2 - \bar{x}_0^2) \Rightarrow E_{pe} = \frac{1}{2} 1.225.000 \text{ N/m} \cdot (0,75 \text{ m})^2 \cong 345.000 \text{ joule}$$

Si se trata de dos vehículos que colisionan, y ambos son idénticos, la energía potencial máxima que podría absorber el sistema de resortes inelásticos en serie que forman las secciones delanteras de los dos automóviles es de 690.000 joule⁵⁸. Para completar el modelo es necesario hacer un análisis energético del impacto que se puede esquematizar de la siguiente manera:

⁵⁷ El impacto frontal entre múltiples vehículos.

⁵⁸ El valor corresponde a sumar la capacidad de absorción de cada uno de los resortes de los vehículos. Esto implica una simplificación adicional, que consiste en suponer que ambos resortes tienen la capacidad de absorber el total de energía cinética, si bien en la realidad puede ocurrir que no sea posible. Esto se debe entre otras cosas, a que dos resortes en serie no se comportan exactamente como si fueran uno solo de longitud final equivalente a la suma de ambos, o a que el impacto no siempre ocurre en una dimensión, y se producen giros en varias dimensiones (incluyendo el desplazamiento de la parte superior del automóvil hacia arriba) que hacen que la longitud del resorte no pueda ser aprovechada en su totalidad para absorber energía cinética.



La energía cinética remanente es consecuencia de que el sistema de resortes no es capaz de absorber la totalidad de esa energía. De ser así, existen dos graves peligros:

- que parte de esa energía genere una deformación del habitáculo, comprometiéndolo el espacio vital de los ocupantes.
- que parte de esa energía genere un choque de tipo elástico, exponiendo a los ocupantes a altas (y muy dañinas) aceleraciones.

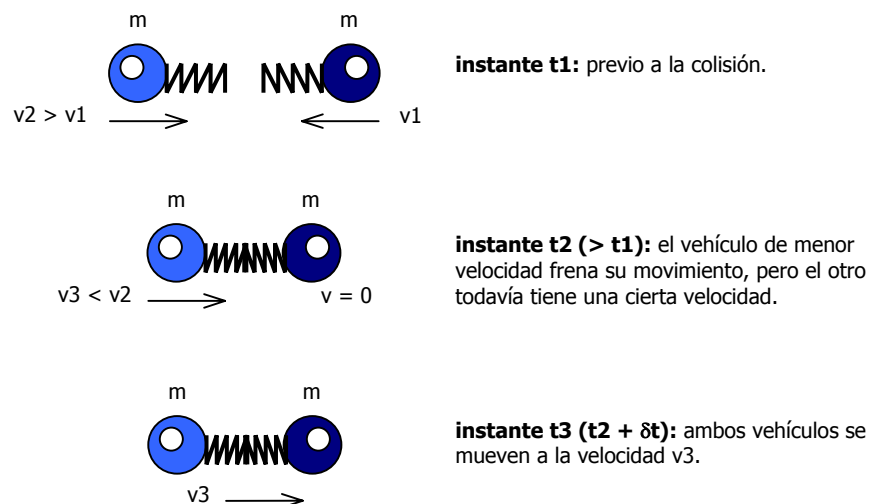
Sólo a título de ejemplo se pueden indicar las distintas combinaciones de velocidades de colisión que exponen al habitáculo a la necesidad de absorber una cierta magnitud de energía cinética remanente, para el caso de los dos Saab 9-3 idénticos circulando en igual dirección y sentidos opuestos. En el siguiente cuadro los valores en amarillo indican aquellas situaciones en donde la energía cinética del sistema es mayor que la energía potencial que pueden absorber ambos resortes:

Energía cinética en el momento del impacto entre dos vehículos Saab 9-3 [kilojoule]

		velocidad de impacto del vehículo A [km/h]										
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
velocidad de impacto del vehículo B [km/h]	30	104	145	197	260	336	422	521	631	752	885	1.030
	40		185	237	301	376	463	561	671	793	926	1.071
	50			289	353	428	515	613	723	845	978	1.123
	60				417	492	579	677	787	909	1.042	1.186
	70					567	654	752	862	984	1.117	1.262
	80						741	839	949	1.071	1.204	1.348
	90							938	1.047	1.169	1.302	1.447
	100								1.157	1.279	1.412	1.557
	110									1.400	1.534	1.678
	120										1.667	1.811
	130											1.956

tabla 6.7

Del cuadro se puede deducir que un impacto entre dos vehículos que circulan a más 80 km/h supone un riesgo para los ocupantes⁵⁹. Pero un automóvil circulando a 50 km/h puede ser embestido por otro que viaja a 100 km/h, y en ese caso también existe una cierta cantidad de energía cinética que no puede ser disipada, poniendo en riesgo a los automovilistas⁶⁰. Y existe un problema adicional que es que, inclusive en la zona en donde los resortes inelásticos son capaces de absorber la totalidad de la energía cinética, el mecanismo del impacto hace que uno de los dos vehículos sufra un cambio instantáneo de velocidad, no tan violento como el de un choque elástico, pero con el potencial de generar daños. Se puede comprobar que cuando existe una diferencia en la velocidad inicial del impacto entre ambos vehículos⁶¹, aún en el supuesto que los dos autos tengan la misma masa como en el ejemplo, **uno de los dos vehículos va a detenerse antes que el otro**⁶². El hecho que uno de los vehículos se frene antes que el otro (el de menor velocidad inicial si ambos tienen masas similares) es de vital importancia, ya que al momento de detener su marcha, el vehículo comienza a ser empujado hacia atrás por el otro auto que mantiene todavía una cierta velocidad. Esto hace que parte de la energía cinética original se conserve, y si bien no tiene la capacidad de deformar el habitáculo, sí **genera un cambio de velocidad instantáneo que perjudica a uno de los dos vehículos**. En el siguiente diagrama se puede observar en detalle la secuencia de sucesos:



Llevado a un gráfico que indique las velocidades de cada vehículo en función del tiempo, el impacto entre dos vehículos de igual masa con la capacidad de evitar choques

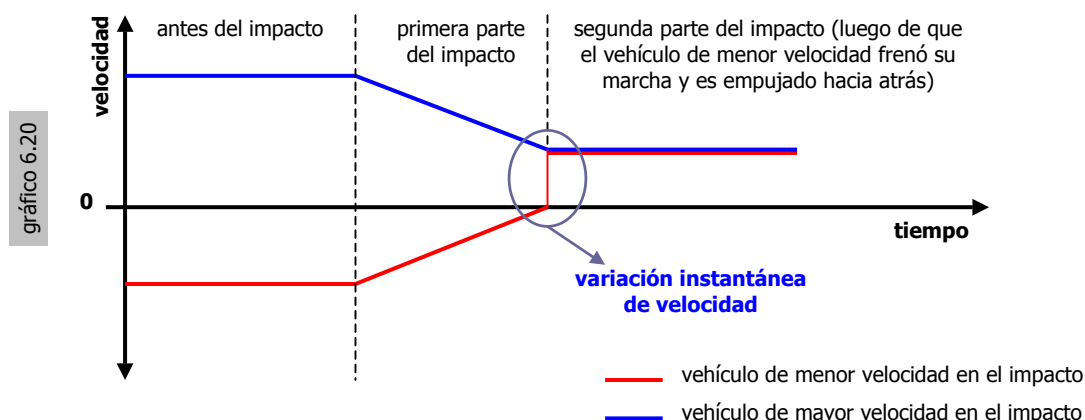
⁵⁹ Esta situación en particular equivale a un automóvil que circula a 80 km/h y que impacta contra un objeto fijo.

⁶⁰ El caso más dramático puede considerarse como aquél en donde un automóvil embiste un camión con el máximo permitido de carga (24.000 kg. de masa) que circula a la máxima velocidad permitida en la mayoría de los países del mundo (90 km/h). Se desconoce la energía potencial que puede absorber el camión, pero lo cierto es que solamente la energía cinética del camión circula a 90 km/h es de 7.500.000 joule, valor que se puede comparar con la capacidad de absorción del automóvil de "apenas" 345.000 joule. Puesto de otra manera, se puede estar circulando lentamente por un camino con un automóvil y sufrir un impacto frontal de parte de un camión, convirtiendo al hecho en un suceso devastador, con una magnitud enorme de energía cinética que no puede ser absorbida, y que por lo tanto tiene la capacidad de deformar enormemente el habitáculo, o hacer que este último sufra un violento cambio de velocidad instantáneo.

⁶¹ Que es la situación que se produce en la vida real ya que es prácticamente imposible que dos automóviles choquen a la misma velocidad.

⁶² La comprobación de este hecho se hizo de manera empírica, utilizando un programa de simulación denominado "Working Model" disponible en el Laboratorio de Física I de la Facultad, con la colaboración de la Ing. Cristina Speltini.

de tipo elástico, pero que impactan a distintas velocidades iniciales, genera una situación se puede esquematizar como sigue:



Si los vehículos tienen masas sustancialmente distintas la situación se complica un poco más, y no parece que valga la pena seguir profundizando el análisis ya que, en definitiva, en un choque entre dos vehículos puede darse alguna de las dos alternativas siguientes sin importar las relaciones existentes entre las respectivas masas y velocidades:

- las estructuras de los vehículos no son capaces de absorber la totalidad de la energía cinética del impacto → se producirá un choque de tipo elástico, perjudicando a ambos vehículos⁶³.
- las estructuras de los vehículos tienen la capacidad de absorber la totalidad de la energía cinética del impacto → uno de los dos automóviles será sometido a una variación instantánea de la velocidad.

En definitiva, todo indica que **en un accidente frontal entre dos vehículos —el tipo de accidente de tránsito más frecuente— no hay manera de evitar que por lo menos uno de ellos exponga a los ocupantes a variaciones de velocidad potencialmente peligrosas**⁶⁴.



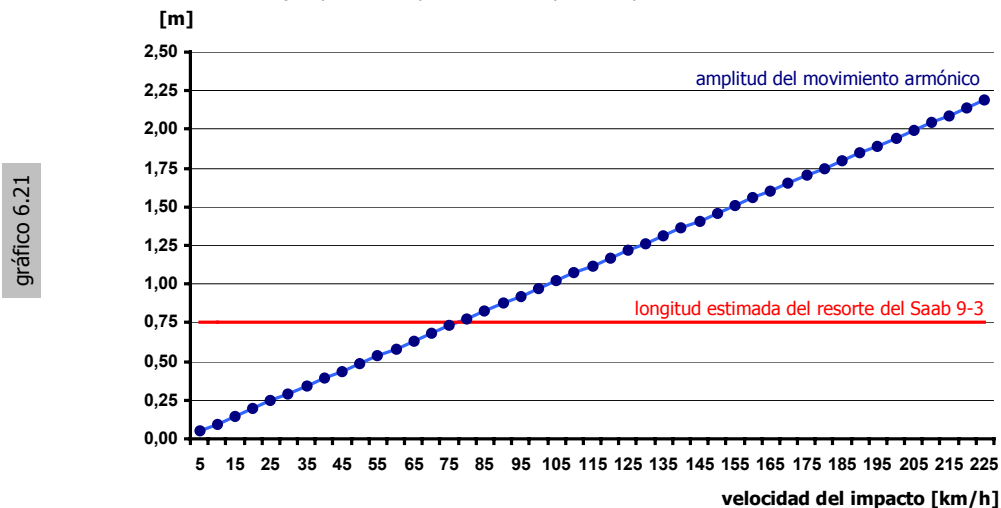
⁶³ En el modelo analizado se supone que la masa representa al habitáculo, y que es indeformable. Pero en los accidentes reales de automóviles actuales es probable que además de sufrir un choque de tipo elástico, los habitáculos se deformen, poniendo en riesgo de aplastamiento a los ocupantes.

⁶⁴ Por lo menos con el tipo de estructura actual.

Comportamiento de la estructura externa (choque contra objeto fijo)

Se acaba de analizar que la estructura externa de un automóvil es incapaz de evitar que el habitáculo –con sus ocupantes dentro– sea expuesto a variaciones instantáneas de velocidad en el caso de impacto contra otro vehículo. Queda por analizar la capacidad aproximada de un automóvil moderno de evitar ese peligroso cambio de velocidad al menos en los choques contra objetos fijos, que por otro lado son los únicos que se evalúan. Tal cual se vio en este mismo capítulo, la ocurrencia de un choque de tipo elástico, en el caso de un impacto frontal contra un objeto fijo, depende de la relación que existe entre la longitud del resorte del frente del automóvil y la amplitud del movimiento armónico de la masa del vehículo que comprime ese resorte. De la ecuación (10.17) y de los parámetros estimados anteriormente para el Saab 9-3 se puede obtener el siguiente gráfico, que relaciona la velocidad del impacto⁶⁵ y la amplitud del movimiento armónico del resorte correspondiente:

comparación longitud del resorte del automóvil vs. amplitud del movimiento armónico
ejemplo de los parámetros supuestos para el caso de un Saab 9-3



En el gráfico se observa que se produce un choque elástico entre el habitáculo del Saab 9-3 y el objeto fijo en accidentes frontales **a velocidades mayores a 80 km/h⁶⁶**. Por lo tanto, **la longitud del frente del automóvil moderno⁶⁷ es insuficiente para evitar que ocurra un choque de tipo elástico en el caso de un impacto frontal contra un objeto fijo a las velocidades normales de circulación**, exponiendo a los ocupantes a aceleraciones extremadamente peligrosas⁶⁸.

Pasando a los impactos laterales, la estructura parcialmente deformable es de un espesor en la práctica insignificante, y por lo tanto incapaz de evitar un choque elástico. En realidad la carrocería es mucho menos resistente en sentido transversal que longitudinal, y casi cualquier energía de movimiento (por mínima que sea) tiene la capacidad de generar deformaciones en el habitáculo. Y aún suponiendo que se lograra re-

⁶⁵ Varía desde 5 km/h hasta 225 km/h, o sea la máxima velocidad del modelo más potente de la gama.

⁶⁶ Es importante recordar una vez más que este razonamiento supone que el habitáculo del vehículo no se deforma, a ninguna velocidad de impacto.

⁶⁷ Suponiendo que el Saab 9-3 lo representa de manera adecuada.

⁶⁸ Como se acaba de ver, en el caso de un impacto real donde la deformación del frente del vehículo se extiende al habitáculo además de sufrir un choque elástico, los ocupantes corren además el riesgo de ser aplastados.

forzar el costado de los automóviles, la estructura externa lateral tendría la posibilidad de ofrecer no más de diez o quince centímetros de longitud para poder absorber la energía cinética del impacto. Si se supone que el coeficiente de rigidez es aproximadamente igual al de la estructura frontal, esto implica choques de tipo elástico para velocidades mayores a los 20 km/h.

Por último, **en el caso de los impactos traseros, la situación parece algo más favorable**. El gran espacio que supone la necesidad de un baúl permite que gran parte de la energía del impacto pueda absorberse antes de llegar al habitáculo. No parecen existir estimaciones del coeficiente de rigidez trasero, y menos en impactos de velocidades de 80 km/h, pero se puede suponer, al igual que en el párrafo anterior, que dicho coeficiente toma un valor aproximado al estimado para el frente del vehículo. De esta manera, para un impacto a 80 km/h se necesitará un resorte inelástico de longitud 0,78 metros. Para el caso analizado del Saab 9-3 (y probablemente para la mayoría de los vehículos con baúl) ese parece ser un valor menor al que efectivamente posee el automóvil:



6.5. Comportamiento de los dispositivos de sujeción

Es muy importante tener en cuenta que lo que sucede fuera del habitáculo difiere en algunos aspectos de lo que ocurre dentro de él. Al producirse un accidente se generan dos impactos: primero, el del vehículo contra el obstáculo, y luego el segundo choque, el de los ocupantes contra el interior del vehículo. La probabilidad de supervivencia depende entonces de la eficacia de los dispositivos de seguridad que actúan en caso de impacto, fundamentalmente de aquellos que deben sujetar a los pasajeros y evitar que golpeen contra los elementos peligrosos del interior (cinturón de seguridad y airbag⁶⁹).

Secuencia de sucesos para el conductor no sujeto

La siguiente secuencia de sucesos se basa en los dibujos que se encuentran en el libro del doctor Hyde (5), y que han sido obtenidos a partir de un modelo de computadora que simuló el movimiento del cuerpo en caso de impacto frontal. Para simplificar la explicación se considera un choque de tipo frontal puro, en donde no se produce la rotación del cuerpo del conductor. Otra aclaración adicional es que el modelo utilizado tampoco tiene en cuenta el movimiento en sentido vertical del automóvil⁷⁰. Bajo las suposiciones indicadas el conductor no sujeto es sometido a los siguientes sucesos:



instante t_0 : el vehículo choca y el conductor comienza a desplazarse hacia adelante.



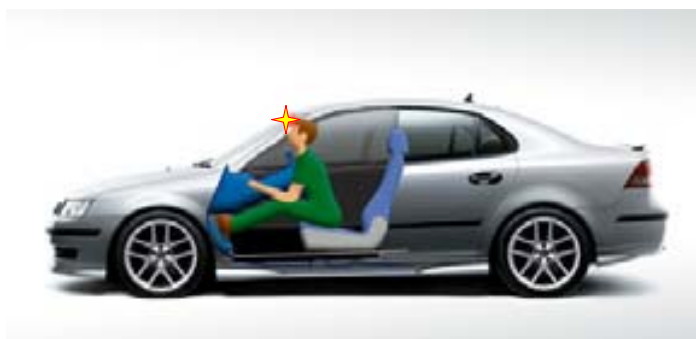
instante $t_1 (> t_0)$: el conductor golpea el tablero con las rodillas.

⁶⁹ El airbag no es considerado en este trabajo como un dispositivo de sujeción, sino como uno que transforma las características del interior del automóvil, pero por una cuestión de compatibilidad se lo analiza en conjunto con el cinturón de seguridad.

⁷⁰ La posición del centro de masa del vehículo, por encima del eje delantero, hace que el automóvil tienda a levantar la cola, efecto que no es tenido en cuenta en esta simulación.



instante $t_2 (> t_1)$: el conductor golpea el volante con el pecho.



instante $t_3 (> t_2)$: el conductor golpea el parabrisas con la cabeza.

Repasando lo que indican las figuras, el conductor que no está sujeto mediante un cinturón de seguridad continúa moviéndose a la misma velocidad que tenía el automóvil antes de sufrir el accidente. Primero golpea con las rodillas contra el tablero, lo que no reduce en un valor significativo su velocidad relativa⁷¹. Luego golpea el pecho contra el volante, desplazándolo hacia atrás unos diez centímetros⁷², deteniendo su movimiento. Por último, debido a que el cuello permite el movimiento relativo entre el torso y la cabeza, el conductor golpea su cabeza contra el parabrisas, a una velocidad sensiblemente inferior a la que tenía en el momento del accidente. Es decir, que el suceso más grave de los tres indicados anteriormente es el del conductor golpeando con el pecho contra el volante, ya que se trata de una zona extremadamente riesgosa, tal como se ha indicado en el capítulo anterior, y, además, la diferencia de velocidades es mucho mayor que en el caso del impacto de la cabeza contra el parabrisas⁷³.

Consideraciones adicionales para el conductor no sujeto

Los últimos conceptos constituyen la razón por la cual es útil analizar con mayor detenimiento algunos aspectos del impacto del pecho contra el volante, y sirven para la ilustrar la enorme utilidad del cinturón de seguridad en el momento de salvar vidas. Aprovechando el modelo de resorte inelástico y una masa se van a estimar las diferen-

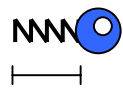
⁷¹ A fin de simplificar los próximos cálculos se va a despreciar esa reducción de velocidad.

⁷² Esto varía de acuerdo al modelo, dirección del impacto, velocidad, peso del conductor, entre otros factores.

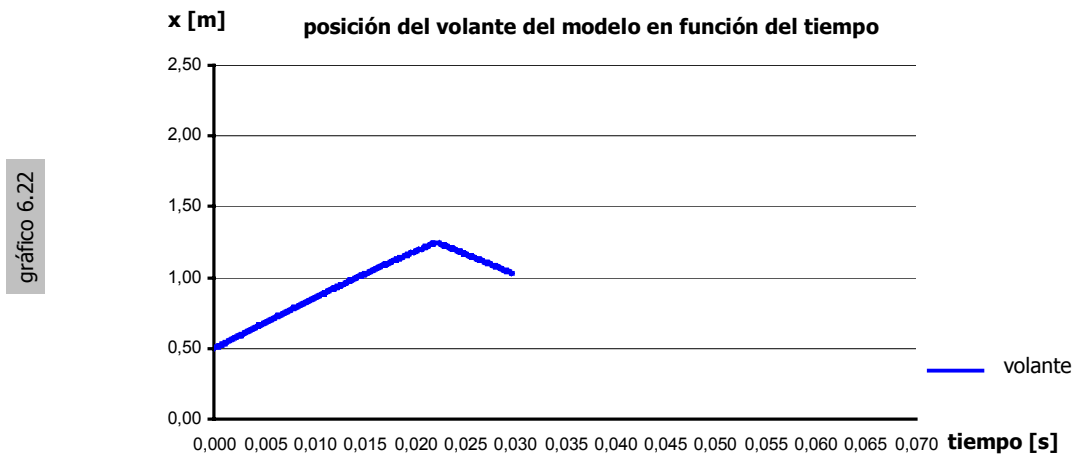
⁷³ Esto sería distinto si los parabrisas no fueran de vidrio laminado de seguridad, ya que el golpe de la cabeza contra el parabrisas, con la consecuente rotura del mismo y el movimiento de retroceso del cuerpo al detenerse el vehículo, pondrían en serio riesgo de muerte al conductor por los cortes que sufriría en el cuello, convirtiendo a este suceso en el más grave de los tres descriptos.

cias de velocidades entre el volante y la persona que lo embiste, en el caso de un choque frontal puro. Lo más conveniente es considerar la velocidad máxima de impacto posible, que corresponde a la velocidad máxima de circulación, o sea, 130 km/h. Usando el modelo indicado, se puede obtener un gráfico que analice la posición del volante y la del conductor con respecto a un origen que fijo de manera arbitraria en el lugar que ocupa el conductor. También de manera arbitraria se considera que la distancia entre el conductor y el volante en el momento del accidente corresponde a unos 50 centímetros. Así la posición del conductor en el momento inicial (la del momento del choque) es de $x_c(t=0 \text{ s})=0 \text{ m}$; y la posición del volante es de $x_v(t=0 \text{ s})=0,5 \text{ m}$. Entonces, para el siguiente vehículo:



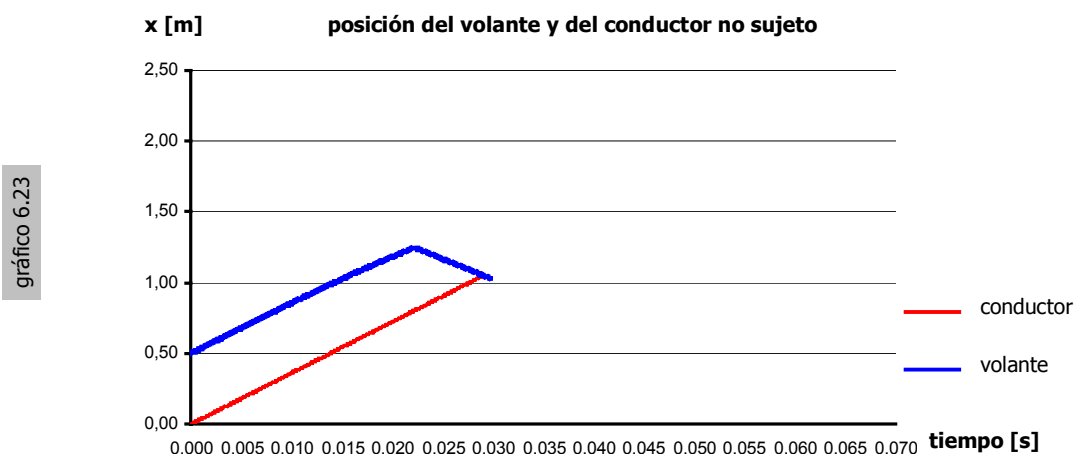

 $m = 1.500 \text{ kg.}$
 $K = 1.225.000 \text{ N/m}$
 $L = 0,75 \text{ m}$

Se obtiene el siguiente gráfico de la posición del volante en función del tiempo:



Como cuando la amplitud teórica del movimiento armónico simple es mayor que la longitud del resorte se produce un choque de tipo elástico, luego de que el volante se desplazó 0,75 m (la longitud del resorte) éste comienza a moverse hacia atrás –en realidad todo el habitáculo– a la velocidad del impacto contra el objeto fijo. Esa es la causa del movimiento de retroceso que se observa en el gráfico. A partir de ese momento el automóvil se enfrenta con fuerzas de rozamiento que limitan el movimiento, pero el efecto es difícil de modelizar, y una vez más se indica que el objetivo es dar una idea de los sucesos, resignando algo de precisión en los valores a fin de no complicar demasiado las explicaciones. Ese gráfico se puede superponer con el que indica

la posición de la persona en función del tiempo, para observar en que instante se produce el choque entre el conductor y el volante y, sobre todo, las velocidades relativas entre ambos:



El pecho del conductor impacta contra el volante a los 0,029 segundos de comenzado el accidente, cuando se está moviendo a la velocidad original del choque, es decir 130 km/h. En ese instante el volante se está moviendo hacia él (debido al choque elástico) a una velocidad de -104 km/h, o sea que la diferencia de velocidades es de:

$$|\Delta \vec{v}| = [130 \text{ km/h} - (-104 \text{ km/h})] = \mathbf{234 \text{ km/h}}$$

Desde el punto de vista del conductor, su pecho golpea contra el volante a una velocidad de ¡234 km/h! Parece innecesario aclarar que ese choque es virtualmente imposible de sobrevivir, aspecto que señala la extrema importancia del uso del cinturón de seguridad para evitar este tipo de impactos. Ahora bien, si no se tiene en cuenta el choque elástico se podría pensar, erróneamente, que en el ejemplo anterior el choque entre el pecho del conductor y el volante se produciría a 130 km/h. Se ha demostrado entonces que, en el caso del conductor no sujeto de un vehículo moderno, **ese choque puede ocurrir a una velocidad sensiblemente superior.**

Secuencia de sucesos para el conductor sujeto con cinturón de seguridad de 3 puntos

De la misma referencia anterior (5) se puede obtener una segunda secuencia que indica lo que sucede con un conductor sujeto, usando los mismos supuestos de caso del impacto sin cinturón de seguridad. En esta situación en particular se debe tener en cuenta que hay otros factores que influyen en la secuencia de sucesos, como por ejemplo el peso del conductor, la velocidad original, el material del cinturón de seguridad, el ancho de la banda de sujeción, la antigüedad del dispositivo, entre otros. De todas maneras no es la intención de este trabajo indicar valores numéricos precisos sino limitar por ahora a los comentarios a evidenciar el mecanismo general de la restricción a través de un cinturón de seguridad, que además explica la razón por la cual se debió agregar el airbag para proteger mejor al conductor, tal como se va a deducir de la siguiente secuencia:



instante t_0 : el vehículo choca y el conductor comienza a desplazarse hacia adelante.



instante $t_1 (> t_0)$: el conductor golpea el tablero con las rodillas.



instante $t_2 (> t_1)$: el conductor golpea el volante con la cabeza.

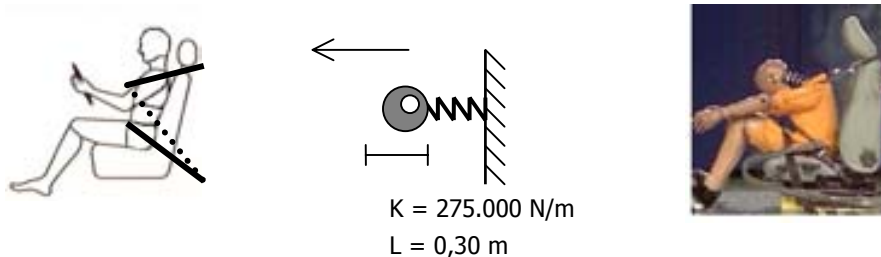
Los autores consultados (5) (6) (7) coinciden en señalar que es muy frecuente que, en el caso de un conductor sujeto mediante un cinturón de seguridad que sufre un impacto frontal, su cabeza golpee contra el volante. Esto se debe a que el cuello permite el movimiento relativo entre el tronco del conductor, que está siendo retenido por el cinturón, y la cabeza, que mantiene una cierta cantidad de movimiento y que en ningún momento se sujeta. Por eso, y como el golpe en la cabeza es uno de los sucesos más peligrosos (tal como se describió en el capítulo anterior) es que **se hace necesario complementar el cinturón de seguridad con el airbag, de manera de interponer una barrera entre la cabeza del conductor y el volante del vehículo.** O por lo menos en el caso del airbag del conductor, ya que el hecho que el acompañante delantero golpee su cabeza contra el tablero depende mucho de la posición del asiento, es decir de la distancia original entre la cabeza y ese tablero.

Consideraciones adicionales para el conductor sujeto (accidentes a baja velocidad)

Es necesario analizar con algo más de profundidad la manera en que el cinturón de seguridad desempeña su función principal, que es detener el avance del ocupante, y evitar de así que ocurra el impacto devastador contra el volante o el tablero analizado en el caso del conductor no sujeto. Para eso se puede considerar un modelo similar al de masa y resorte inelástico, suponiendo que el cinturón de seguridad retiene al ocupante ejerciendo una fuerza que crece a medida que aumenta el desplazamiento de este último. Adicionalmente, y de acuerdo a la bibliografía, se supone que el desplazamiento máximo del cinturón de seguridad es de 40 cm, y que los en los primeros 10 cm no se ejerce ninguna fuerza de sujeción sobre el ocupante (el dispositivo que trava el cinturón moderno tarda unos segundos en activarse⁷⁴). Así, quedan unos 30 cm de longitud útil para detener el movimiento hacia delante del ocupante. La incógnita que resta por develar es el coeficiente de rigidez del resorte teórico del modelo. Para definirlo se puede suponer que el cinturón de seguridad está diseñado de manera de poder detener a una persona de 80 kg. de masa cuando choca a 64 km/h⁷⁵ ($\cong 17,8$ m/s). De esta manera, y usando la ecuación (10.17), se puede obtener dicho coeficiente:

$$\bar{A} = \frac{\bar{v}_o}{\omega} \Rightarrow \omega = \frac{\bar{v}_o}{\bar{A}} \Rightarrow \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{\bar{v}_o}{\bar{A}} \Rightarrow K = \left(\frac{\bar{v}_o}{\bar{A}} \right)^2 \cdot m = \left(\frac{17,8 \text{ m/s}}{0,3 \text{ m}} \right)^2 \cdot 80 \text{ kg} \cong 275.000 \text{ N/m}$$

En definitiva, el modelo que a usar para simular el comportamiento del cinturón de seguridad es el siguiente:



Pero, como se ha dicho, el movimiento del ocupante no se debe analizar sin tener en cuenta lo que sucede con el automóvil⁷⁶. Si se utiliza una vez más el modelo del Saab 9-3 para los cálculos, se puede completar el análisis con las siguientes condiciones de borde:

- la distancia original entre el ocupante y el anclaje es nula (esto equivale a suponer que el anclaje está a la altura del hombro del ocupante y medir la posición del hombro del ocupante).
- se trata de un choque frontal puro.

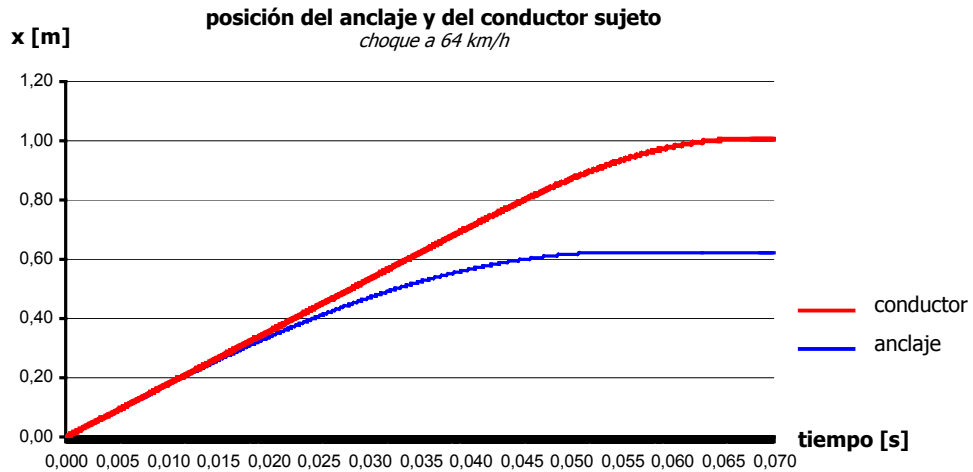
Con todos los elementos necesarios se puede hacer el siguiente gráfico que indica la manera en que se mueven tanto el parante del automóvil como el ocupante, en el caso de un accidente a 64 km/h (similar al del programa EuroNCAP):

⁷⁴ Para simplificar el análisis no se considera la influencia del pretensionador.

⁷⁵ Esta definición es arbitraria, pero los ejemplos que se dan tienen como objetivo establecer la magnitud de fuerzas, aceleraciones y demás parámetros físicos que puedan ser de interés.

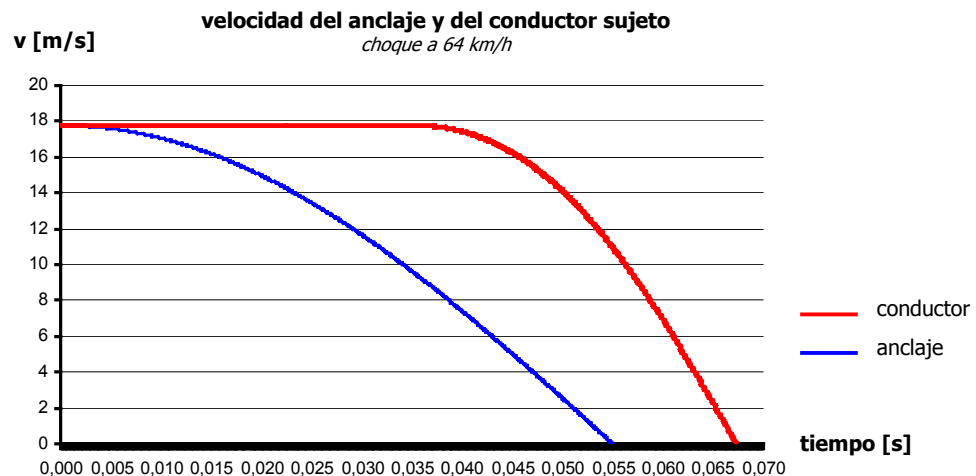
⁷⁶ En este caso con el anclaje del cinturón de seguridad, que es el punto de referencia del desplazamiento máximo del cinturón de seguridad.

gráfico 6.24



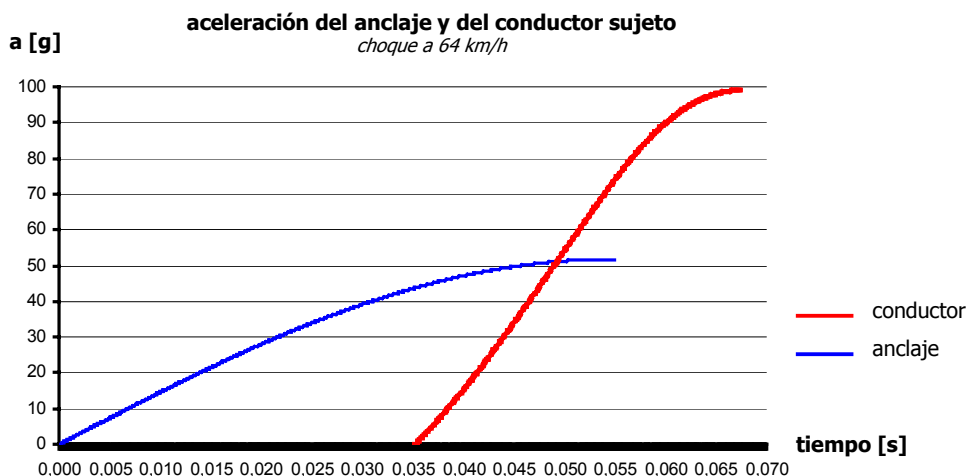
Es muy importante destacar que el automóvil no sufre un choque de tipo elástico, logrando detenerse luego de algo más de 0,05 s. Un poco más tarde el ocupante también detiene su marcha al ser sujetado por completo por el cinturón de seguridad de manera progresiva (tampoco sufre variación instantánea de la velocidad). La variación de velocidad experimentada por cada uno también puede ayudar a entender lo que sucede:

gráfico 6.25



La curva en azul representa la velocidad del anclaje, que disminuye desde los 64 km/h del impacto hasta detenerse. La curva en rojo representa la velocidad del conductor, que se desplaza a velocidad constante durante los primeros 10 cm hasta que el cinturón de seguridad se traba y comienza a sujetarlo, deteniendo la marcha del ocupante aproximadamente 0,01 s después que lo hizo el automóvil. Además, se puede completar este análisis con otros aspectos. Por un lado la aceleración máxima a la que se somete al ocupante, a través de este gráfico:

gráfico 6.26

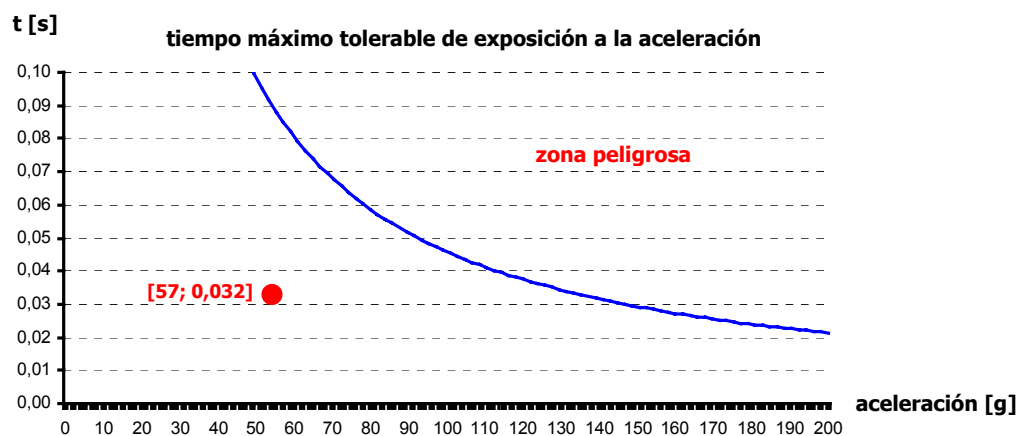


Se debe observar con particular atención que el valor máximo de aceleración al que se expone al ocupante se acerca a los 100 g, y que esto depende del valor arbitrario de coeficiente de rigidez que se consideró para el cinturón de seguridad. Pero se debe tener en cuenta que un coeficiente menor haría que el ocupante mantuviera una cierta velocidad al llegar al límite de los 30 cm de longitud útil del cinturón, produciendo un choque violento entre este último y el ocupante (y una variación instantánea de velocidad). Si en cambio se considera un coeficiente de rigidez mayor se sometería al ocupante a un pico de aceleración mayor. Y como el valor absoluto de aceleración no es un indicador del daño potencial por sí mismo, sino que debe saberse el tiempo de acción de dicha aceleración, es que es necesario analizar el tiempo durante el cual se expone a esa aceleración al ocupante. Usando las ecuaciones (10.23) y (10.27) se obtiene la siguiente aceleración media y tiempo de exposición:

- aceleración media: 57 g
- tiempo de exposición: 0,032 s

Con estos valores se puede colocar el par [57 g; 0,032 s] en el gráfico (5.9) que indica la tolerancia a la aceleración en función del tiempo:

gráfico 6.27

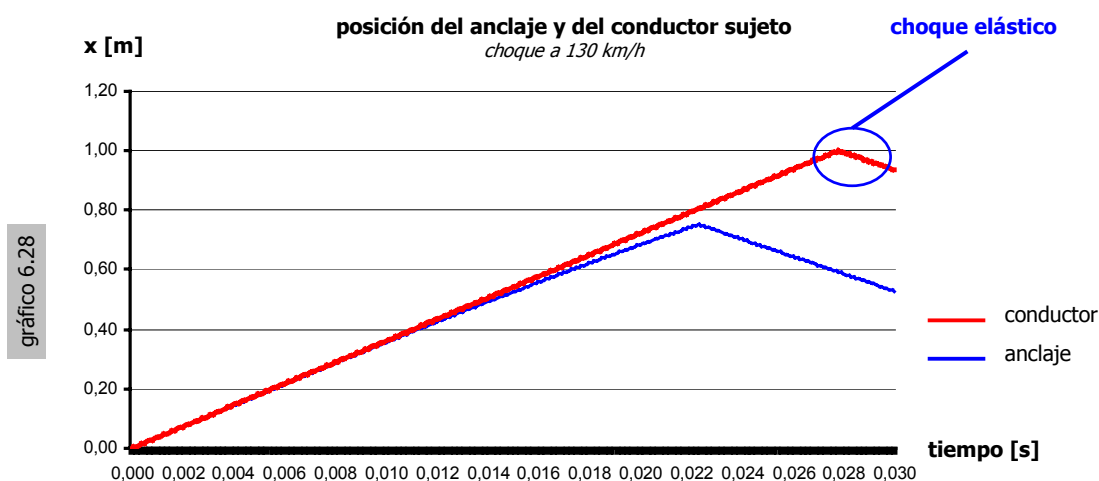


Como se puede observar la aceleración media del proceso de sujeción de un ocupante de 80 kg. que choca en un automóvil de características similares al Saab 9-3 a 64 km/h contra un objeto fijo es de una magnitud segura (en función de su valor absoluto

y del tiempo durante el cual es ejercida). Suponiendo que la fuerza del cinturón sobre el pecho es de una magnitud tal que no genera ningún daño, la ausencia de impacto sumado por último a una aceleración segura convierten a dicho **proceso de sujeción un evento de baja peligrosidad**.

Consideraciones adicionales para el conductor sujeto (accidentes a alta velocidad)

Hasta aquí la secuencia de sucesos para un ocupante sujeto mediante un cinturón de seguridad que sufre un impacto a la velocidad máxima a la que se ensayan los automóviles modernos. Resulta interesante profundizar el análisis y estudiar lo que sucedería en un choque a altas velocidades. Se va a considerar el caso de un accidente a la máxima velocidad legal de circulación (130 km/h) y las mismas condiciones del caso anterior, con el agregado del supuesto que el habitáculo sea indeformable. Bajo esos parámetros el gráfico que indica la posición del anclaje y del conductor es el siguiente:



La situación es sustancialmente distinta al caso anterior, ya que se produce un choque de tipo elástico del habitáculo, que **arrastra también al anclaje y al conductor que es tirado hacia atrás por el cinturón mientras todavía se está moviendo hacia delante**. La velocidad del impacto es de tal magnitud que cuando el habitáculo comienza a rebotar hacia atrás el conductor apenas se había movido hacia delante unos 5 cm aproximadamente con respecto al parante. En ese instante quedan unos 35 cm de longitud útil del cinturón, y mientras el automóvil comienza a moverse hacia atrás el conductor mantiene su movimiento hacia delante. El cinturón actúa sujetándolo, pero apenas puede disminuir su velocidad, y al llegar al límite de los 40 cm de longitud, el cinturón se traba por completo, **generando un violento impacto**. En ese momento el cinturón de seguridad se mueve junto al parante a una velocidad de 104 km/h (en el sentido contrario al movimiento del ocupante), y el dispositivo ha logrado disminuir la velocidad original del ocupante de los 130 km/h originales a 121 km/h⁷⁷. O sea que el impacto entre el cinturón y el pecho del ocupante se produce a la siguiente velocidad:

⁷⁷ Se debe recordar que este valor corresponde a haber supuesto que el coeficiente de rigidez del cinturón de seguridad es de 275.000 N/m, lo suficiente como para detener a un ocupante de 80 kg. que sufre un accidente a 64 km/h en un espacio de 30 cm, pero insuficiente para este segundo ejemplo.

$$|\Delta \vec{v}| = [121 \text{ km/h} - (-104 \text{ km/h})] = 225 \text{ km/h}$$

Volviendo un poco hacia atrás se puede recordar la velocidad de impacto de un conductor no sujeto contra el volante para un choque a 130 km/h: 234 km/h. Apenas 9 km/h superior a la del impacto del conductor sujeto contra el cinturón de seguridad. Y **con superficies apenas distintas** (en un caso se trata de un círculo de unos 25/30 cm de diámetro, en el otro de una banda de 5/10 cm de ancho por 50/70 cm de largo). Además, en este caso no tiene sentido analizar lo que sucede con la aceleración máxima, o con la aceleración media y su tiempo de acción. Esto se debe a que el cinturón de seguridad ejerce la aceleración sobre el ocupante durante un tiempo extremadamente corto que no alcanza a evitar el violento choque que sufre el ocupante. Frente a ese evento la magnitud de la desaceleración experimentada pierde significado. Así se puede concluir que **el proceso de sujeción en el caso de que se produzca el choque elástico de la carrocería constituye un evento de alta peligrosidad.**

Consideraciones adicionales para impactos frontales desfasados o laterales

Como se anticipó en el capítulo 4, el cinturón de seguridad está diseñado para retener eficientemente al ocupante en caso de choque frontal puro. Pero si se produce la rotación del automóvil, la sección superior del cinturón no es capaz de retener por completo el cuerpo del ocupante, que también gira y tiende a salirse del cinturón.



En un choque frontal desfasado el automóvil gira y, si lo hace en el sentido de la foto, el conductor es empujado hacia fuera, en la dirección en que el cinturón de seguridad de tres puntos todavía es capaz de retenerlo. En cambio el acompañante es lanzado hacia dentro, donde la porción superior del cinturón de seguridad no puede retenerlo, reduciendo el dispositivo a un cinturón ventral (de dos puntos) y permitiendo el movimiento del torso hacia delante. Si el choque fuera en el extremo contrario la situación se invertiría, dejando siempre a algunos de los ocupantes expuestos al peligroso movimiento indicado.

Y como **la mayoría de los accidentes frontales involucran algún tipo de giro**⁷⁸, alguno de los ocupantes se expone a que su torso se mueva más de lo debido. Este fenómeno se podría evitar a través de la provisión de cinturones de cuatro puntos, como ya se ha comentado.

Por otro lado, en los choques laterales sucede algo similar. Si el impacto es del lado del conductor, todos los ocupantes se desplazan a la izquierda, pero sólo los que están del lado izquierdo son sujetos por el cinturón de seguridad. El resto no logra ser sujetado por la sección superior del cinturón, yendo entonces a golpear contra los demás ocupantes. En el caso de un choque del lado derecho, la situación se invierte. Como en el caso anterior, la manera de evitar este fenómeno, es a través de la provisión de un cinturón de seguridad de cuatro puntos.

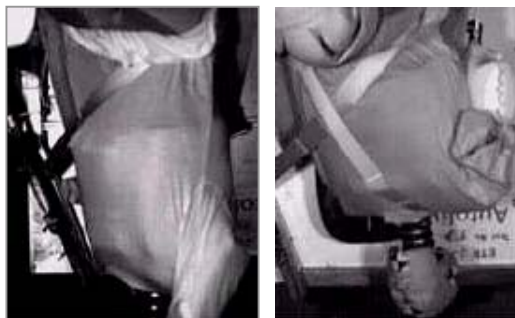


En la imagen de la izquierda se observa que el cinturón de tres puntos no es capaz de retener al ocupante en un accidente lateral. En cambio el cinturón de cinco puntos (derecha) sí lo logra.

En ambos casos, donde el cinturón de seguridad no es capaz de retener al ocupante del automóvil (por lo menos en lo que se refiere a la parte superior del cuerpo, que es una de las que se deben proteger con mayor cuidado), no tiene sentido analizar el efecto de la desaceleración ejercida, ya que como se ha dicho en el capítulo anterior, la magnitud de los impactos que se generan hacen que su gravedad sea mucho mayor que la desaceleración experimentada como fenómeno aislado del impacto.

Consideraciones adicionales para vuelcos

Existen pocos ensayos que involucren el vuelco de un vehículo para analizar la secuencia de sucesos para los ocupantes. Como se trata de un fenómeno particularmente peligroso sería muy interesante profundizar los estudios al respecto. Mientras tanto, se puede decir que el cinturón de seguridad de tres puntos no está preparado para sujetar al ocupante en las distintas direcciones hacia las que es lanzado durante un vuelco. En esos casos se impone, otra vez, el uso del cinturón de cuatro o más puntos.



De manera similar a la anterior se pueden comparar la eficacia de un cinturón de seguridad de tres puntos (izquierda) con uno de cinco (derecha) al momento de sostener al pasajero y evitar que caiga, al producirse el vuelco del automóvil.

Esto se debe a que durante el vuelco el ocupante es lanzado hacia adelante, hacia arriba, hacia los costados, hacia abajo, sucesiva y alternativamente, y por lo tanto se hace necesario restringir el movimiento del torso en cualquier dirección y sentido, algo que el cinturón de seguridad de tres puntos no es capaz de ofrecer. De la misma manera que en lo recién comentado, los impactos que se generan son potencialmente mucho más peligrosos que las aceleraciones, sobre todo teniendo en cuenta que en los vuel-

⁷⁸ Para que el giro no se produzca debe existir una perfecta alineación de los centros de masa, suceso de muy baja probabilidad de ocurrencia, e inclusive en esos casos la diferencia en la rigidez a lo largo de la carrocería puede hacer girar al habitáculo.

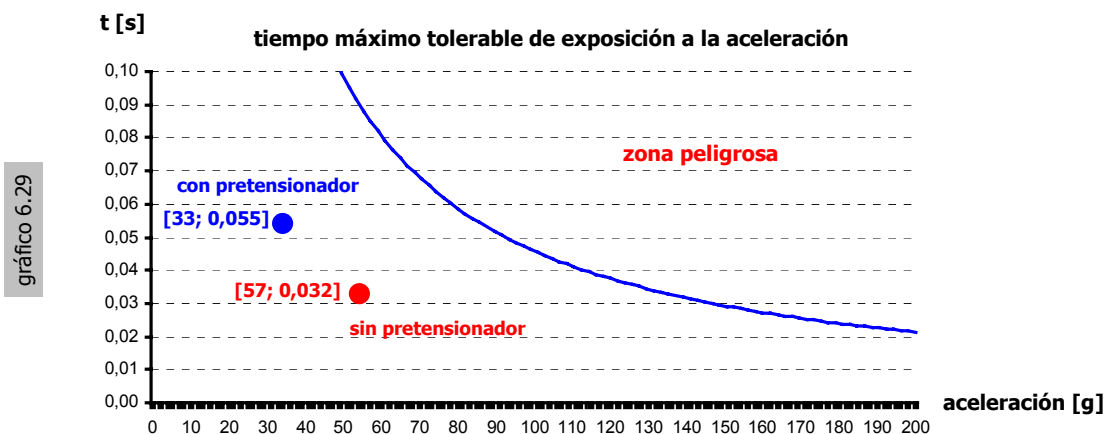
cos no se producen variaciones de velocidad en tiempos cortos (como sí ocurre en un impacto frontal, lateral, o trasero) ya que el vehículo tiende a mantener la cantidad de movimiento, reduciendo la velocidad con cada vuelta, hasta detenerse, o impactar contra algún objeto (y en este caso ya no se trataría sólo de un vuelco).

Utilidad del pretensionador y del limitador de carga

El pretensionador actúa de manera complementaria al cinturón de seguridad, para mejorar su eficacia. La forma más clara de analizar las ventajas del pretensionador parece ser a través de análisis del gráfico (6.26), ya expuesto en esta misma sección, que indica la aceleración experimentada por el parante y el ocupante del ejemplo del choque a 64 km/h. Si se supone que el pretensionador actúa de manera de retener al ocupante desde el inicio del choque esto significa que no se produce movimiento relativo entre el parante y dicho ocupante. Las variaciones de posición a lo largo del tiempo serán casi idénticas, y la aceleración experimentada por el ocupante coincidirá con la curva azul del gráfico (la del parante). Por comparación se puede deducir dos cosas. Por un lado, que si el sistema de sujeción incluye un pretensionador **la aceleración máxima a la que se somete al ocupante del ejemplo es menor**. Por el otro, que **el tiempo durante el cual el ocupante desacelera es mayor** que en el caso del cinturón de seguridad sin pretensionador. Usando la misma metodología anterior para calcular la aceleración media y el tiempo de exposición se pueden obtener los siguientes valores:

- aceleración media: 33 g
- tiempo de exposición: 0,055 s

En otras palabras, se expone al ocupante a una aceleración media equivalente a la mitad del valor correspondiente al cinturón de seguridad sin pretensionador, durante un tiempo igual a casi el doble. Para facilitar el análisis se puede colocar este nuevo punto en el gráfico (5.9) de la resistencia a la aceleración:



Ambos puntos corresponden a la "zona segura", es decir, que en principio las dos maneras de sujetar al ocupante parecen relativamente poco peligrosas. De todas maneras, el proceso mediante el cual se mantiene al ocupante "pegado" al anclaje del cinturón de seguridad con el pretensionador implica **una aceleración media de valor sensiblemente inferior**, y por lo tanto se puede pensar que **ofrece alguna ventaja por sobre**

el proceso sin pretensionador. Se debe aclarar, sin embargo, que el pretensionador no siempre logra evitar el movimiento relativo entre el ocupante y el anclaje, principalmente debido a que para hacerlo de manera eficaz debería oponer distintas fuerzas en función de la cantidad de movimiento del impacto original, y los automóviles carecen de sensores que indiquen la masa del ocupante y la velocidad del choque⁷⁹. Por eso, luego de primer momento de sujeción del pretensionador, el ocupante comienza a desplazarse hacia delante. Entonces entra en acción otro dispositivo, el limitador de carga, que tiene como función principal disminuir la magnitud de la aceleración que se ejerce sobre el ocupante⁸⁰. El problema que surge en ese instante es que el limitador de carga actúa modificando el coeficiente de rigidez del cinturón de seguridad y que, nuevamente, esto sólo es eficaz si se tiene el conocimiento de la cantidad de movimiento original, ya que de otra manera ese dispositivo no puede evitar que en ciertas condiciones la fuerza ejercida sea insuficiente para detener al ocupante en los 30 cm útiles del cinturón, exponiendo a este último a un choque violento contra el cinturón de seguridad. Esto es de vital importancia, ya que el sentido del cinturón de seguridad es frenar al conductor antes de que choque contra el volante (u otras partes del interior del vehículo). Si al llegar a los 40 cm de longitud total del cinturón de seguridad el ocupante todavía se está moviendo a una cierta velocidad no existen grandes diferencias entre el impacto del pecho contra el cinturón o contra el volante. Al respecto muchos expertos coinciden en señalar que en ciertas circunstancias el cinturón de seguridad es el responsable de algunas heridas infligidas a los ocupantes, especialmente en el abdomen, en el tórax y en la columna vertebral (8). Que, de acuerdo a lo analizado en la sección anterior, parecen tener que ver con los choques elásticos del habitáculo más que con el funcionamiento del cinturón de seguridad en sí mismo.

Estimación de la eficacia del cinturón de seguridad

A pesar de las deficiencias recién indicadas, el cinturón de seguridad puede considerarse el dispositivo de protección más eficaz del que disponen los ocupantes al momento de sufrir un accidente. Para demostrar esto se pueden observar los siguientes datos del informe anual de la NHTSA (1):

uso de cinturón de seguridad	conductores de automóviles/camionetas				
	involucrados	mueustos	% ⁸¹	heridos	% ⁸²
con cinturón de seguridad	8.832.000	26.411	0,3	2.959.000	33,5
sin cinturón de seguridad	441.000	17.355	3,9	252.000	57,1
total conductores	9.273.000	43.766	0,5	3.211.000	34,6

Del cuadro se puede comentar que la relación conductores muertos/conductores involucrados **es trece veces mayor en el caso de los que sufrieron accidentes sin tener puesto en ese momento el cinturón de seguridad** que los que sí lo tenían colocado. Si se supusiera que los más de nueve millones de conductores que estuvieron involucrados en accidentes de tránsito de automóviles o camionetas, en el año 2000

⁷⁹ A esto se suma el efecto de la elasticidad del material del cinturón de seguridad que también permite que el ocupante se desplace una cierta longitud hacia delante.

⁸⁰ El limitador de carga actúa en combinación con el airbag, reduciendo la fuerza aplicada sobre el ocupante una vez que el airbag entra en contacto con este último. En lo que hace a este análisis se va a considerar solamente la capacidad del limitador de reducir la desaceleración del ocupante, sin tener en cuenta la posible interacción con el otro dispositivo de seguridad.

⁸¹ Porcentaje de conductores muertos sobre el total de conductores involucrados.

⁸² Porcentaje de conductores heridos sobre el total de conductores involucrados.

en los Estados Unidos, sufrieron aproximadamente el mismo tipo de accidente, se podría decir que si el 100% de ellos hubiese chocado sin tener el cinturón de seguridad puesto, los muertos del año 2000 deberían haber sido algo más de 360.000 en vez de 43.766. Despreciando el efecto de los distintos tipos de accidentes y de las distintas probabilidades de supervivencia de cada individuo, **el cinturón de seguridad es responsable de salvar unas 315.000 muertes anuales, sólo en los Estados Unidos.** En el caso de los heridos las diferencias no son tan marcadas. La tasa de conductores heridos que no usaban cinturón de seguridad en el momento del impacto es menos del doble que la de los conductores que sí lo usaban. **Usando el mismo razonamiento anterior, el cinturón de seguridad es responsable de evitar unos 2.350.000 heridos anuales.** Esta explicación tiene poca rigurosidad estadística, principalmente por el hecho de considerar que cada ocupante tiene la misma probabilidad de supervivencia en cada accidente, y que esa probabilidad sólo se modifica si tiene puesto o no el cinturón de seguridad, pero (otra vez más) el hecho que se intenta remarcar es la importancia que tiene el cinturón, más allá de la precisión de las cifras. Lo cierto, entonces, es que este dispositivo de seguridad convierte accidentes potencialmente mortales en accidentes que generan heridos, salvando innumerable cantidad de vidas por año. Lamentablemente, sin embargo, existen muchos accidentes en donde el uso o no del cinturón no modifica el resultado, especialmente aquellos en donde las velocidades de impacto son tan altas que generan deformaciones del habitáculo e intrusiones de objetos al espacio vital de los ocupantes (8). Finalmente, el cinturón de seguridad es muy eficaz para evitar las heridas de los accidentes a bajas velocidades, donde no se deben absorber energías demasiado grandes, no se produce el choque elástico de la carrocería, y basta con asegurarse que el ocupante no impacte ningún elemento del interior del auto para que salga ileso. Resumiendo estos últimos conceptos, el cinturón de seguridad es:

- poco o nada eficaz en accidentes a altas velocidades.
- medianamente eficaz en accidentes a velocidades medias.
- muy eficaz en accidentes a bajas velocidades.

Lo difícil es indicar qué es “alta”, “media” o “baja” velocidad. Uno de los autores consultados confirma las limitaciones del este dispositivo en un informe publicado por la SAE (9), donde sostiene que los cinturones de seguridad sólo son efectivos en accidentes con Δv menores a 50 km/h. Por otro lado las características de rigidez de los automóviles modernos hacen que se produzcan choques de tipo elástico en accidentes a velocidades mayores a los 80 km/h (en algunos automóviles inclusive a velocidades más bajas como el ejemplo del Saab que choca contra el camión Scania ya explicado). Así es que se puede establecer al menos una referencia general para las velocidades de la lista anterior, basada en la bibliografía consultada y en lo dicho en las secciones anteriores. En definitiva se puede decir con un cierto margen de error que el cinturón de seguridad es:

- **poco o nada eficaz** en accidentes a velocidades **> 80 km/h.**
- **medianamente eficaz** en accidentes a velocidades entre **50 km/h y 80 km/h.**
- **muy eficaz** en accidentes a velocidades **< 50 km/h.**

Estimación de la eficacia del airbag frontal

La primera aclaración que se debe hacer es que al hablar de airbag se va a hacerlo suponiendo que se trata de un dispositivo que complementa la acción del cinturón de seguridad, y cuya función se limita a evitar que el ocupante impacte contra el interior del habitáculo. Por eso volviendo al caso del conductor que sufre un impacto frontal, el objetivo es estimar la eficacia del airbag frontal para reducir las heridas que sufriría ese conductor al golpear la cabeza contra el volante. Al respecto se puede considerar un informe del gobierno australiano que tuvo como objetivo estudiar la eficacia de los dispositivos de protección de los automóviles en accidentes frontales (10). Uno de los aspectos analizados incluyó un muestreo de 383 conductores que sufrieron accidentes de ese tipo, de donde se concluye que el airbag redujo significativamente las heridas en el cuello, aumentando también significativamente las heridas en las extremidades superiores. En las otras regiones del cuerpo no hubo diferencias significativas desde el punto de vista estadístico entre los ocupantes de vehículos equipados con airbag y los que circulaban en vehículos sin dispositivo. Más interesante resulta otro informe, realizado por el Harborview Injury Prevention and Research Center de EE.UU (11), que incluyó el análisis de casi 60.000 vehículos accidentados en ese país entre los años 1999 y 2000. Estos accidentes involucraron vehículos de modelos de 1987 a 2000 (antes de 1987 había muy pocos automóviles provistos de airbag en los Estados Unidos). Luego de descartar, por diversas razones, muchos accidentes, el análisis se hizo con una base de 51.031 vehículos, de los cuales el 100% correspondía a automóviles y camionetas. De todos esos vehículos se sabía de manera fehaciente la presencia de airbags, la condición de activado de los mismos⁸³, el sexo y edad de los ocupantes, y el uso o no del cinturón de seguridad. En el estudio no se indica qué porcentaje de ocupantes de esos vehículos tenían el airbag activado y, simultáneamente, el cinturón de seguridad puesto. Pero recurriendo a los valores de la NHTSA de los conductores de automóviles/camionetas involucrados en accidentes de tránsito en el año 2000 se lo puede estimar:

tabla 6.9

	conductores involucrados	%
con cinturón de seguridad	8.832.000	95,2
sin cinturón de seguridad	441.000	4,8
total conductores	9.273.000	100,0

O sea que el 95% de los ocupantes de vehículos involucrados en accidentes tenía puesto el cinturón de seguridad, por lo tanto se puede concluir que en casi la totalidad de los impactos analizados por el Harborview Injury Prevention and Research Center el airbag funcionaba como un dispositivo complementario del cinturón de seguridad, tal como se lo está considerando aquí. Lo importante es que en ese exhaustivo estudio se comprobó que **el airbag fue el factor directo de la disminución de un 8% de las muertes potenciales** (con un intervalo de confianza del 95% los límites inferior y superior fueron del 4 y del 12% respectivamente). Otras conclusiones importantes fueron:

- la disminución del riesgo fue menor en los choques frontales desfasados (-30° a +30° con respecto al eje longitudinal del auto) que en los choques frontales puros, siendo los valores del 16 y del 22% relativamente.
- hubo **aumento de riesgo de muerte para los accidentes no frontales** (3% más).

⁸³ La mayoría de los airbags permiten desactivar su acción, aspecto particularmente útil cuando hay niños muy pequeños sentados en la silla suplementaria, en el lugar del acompañante. En este caso citado la activación del airbag puede causar la muerte del niño, debido a la violencia del inflado.

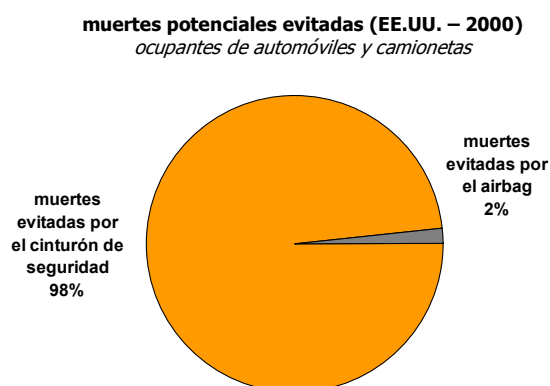
En otras palabras, estos últimos dos comentarios indican que el airbag es menos eficaz cuando el impacto no es frontal puro –recordar que los choques frontales puros no son el suceso más frecuente–. En el caso particular de los choques laterales o traseros, el airbag parece aumentar el riesgo de muerte. De todas maneras, considerando que el airbag disminuye aproximadamente un 8% las muertes en accidentes de tránsito⁸⁴, se puede comprobar la diferencia entre la eficacia de este dispositivo y la del cinturón de seguridad. Como se indicó en la sección anterior, en Estados Unidos hubo 43.766 ocupantes de automóviles/camionetas muertos en el año 2000. En el supuesto caso que el 100% de los vehículos hubiesen tenido airbag (las estadísticas de la NHTSA no indican su presencia o no) ese dispositivo sería el responsable de haber salvado unas 3.800 muertes en el año⁸⁵. En la siguiente tabla se pueden comparar entonces las muertes reales del año 2000 y las muertes potenciales que fueron evitadas por el cinturón de seguridad y por el airbag:

tabla 6.10

	cantidad anual
total muertes reales	43.766
muertes evitadas por el cinturón de seguridad	315.000
muertes evitadas por el airbag	3.800
total muertes potenciales	362.566

Puesto en otras palabras, si los automóviles no tuvieran ni cinturón de seguridad ni airbag, las muertes anuales de conductores de automóviles y camionetas en los Estados Unidos pasarían de ser 43.766 a casi 365.000. Y **en esa disminución de muertes el principal responsable es el cinturón de seguridad**, mientras que el airbag (actuando como complemento del cinturón) apenas participa con un pequeño porcentaje. En el siguiente gráfico se puede observar la diferencia de eficacia entre ambos dispositivos, en lo que se refiere a su capacidad de evitar muertes potenciales:

gráfico 6.30



Esto necesariamente debe llamar a la reflexión, porque indica que los esfuerzos económicos de los fabricantes deberían dirigirse a dotar a los vehículos de un mejor sistema de cinturón de seguridad antes de gastar dinero en dispositivos sofisticados de múltiples airbags (algunos autos ofrecen nueve airbags en su interior). A propósito es bastante común, sobre todo en Argentina, que un vehículo tenga airbags frontales como dotación de serie, pero que carezca de cinturón de seguridad con pretensionador

⁸⁴ Otros estudios (6) (9) señalan una disminución potencial de muertes de entre el 10 y el 14% pero presentan como limitación el pequeño tamaño de muestra.

⁸⁵ $47.571 \text{ muertes potenciales} - 8\% \text{ de las muertes evitadas por el airbag } (3.805) = 43.766 \text{ muertes reales.}$

y limitadores de carga de múltiples etapas, **cuando es casi seguro que este último dispositivo brindaría a los ocupantes una mayor probabilidad de sobrevivir un impacto que el airbag.** Este es sin dudas otro ejemplo más de las contradicciones que existen en la seguridad del automóvil que privilegia el desarrollo de sistemas complicados desde el punto de vista tecnológico (que son muy valiosos al momento de posicionar el producto) en detrimento de la búsqueda de mayor eficacia en aquellos dispositivos, en apariencia más simples, **que brindan mayor y mejor seguridad.**

Comentarios sobre la eficacia de los airbags laterales

Los airbags laterales han sido introducidos al mercado hace muy poco, y principalmente en los vehículos más lujosos, por lo tanto no es posible hacer un estudio tomando un muestreo amplio como en el caso del estudio recién analizado para los airbags frontales. Sin embargo, se puede hacer una breve comparación entre la forma de actuar de los distintos airbags. Por un lado, los airbags frontales actúan como un dispositivo complementario del cinturón de seguridad y de la carrocería.



El airbag lateral no impide, lógicamente, la deformación del habitáculo ni el desplazamiento del conductor hacia la puerta.

Esta última tiene como función evitar el aplastamiento de los ocupantes y la intrusión al habitáculo de elementos que puedan dañarlo. El cinturón de seguridad se ocupa de sujetar al automovilista, reduciendo su velocidad y evitando casi todos los impactos contra el interior del auto. El airbag frontal, finalmente, debe evitar que el conductor y su acompañante golpeen sus cabezas contra el volante y el tablero, respectivamente. Por el otro lado, los airbags laterales deberían actuar también como un dispositivo complementario del cinturón de seguridad y de la carrocería. Las superficies del auto que se cubren para proteger al automovilista son las puertas, vidrios laterales y parantes. La diferencia es que estos airbags actúan en muchos casos sin la ayuda de los otros dispositivos. Ya se ha indicado que la carrocería de un automóvil no está diseñada para evitar las deformaciones que puedan dañar a los ocupantes en caso de un accidente lateral. Además, los cinturones de seguridad tampoco restringen eficientemente el movimiento lateral, por lo tanto los airbags laterales pueden cumplir su función sólo en contadas ocasiones, que es cuando el impacto lateral no genera deformación del habitáculo, y los ocupantes fueron sujetos de manera de restringir su movimiento lateral. Suceso que ocurre solamente en los accidentes a muy baja velocidad. Dados estos argumentos, **es muy probable que los airbags laterales no contribuyan a evitar ninguna muerte potencial, aunque sí eviten muchas heridas, sobre todo en los accidentes urbanos a velocidades reducidas.**

6.6. Análisis de resultados de programas de ensayo

El programa de ensayo de vehículos más difundido se desarrolló en los EE.UU. en 1978, bajo las siglas NCAP (New Car Assessment Program, o “programa de evaluación de nuevos automóviles”). Los principales objetivos del programa al día de hoy son:

- **proveer información** a los potenciales compradores de automóviles para ayudarlos a tomar la mejor decisión de compra. Esta información incluye los resultados de ensayos de impactos frontales y laterales.
- **incentivar a los fabricantes de autos** a mejorar la protección que sus vehículos ofrecen a los ocupantes durante los impactos, y al mismo tiempo a hacer que sean menos propensos a sufrir vuelcos. Es intención del programa que las mejoras se realicen de **manera voluntaria** por parte de los fabricantes en lugar de hacerlo compulsivamente a través de regulaciones.

En Estados Unidos el organismo encargado de realizar los ensayos es la NHTSA, y existen otras tres organizaciones en el mundo que también evalúan la seguridad de los vehículos bajo normativas similares. Una en Europa (EuroNCAP), otra en Japón (OSA, National Organization Automotive Safety and Victim's Aid) y la última en Australia (NRMA, National Road and Motorist's Association). Paralelamente, también en Estados Unidos, el IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) realiza ensayos que tienen leves diferencias con los del programa NCAP. Todos los resultados de los distintos exámenes se expresan con puntuaciones que van desde una estrella para el peor desempeño, hasta cinco estrellas para la mejor protección. Cada organización, además, publica en su sitio web los resultados, con los detalles más importantes de cada automóvil. Se debe tener en cuenta que si bien los programas comparten la mayoría de los criterios para evaluar la seguridad, cada uno tiene un conjunto distinto de ensayos. Por ejemplo la NHTSA realiza pruebas de choques frontales puros contra una barrera fija, mientras que el IIHS o el EuroNCAP ensayan los automóviles en choques frontales desfasados. Por otro lado también hay diferencias en la manera de presentar los resultados, ya que la NHTSA anuncia una calificación para los choques frontales y otra para los laterales para cada vehículo, mientras que el EuroNCAP condensa la información de ambos ensayos en un solo resultado.

Información provista por los programas de ensayos de vehículos

Uno de los dos objetivos principales del programa NCAP es dar información a los potenciales compradores de vehículos. En las páginas web de cada uno de los programas mencionados anteriormente se encuentra una amplia base de datos de todos los vehículos ensayados, de manera que quien esté interesado puede consultar la información disponible. Como se ha dicho existen diferencias entre los distintos programas en el protocolo aplicado, tanto en el tipo de ensayo (frontal puro o desfasado, por ejemplo) como en la velocidad de impacto, en el criterio de daño a cada sector del cuerpo, y en los sectores del cuerpo analizados. Pero a pesar de esas diferencias los resultados son similares para un mismo modelo ensayado por distintos programas, y no se han observado diferencias de más de una estrella entre las distintas calificaciones de un mismo vehículo. La mayor diferencia en cuanto a la calidad de información es la forma de presentar los resultados, y en la siguiente tabla se resume la información indicada:

tabla 6.11

	NHTSA	OSA	NRMA	EuroNCAP	IIHS
impacto frontal (conductor)	X				
impacto frontal (pasajero delantero)	X				
impacto frontal general				X	X ⁸⁶
impacto lateral (conductor)	X				
impacto lateral (pasajero trasero)	X				
impacto lateral general				X	
impacto general (conductor)		X			
impacto general (pasajero delantero)		X			
impacto general			X	X	
tendencia a volcar	X				
protección a peatones			X	X	

Es probable que para que el automovilista pueda comprender de manera más sencilla las calificaciones, tenga que entregarse una sola calificación global, a la manera del EuroNCAP y la NRMA. Por ejemplo en el caso de la NHTSA el futuro comprador debe integrar cinco calificaciones distintas y, además, compararlas contra las cinco calificaciones de los demás vehículos que le interesan, algo que puede generar confusión. Adicionalmente, casi todas las páginas web mencionadas permiten comparar los puntajes de los distintos vehículos, pero aclaran que **esa comparación sólo tiene sentido entre vehículos de masa similar** (la NHTSA indica una diferencia de peso de ± 150 kg. en el caso de los impactos frontales, mientras que en los ensayos de impactos laterales la comparación es válida entre cualquier vehículo). Esto significa, por ejemplo, que las cuatro estrellas que el EuroNCAP asigna al Volvo S80 no son comparables con las cuatro estrellas que el mismo programa asigna al Peugeot 206. Este hecho es muy importante, ya que la diferencia de masas entre vehículos es, entre otras cosas, consecuencia de la diferencia de tamaños (y por ende del largo entre ejes). A propósito el siguiente cuadro resume los datos de cantidad de ocupantes involucrados y muertos en accidentes fatales⁸⁷ de automóviles de acuerdo a la longitud entre ejes de los vehículos, magnitud que se puede asimilar a la longitud total del auto (1):

tabla 6.12

ocupantes	distancia entre ejes ⁸⁸					
	< 2,41 m	2,42 <d< 2,51	2,52 <d< 2,64	2,65 <d< 2,77	2,78 <d< 2,90	> 2,91 m
	Smart	Peugeot 206	Honda Civic	Saab 9-3	Mercedes-Benz Clase E	Audi A8
totales	2.067	7.523	15.152	12.069	5.479	2.349
muertos	1.096	3.622	6.933	5.131	2.259	884
% fatal/total	53%	48%	46%	43%	41%	38%

Esto significa que los ocupantes de automóviles de un largo similar al de un Audi A8 tienen aproximadamente un 50% más de probabilidades de sobrevivir a un accidente grave que aquellos de los de los vehículos más angostos ofrecidos en el mercado. En otras palabras, **a medida que el auto más largo es más seguro**. Esto implica que el Volvo S80 debe ser más seguro que el Peugeot 206, pero la calificación del programa EuroNCAP no manifiesta diferencia alguna:

⁸⁶ La escala del IIHS no establece un puntaje que va de una estrella a cinco estrellas, sino otra que indica cuatro calificaciones: bueno, aceptable, marginal, pobre.

⁸⁷ Según la NHTSA un accidente fatal es aquél donde al menos uno de los ocupantes de los vehículos involucrados muere.

⁸⁸ No incluye 1.572 ocupantes totales y 567 ocupantes muertos en vehículos de distancia entre ejes desconocida.



Es definitiva, esto **puede generar algún tipo de confusión**, ya que muchos intuyen, sin necesidad de ensayos complicados, que un auto más grande –y con una estructura de mayor resistencia– es más seguro que un auto pequeño. Por eso, encontrar la misma calificación para autos que tienen una diferencia de casi un metro en el largo (3,84 metros para el Peugeot 206 y 4,82 metros para el Volvo S80) y una masa muy distinta, puede generar que quien analiza los resultados de los ensayos concluya que no son coherentes, o que entienda que ambos vehículos proporcionan la misma protección en caso de impacto, aspecto que no es del todo válido. A pesar de esto, las escalas de medición dan una buena idea del nivel de protección de cada vehículo, información que si bien no es todo lo precisa que podría ser, resulta ser una herramienta útil de análisis para el futuro comprador de un automóvil. Al respecto se pueden citar las conclusiones de una investigación que analizó la correlación que existe entre la calificación de cada vehículo en el programa EuroNCAP y la gravedad de heridas generadas por esos automóviles en accidentes de la vida real (12). Las principales conclusiones del estudio fueron:

- no se encontró correlación alguna entre la calificación EuroNCAP y el riesgo de sufrir heridas leves.
- se comprobó una fuerte y consistente correlación general entre la calificación EuroNCAP y el riesgo de sufrir heridas serias o fatales, de acuerdo a lo siguiente:

tabla 6.13

calificación EuroNCAP	riesgo de sufrir heridas serias o fatales
★	1,00
★★	0,90
★★★	0,78
★★★★	0,66

En el momento en que se realizó el estudio no había automóviles calificados con cinco estrellas (el máximo previsto), por eso no se indica el riesgo relativo para ese grupo de automóviles. Lo cierto entonces es que más allá de algunas contradicciones ha probado ser un indicador de la calidad de la protección general de cada vehículo (al menos en impactos frontales y laterales). Lo que falta es saber si los compradores usan esa información para tomar la decisión de compra, aspecto que no se va a evaluar en este estudio, si bien se puede intuir que la adquisición se hace en general pensando en el estilo exterior, las prestaciones y el confort, y no se presta atención a la calificación NCAP. En consecuencia, es probable que una mayor difusión en los medios favoreciera la conciencia del consumidor acerca de la importancia de este índice.

⁸⁹ Hasta aquí se ha repasado brevemente el grado de cumplimiento del objetivo del programa NCAP de brindar información a los futuros compradores de automóviles. De todas maneras no es sencillo evaluar si esa información resulta útil a esos compradores. En otras palabras, la información está disponible, y más allá de algunas contradicciones ha probado ser un indicador de la calidad de la protección general de cada vehículo (al menos en impactos frontales y laterales). Lo que falta es saber si los compradores usan esa información para tomar la decisión de compra, aspecto que no se va a evaluar en este estudio, si bien se puede intuir que la adquisición se hace en general pensando en el estilo exterior, las prestaciones y el confort, y no se presta atención a la calificación NCAP. En consecuencia, es probable que una mayor difusión en los medios favoreciera la conciencia del consumidor acerca de la importancia de este índice.

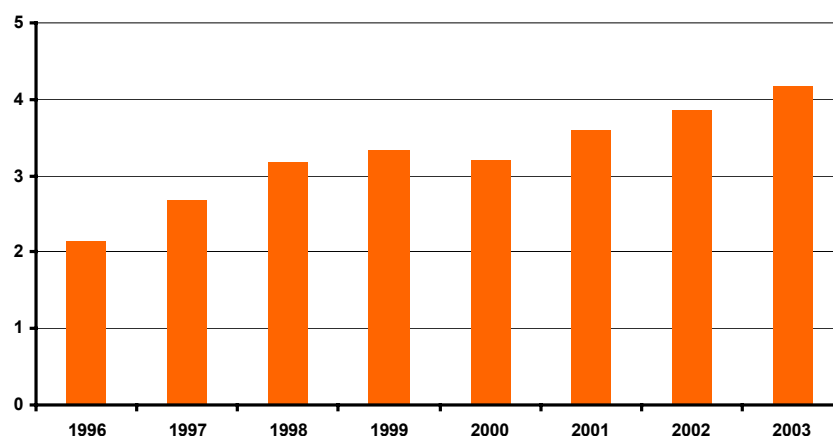
Evolución de la seguridad de los automóviles ensayados

Más allá del uso o no por parte de los automovilistas de la información de los programas NCAP, quienes aprovechan, y mucho, sus resultados son los fabricantes de automóviles, que año tras año diseñan autos que reciben mejores calificaciones. Esto se puede comprobar a través de la siguiente tabla, que indica la cantidad de vehículos ensayados en cada año por en EuroNCAP y la calificación promedio anual:

tabla 6.14

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
cantidad de vehículos ensayados	7	16	17	22	15	27	19	36
calificación promedio [estrellas]	2,1	2,7	3,2	3,3	3,2	3,6	3,8	4,2

calificación promedio de los automóviles ensayados en el programa EuroNCAP
[una estrella = calificación mínima / cinco estrellas = calificación máxima]



Es notable la evolución que han sufrido los vehículos, hecho que se percibe especialmente cuando un fabricante lanza un nuevo modelo. Como ejemplo se puede nombrar el caso del Citroën Xantia, que recibió una calificación de dos estrellas, mientras que el vehículo que lo reemplazó, el Citroën C5 se calificó con cuatro estrellas, mejorando notablemente la eficacia de la protección del vehículo de gama media ofrecido por el fabricante. Durante el anuncio de los últimos resultados del EuroNCAP, en junio de 2003, Max Mosley, presidente de la FIA elogió a los fabricantes, quienes en el año 2000 aducían que era imposible que sus vehículos alcanzaran la calificación máxima del EuroNCAP, y tres años después habían logrado diseñar doce vehículos "cinco estrellas". Lo que prueba que **el segundo de los objetivos del NCAP se está cumpliendo adecuadamente, siendo un gran estímulo para las mejoras introducidas hasta el momento, y para las que serán introducidas en los próximos años.**

6.7. Conclusión del capítulo

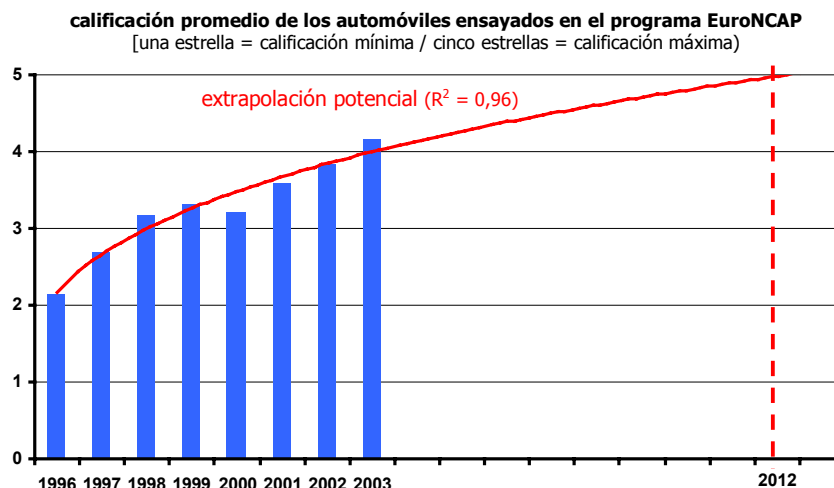
Al establecer los patrones más comunes de los accidentes de tránsito, y las bases de la seguridad, se puede evaluar con mayor precisión la eficacia del automóvil moderno en lo que respecta a la protección que ofrece a sus ocupantes. Pero, ante la ausencia de ensayos de impacto a altas velocidades, dicha eficacia se debe analizar a través de modelos como los estudiados en el capítulo anterior, que representan con una aproximación adecuada el comportamiento teórico de un automóvil en un choque.

Del análisis del comportamiento de la estructura de los vehículos actuales resulta que en caso de sufrir impactos violentos dicho dispositivo no cumple con dos de las condiciones fundamentales de la seguridad: el habitáculo se deforma, y se producen choques de tipo elástico (o variaciones instantáneas de velocidad). El hecho que el habitáculo se deforma se puede comprobar en los millones de accidentes que ocurren anualmente, exponiendo a graves peligros a los automovilistas. En lo que hace a la estructura exterior, con el tipo de diseño actual no hay manera de evitar que, en un choque entre dos vehículos, por lo menos uno de los dos sea expuesto a un choque de tipo elástico o a un cambio instantáneo de velocidad. Por el otro lado, en los impactos contra objetos fijos, se producen choques de tipo elástico para todos los casos (salvo en los accidentes traseros) a velocidades mucho menores a las que fijan como límite las leyes.

Pasando a los dispositivos de sujeción, el cinturón de seguridad ha probado ser una de las causas principales de la disminución de la gravedad de los accidentes, a pesar de que su eficacia disminuye sensiblemente si el habitáculo es expuesto a un choque de tipo elástico. Si el vehículo sufre dicho tipo de choque o si disminuye abruptamente su velocidad expuesto a altas aceleraciones, las mismas situaciones se reproducen en el habitáculo. De esta manera, si el anclaje del cinturón de seguridad se desplaza hacia atrás, luego de que la estructura del auto rebota, el ocupante es igualmente arrastrado violentamente hacia atrás. O si el habitáculo es sometido a altos valores de aceleración, el cinturón frena al ocupante bajo las mismas condiciones (o en muchos casos bajo situaciones más perjudiciales todavía) resultando insuficiente para proteger adecuadamente a los automovilistas. Por otro lado en los casos en que la totalidad de la energía de movimiento no es absorbida se generan, además, aplastamientos en el habitáculo que, sumados a la penetración de objetos tanto internos como externos al espacio vital de los ocupantes, hacen que el airbag sólo proteja adecuadamente a los automovilistas en algunos impactos particulares, con ciertas condiciones especiales, en general en choques a bajas velocidades. Pero en definitiva, e inclusive en condiciones no del todo favorables, el cinturón de seguridad moderno, un dispositivo de sencillo funcionamiento y bajo costo, logra salvar innumerables muertes y heridas serias. La otra cara de esta situación es que el dispositivo actualmente en uso no es el más eficaz desarrollado hasta el momento (cinturón de cuatro o más puntos con pretensionador y limitador de carga). Al mismo tiempo, la mayoría de los automóviles son provistos con múltiples airbags, un dispositivo de costo mucho mayor, y de relativa baja eficacia al momento de evitar muertes o lesiones graves.

Por último, al ritmo de evolución actual de la seguridad de impacto, es probable que dentro una década todos los automóviles ensayados por el EuroNCAP alcancen las cinco estrellas de calificación máxima. Esto se puede comprobar en el siguiente gráfico donde se extrapolan los valores promedio de los vehículos ensayados hasta la actualidad:

gráfico 6.32



Del gráfico se puede deducir que aproximadamente en el año 2012 todos los vehículos van a ser seguros para los ocupantes en impactos frontales contra objetos fijos de hasta (sólo) 64 km/h.

Pero traducido a los impactos reales de hoy en día⁹⁰ esto implica que los ocupantes tendrán todavía entre un 50% y un 60% de probabilidades de recibir heridas serias o fatales en un accidente de tránsito, tal como se deduce de la tabla (6.13). Lo cual parece ser bastante pobre teniendo en cuenta que los automóviles modernos son el resultado no sólo de más de cien años de evolución sino también del esfuerzo tecnológico de decenas de miles de personas. Es decir, que todo parece indicar que parte de esos esfuerzos deben dirigirse a generar cambios de una magnitud importante, que logren mejores resultados que los previstos.

Reflexión

Existe una frase, atribuida a Francis Bacon, que dice:

"Quien no aplica remedios nuevos debe esperar males nuevos, porque el tiempo es el mayor innovador".

Por eso, y para que se entienda mejor lo que sigue es que vale la pena, antes de seguir, abrir un breve paréntesis para recordar un concepto de la gestión de empresas que se puede aplicar al caso de la seguridad en los automóviles, entre otros. Hace varios años que se implementan con éxito en las empresas algunas prácticas de gestión industrial encuadradas dentro de lo que se denomina "mejora continua de la calidad" y "reingeniería". Lo interesante de esto es la forma de determinar cuál de las dos prácticas usar en cada momento, ya que en teoría cualquier proceso es mejorable, tanto sea a través de una mejora continua, como a través del "barajar y dar de nuevo" que implica la reingeniería. Esa determinación se debe hacer en función de los recursos que la empresa debe invertir para lograr una mejora y del beneficio esperado. En el caso de un proceso poco eficiente, realizado por empleados carentes de motivación y sumidos en la rutina, es probable que con relativamente poco esfuerzo se logren mejores

⁹⁰ Todo parece indicar que para ese año los automóviles serán mucho más veloces y potentes que los actuales, por lo tanto es probable que los impactos futuros sean todavía más graves.

resultados y una rápida mejora de la eficacia y de la calidad. Pero luego del primer paso de la mejora continua, los avances en la eficacia y en la calidad serán más difíciles y demandarán mayores esfuerzos y recursos. A medida que se avance en el proceso, la relación recursos/beneficios será cada vez más alta. La empresa deberá asumir un costo mayor para recibir menores beneficios. En cierto momento no será conveniente mejorar más el proceso, ya que **los recursos que se deben invertir para lograr las mejoras superan los beneficios esperados**. Es justo ese momento el que marca del punto de inflexión. La organización debe tomar una decisión vital. Renovar por completo el proceso mediante una reingeniería del mismo, o abandonar el proceso de mejora continua de la calidad para concentrarse en un menos costoso proceso de aseguramiento de la calidad. Este último implica menores riesgos, y menores beneficios a largo plazo. En cambio el primero permite, a través de nuevas tecnologías, procesos, o escalas de producción, entre otros, lograr un salto cualitativo importante, bajo un riesgo también importante, y un retorno de la inversión de largo plazo.

Cerrando el paréntesis, y volviendo al tema de la Tesis, todo parece indicar que **desde hace más de cien años el automóvil se encuentra (en lo que respecta la seguridad en caso de accidentes) en un proceso de mejora continua**. En donde, además, el objetivo de eficacia en la protección a los automovilistas se modifica año tras año, ya que los vehículos evolucionan en velocidad y potencia, y los impactos se hacen cada vez más peligrosos. Así, los nuevos dispositivos de seguridad quedan obsoletos frente a las mayores energías que deben absorber o a las mayores desaceleraciones que deben contrarrestar. Esa es la razón por la **que la única manera de mejorar sensiblemente la seguridad de los ocupantes de un automóvil que sufren un accidente parece ser la reingeniería de su diseño**. Se debe desarrollar un nuevo concepto que analice desde un punto de vista integral la problemática de los accidentes de tránsito, partiendo desde la premisa que los ocupantes no deben ser expuestos a impactos directos, y al mismo tiempo no deben sufrir aceleraciones mayores a las tolerables ni variaciones instantáneas de velocidad, en accidentes que ocurran a velocidades equivalentes a las de circulación⁹¹. En los últimos años muchos fabricantes indican en sus folletos que sus automóviles están diseñados “**desde dentro hacia fuera**”, queriendo con esto transmitir a los potenciales compradores que el interior del automóvil se diseña antes que el resto. Para esto se estudia desde el punto de vista de la ergonomía el espacio de los ocupantes, buscando las dimensiones correctas, para luego definir el resto de los parámetros del vehículo en función del habitáculo. También aclaran que la gran diferencia con la vieja escuela de diseño es que con anterioridad a la introducción del concepto moderno, los ingenieros decidían el espacio necesario para ubicar los elementos mecánicos, y que luego se ocupaban de asignar de la mejor manera posible el espacio sobrante para los ocupantes. Así es que un Volkswagen Golf actual es mucho más cómodo para los ocupantes que su antecesor, el Volkswagen “Beetle” de mediados del siglo pasado, gozando de un espacio interior mucho mayor, sin haber modificado demasiado las dimensiones exteriores del vehículo. Este nuevo concepto es lo que puede considerarse una reingeniería del diseño. Olvidar el viejo concepto de la eficacia mecánica para privilegiar el espacio y el confort interior. Lo que se propone aquí es tomar ese concepto “desde dentro hacia fuera”, y hacerlo propio para la seguridad en caso de impacto, algo así como “**desde lo seguro hacia el resto**”.

⁹¹ Ver en este mismo capítulo la sección “Bases de la seguridad en accidentes” para un detalle mayor de las funciones que deben cumplir cada uno de los dispositivos de seguridad en caso de accidente.

6.8. Referencias del capítulo⁹²

- 1) *Traffic safety facts 2000*. (National Highway Traffic Safety Administration – U.S. Department of Transportation – 2002)
- 2) *Peligroso a cualquier velocidad*. Nader R. (Editorial Jorge Alvarez – 1966)
- 3) **Reconstruction of motor vehicle accidents, a technical compendium: Energy basis for collision severity*. Campbell K. (SAE PT-34)
- 4) *From test collisions to stiffness coefficients*. Neades J. (AITS)
- 5) *Crash injuries: how and why they happen*. Hyde A. (Hyde – 1992)
- 6) **Fatality reduction by airbags: analysis of accident data through early 1996*. Kahane C. (DOT Report HS 808 470 – National Highway Traffic Safety Administration – 1996)
- 7) **Air bag collision performance in a restrained occupant population*. German A., Dalmotas D., Hurley R. (Paper 98-S5-O-04 – 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles – 1998)
- 8) *Seat-belt injuries in medical and statistical perspectives*. Bandstra R., Meissner U., Warner C., Monaghan S., Mendelsohn R., MacPherson D. (Paper 98-S6-W-25 – 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles – 1998)
- 9) **Review of the air bag effectiveness in real life accidents demands for positioning and optimal deployment of air bag systems*. Otte D. (SAE Paper 952701)
- 10) *Effectiveness of ADR 69: a case-control study of crashed vehicles equipped with airbags*. Morris A., Barnes J., Fildes B., Bentivegna F., Seyer K. (Department of Transport and Regional Services – Australian Transport Safety Bureau – 2001)
- 11) *Association of driver air bags with driver fatality: a matched cohort study*. Cummings P., McKnight B., Rivara F., Grossman D. (BMJ: 24 – 2002)
- 12) *How does EuroNCAP results correlate to real life injury risks?: a paired comparison study of car-to-car crashes*. Lie A., Tingvall C. (IRCOBI conference – 2000)

⁹² Las referencias que comienzan con un asterisco corresponden a textos citados en la bibliografía consultada que no se han leído en su totalidad.

Segunda parte

Apenas un indicio

"– AC Cósmico – dijo el Hombre –, ¿cómo se puede revertir la entropía?

El AC Cósmico respondió: – Aún no hay datos suficientes para dar una respuesta significativa. –

– Reúne datos adicionales – ordenó el Hombre.

El AC Cósmico respondió: – Lo haré. Llevo cien mil millones de años haciéndolo. Esta pregunta se nos ha planteado muchas veces a mis predecesores y a mí. Todos los datos de que dispongo siguen siendo insuficientes. –

– ¿Llegará el momento en que habrá datos suficientes – preguntó el Hombre –, o el problema es insoluble en todas las circunstancias concebibles?

El AC Cósmico respondió: – Ningún problema es insoluble en todas las circunstancias concebibles. –".

Isaac Asimov, *La última pregunta* en la publicación *Science Fiction Quarterly* (1956)



7. Innovaciones factibles

"Entre Hog's Back y Hindhead existían lugares en donde ambos carriles estaban separados por menos de seis o siete kilómetros. Esa distancia era demasiado pequeña para los aviadores imprudentes – particularmente por la noche y luego de haber probado algo más de un gramo [de soma]. Habían ocurrido accidentes. De los serios. Se decidió desviar uno de los carriles unos cuantos kilómetros hacia el oeste. Entre Garyshott y Tongham cuatro faros aéreos abandonados trazaban la huella de la vieja ruta de Portsmouth a Londres. Los cielos sobre ellos permanecían silenciosos y desiertos. Ahora los helicópteros zumbaban y rugían sobre Selborne, Borden, y Farnham."

Aldous Huxley, *Un mundo feliz* (1932).

-
- **Innovaciones en la estructura exterior del automóvil**
 - **Innovaciones en el habitáculo del automóvil**
 - **Innovaciones en los dispositivos de sujeción del automóvil**
 - **Innovaciones en la estructura interior del automóvil**
 - **Diseño integrado (habitáculo/estructura exterior/sujeción)**

7.1. Introducción y resumen del capítulo

Es difícil cuestionar los mitos. Y mucho más difícil es si se trata del gran Dios Auto, uno de los objetos más amados por la sociedad moderna, que trasciende su función, brindando una sensación inigualable de libertad, individualidad y prosperidad.

Pero todo parece indicar que el automóvil, al mismo tiempo que se constituye en uno de los mitos modernos, presenta una serie de falencias, principalmente en lo que hace a la satisfacción de la necesidad de protección de parte de los ocupantes ante un eventual impacto. Todos los capítulos anteriores sirven de resumen que explica –exhaustivamente– las razones por las que se debe generar un cambio de paradigma, y las razones por las que los vehículos modernos no son capaces de disminuir la gravedad de los accidentes de tránsito, aspecto vital si se tiene en cuenta lo analizado en el capítulo 2: un escenario en donde los accidentes de tránsito serán pronto la tercer causa de muerte en el mundo.

Es por eso que se debe abandonar el viejo criterio de hacer seguro un automóvil exitoso, para cambiar por el más lógico criterio de convertir a un vehículo seguro en uno exitoso. Esta es la única manera de lograr que el auto proteja eficazmente a sus pasajeros. Pensar primero en la seguridad, y luego en el resto, sin olvidar que el vehículo tiene que ser posible de comercializar, pero dándole prioridad a la protección de sus ocupantes.

Y para eso sirve este capítulo, para comenzar a analizar las innovaciones factibles en la seguridad de impacto de un automóvil, partiendo de las bases de la seguridad estudiadas en el capítulo anterior, pero traducidas desde el concepto temporal anteriormente considerado, a una segmentación por grupo funcional. La siguiente tabla ordena los conceptos del capítulo anterior de manera de poder ser analizados de acuerdo a los distintos sectores del automóvil⁹³:

FUNCIONES PRINCIPALES DE LOS DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD DEL AUTOMÓVIL

habitáculo/ estructura interna	estructura externa/ dispositivos de sujeción	sistemas de gestión de información
a) Mantener la integridad estructural del espacio vital de los ocupantes. b) Evitar la penetración de objetos al espacio vital de los ocupantes. c) Evitar cualquier contacto con las superficies potencialmente peligrosas del interior del vehículo. d) Proteger a los ocupantes en caso de producirse un incendio. e) Permitir la rápida extracción de las víctimas para ser atendidas.	f) Absorber la totalidad de la energía de movimiento del vehículo y de los ocupantes (para evitar choques de tipo elástico o cambios instantáneos de velocidad), manteniendo la desaceleración en niveles tolerables.	g) Controlar el perfecto funcionamiento y uso de los dispositivos de seguridad. h) Establecer el riesgo potencial (básicamente a través de la velocidad de circulación) y ajustar la configuración del vehículo de acuerdo a cada circunstancia. i) Recoger y procesar la información necesaria para que actúen los dispositivos de protección durante el impacto. j) Dar aviso a los servicios de atención médica más cercanos.

tabla 7.1

⁹³ Las innovaciones en los sistemas de gestión de información no serán considerados en este trabajo, ya que el estado actual de la tecnología permite el desarrollo de estas funciones.

Resumen del capítulo

Las **innovaciones en la estructura exterior del automóvil** tienen como objetivo lograr que ésta pueda absorber la totalidad de la energía de movimiento del vehículo, manteniendo la desaceleración en niveles tolerables. La manera de lograrlo es a través de lo siguiente:

- aumento de la longitud del frente y de los costados (y disminución de la longitud trasera).
- establecimiento de áreas con coeficientes de rigidez diferenciados para el frente, los costados y la sección trasera.
- multiplicación de las áreas con coeficientes de rigidez diferenciados para mejorar la continuidad de la estructura.
- comportamiento homogéneo de la zona deformable (y por lo tanto desprovista de elementos mecánicos u objetos externos como el equipaje).
- variación del coeficiente de rigidez con la masa del vehículo.

En cuanto a las **innovaciones en el habitáculo del automóvil** se han propuesto de forma de lograr mantener la integridad estructural del espacio vital de los ocupantes, de evitar la penetración de objetos a dicho espacio, de proteger a los ocupantes en caso de producirse un incendio, y de permitir la rápida extracción de las víctimas para ser atendidas. Para ello se proponen las siguientes innovaciones:

- eliminación de la posibilidad de accionar los vidrios (incluyendo el techo corredizo) mientras el automóvil se encuentra en movimiento.
- habitáculo indeformable en impactos a altas velocidades (materiales más resistentes, estructura más resistente, forma elíptica).
- aumento de la resistencia a impactos de las superficies vidriadas (similar a la de los vidrios blindados, pero con una masa contenida).
- establecimiento de una barrera de protección contra un incendio del exterior del habitáculo que pueda dañar a los ocupantes.
- aseguramiento de una atmósfera respirable en el interior del habitáculo hasta el momento del rescate de las víctimas del accidente.
- aseguramiento de la posibilidad de extracción de los ocupantes a través de numerosas opciones, incluyendo no sólo las puertas sino todas las superficies vidriadas que se deben deslizar en el interior del habitáculo indeformable, accionando el mecanismo desde el interior o desde el exterior.

Por el lado de las **innovaciones en los dispositivos de sujeción del automóvil**, tienen como objetivo absorber la totalidad de la energía de movimiento de los ocupantes. Las mejoras planteadas consisten en:

- adaptación del interior del automóvil para asegurar la posición del ocupante que ofrezca la posición más segura.
- medición de parámetros para la actuación correcta de los dispositivos de sujeción.
- eliminación de la posibilidad de circulación si alguno de los ocupantes del vehículo no tiene colocado el cinturón de seguridad.

- aumento progresivo de la tensión del cinturón de seguridad con la velocidad de circulación.
- provisión obligatoria de apoyacabezas activos (similares a los de Saab) para todos los ocupantes del vehículo.
- provisión de cinturones de seguridad de 4 ó más puntos para todos los ocupantes.
- perfeccionamiento del pretensionador y del limitador de carga para que actúen de acuerdo a los parámetros medidos con anterioridad o durante el accidente.
- dispositivo inflable del tipo HANS adosado al cinturón de seguridad, que actúe sólo en caso de accidente.
- dispositivo de sujeción de las extremidades.

Las **innovaciones en la estructura interior del automóvil** están íntimamente ligadas a las del habitáculo. A los objetivos de proteger a los ocupantes en caso de incendio y de permitir la rápida extracción de los automovilistas se suma el evitar cualquier contacto con las superficies potencialmente peligrosas. Para satisfacer estos objetivos se propone:

- mecanismos de accionamiento electromagnéticos (totalmente colapsables, que se alejen de los ocupantes en el choque).
- amplio espacio entre los ocupantes y los objetos potencialmente peligrosos.
- airbags laterales en los vidrios (con una función ligeramente distinta, ya que deben cubrir toda la superficie en el menor tiempo posible)
- importante aumento de la capacidad de ofrecer superficies blandas en los puntos potenciales superficies de contacto (incluyendo el techo).
- eliminación de todo material combustible del interior del vehículo.

Por fin, al pensar en el **diseño integral (habitáculo/estructura exterior/sujeción)** se puede analizar la manera de satisfacer integralmente las necesidades básicas del automovilista, entre las que la seguridad y la protección del medio ambiente deben ocupar un lugar preponderante, agregando a las anteriores las siguientes innovaciones:

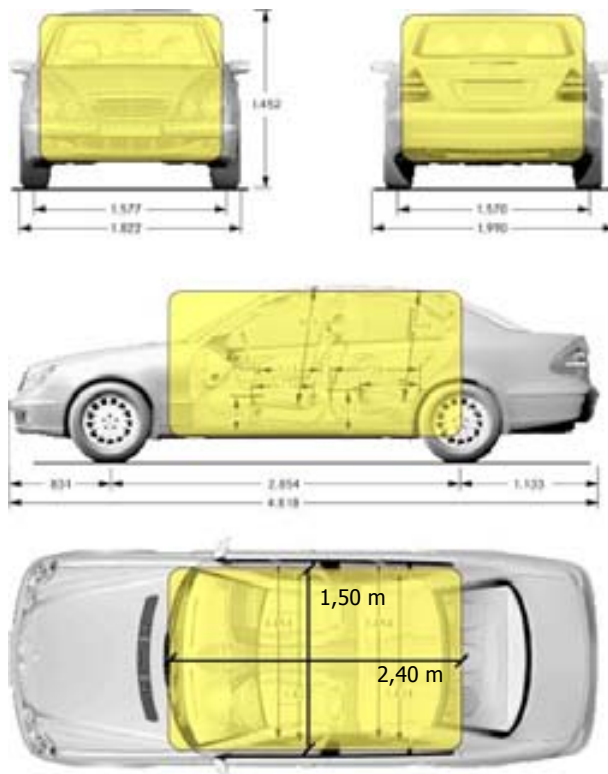
- estructura externa de forma elíptica, que rodea el habitáculo también elíptico.
- generación de potencia y transmisión a través de cuatro motores eléctricos, uno en cada rueda.
- fuente de energía debajo del habitáculo (centro de masa más bajo).
- ruedas de mayor diámetro (ofrece menor tendencia al vuelco y permite aumentar la altura del centro de masa sin perjudicar la estabilidad).
- frente de formas redondeadas (monovolumen) para minimizar los riesgos de aplastar a los peatones embestidos.
- parabrisas con capacidad de absorber parte de la energía cinética del impacto con el peatón (desplazándose hacia atrás).
- ajuste de la velocidad de circulación al lugar por donde se transita (a través de un sistema del tipo GPS).

7.2. Innovaciones en la estructura exterior del automóvil

Se debe tener en cuenta que las funciones de los principales dispositivos de protección de un automóvil expuestas en el capítulo anterior y en la introducción, si bien segmentadas de acuerdo al sector del vehículo, tienen una estrecha simbiosis. Como se dijo anteriormente, el hecho que la estructura exterior sea capaz de absorber la totalidad de la energía cinética de un accidente puede que convierta en innecesario el aumento de la rigidez del habitáculo⁹⁴. Por eso, antes de pasar a las innovaciones en el habitáculo, es conveniente empezar por la estructura exterior, que es la primera en sufrir las consecuencias del impacto, para luego seguir con el resto de los elementos del automóvil. Así, se puede recordar la función principal de la estructura exterior:

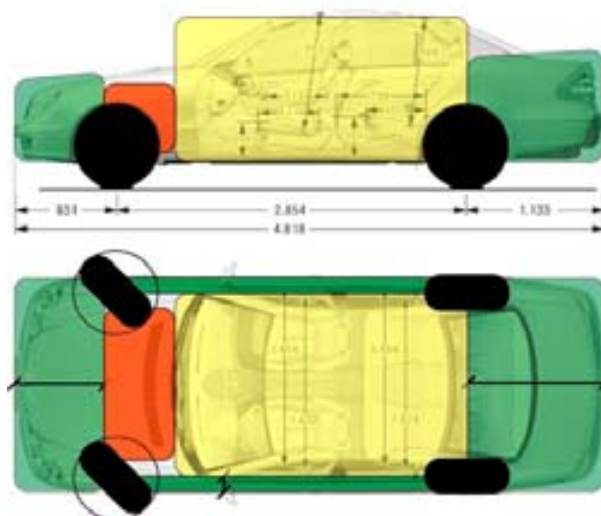
Absorber la totalidad de la energía de movimiento del vehículo (para evitar choques de tipo elástico o cambios instantáneos de velocidad), manteniendo la desaceleración en niveles tolerables.

Lo primero que se debe hacer es determinar con cierta precisión los límites entre el habitáculo y la estructura exterior, para poder hacer algunos análisis dimensionales sobre un automóvil concreto, de manera similar al estudio que se hizo en el capítulo anterior sobre el Saab 9-3. Sobre la base del tipo de información disponible se puede recurrir a un vehículo similar al Saab 9-3, un Mercedes-Benz clase E, empezando por separar el volumen que corresponde al habitáculo:

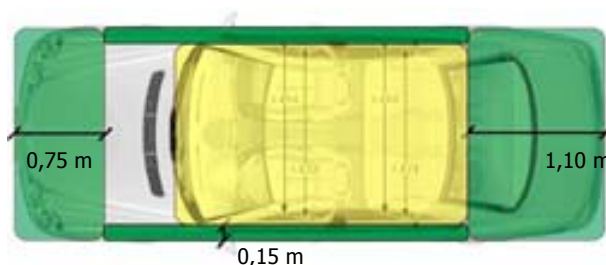


⁹⁴ En efecto, si toda la energía de movimiento previa al accidente es absorbida por las estructuras externas de los vehículos en colisión no queda energía mecánica capaz de deformar el habitáculo.

La figura anterior permite determinar las dimensiones aproximadas de la estructura exterior (indicada en color verde) considerando que el motor ocupa un espacio aproximadamente equivalente a la zona sombreada en rojo⁹⁵:



Se debe aclarar que las dimensiones obtenidas de la figura son una aproximación que tiene como objeto hacer algunos cálculos numéricos, pero que pueden no corresponderse con las dimensiones exactas de la estructura externa parcialmente deformable del vehículo tomado como modelo. Además, para simplificar el análisis, se puede considerar sólo la vista superior del automóvil, para tomar las dimensiones longitudinales y transversales, que surgen por medición de la figura:



Como se puede observar este esquema simplificado resulta similar al que se consideró para el caso del Saab 9-3 (la longitud del frente es la misma). Pero hay una consideración adicional que se debe hacer. Como se demostró en el capítulo anterior, los impactos entre vehículos que circulan en la misma dirección y sentidos contrarios involucran tanto choques de tipo elásticos como variaciones instantáneas de velocidad, y para evitar ese suceso peligroso se debe utilizar otro tipo de estructura, que actúe de manera distinta a la forma en que lo hace un sistema de resortes inelásticos y masas. Por eso, y debido a las limitaciones prácticas de este trabajo, **las innovaciones a la estructura externa de un vehículo moderno que se analizan aquí se refieren exclusivamente a los impactos contra objetos fijos**. Las innovaciones factibles para choques entre múltiples vehículos requieren herramientas mucho más sofisticadas y análisis empíricos que exceden el alcance de esta Tesis, y por lo tanto la única mención al respecto se encuentra recién al final, como un pequeño indicio de la dirección

⁹⁵ El motor no está colocado exactamente en el lugar del dibujo, pero se considera de esa manera para simplificar el análisis de la zona frontal.

hacia donde se podrían dirigir los esfuerzos para encontrar una solución al problema más grave y frecuente de los accidentes de tránsito que, una vez más, no se puede satisfacer con el tipo de estructura actual.

Absorción de la energía de movimiento en impactos contra objetos fijos

Como fue anticipado, para absorber eficazmente la energía de movimiento de un accidente de tránsito (de manera de proteger adecuadamente a los ocupantes de los vehículos) es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- que no exista variación instantánea de velocidad (choque elástico en el caso de impactos contra objetos fijos)
- que la aceleración a la que se somete al habitáculo se mantenga por debajo de cierta magnitud por un tiempo limitado.

Y para poder cumplir estos objetivos se debe recurrir a los dos parámetros que definen el movimiento armónico de un sistema de resortes y masas en movimiento, la frecuencia angular (ω) y la longitud del resorte. En lo que respecta a la manera de evitar choques de tipo elástico se debe recordar que esto sólo puede hacerse a través de asegurar que dicha longitud sea mayor que la amplitud del movimiento armónico. Por otro lado, de la ecuación (10.16) se deduce que ω depende del coeficiente de rigidez de la carrocería y de la masa del vehículo. Así, existen tres parámetros del vehículo que se pueden modificar para evitar que ocurran choques de tipo elástico:

- la masa del vehículo.
- el coeficiente de rigidez de la carrocería.
- la longitud entre el borde de la carrocería y el sector indeformable.

Por ahora se va a dejar de lado la posibilidad de modificar la masa, para retomar el tema más adelante. Otro aspecto de relieve es que, de acuerdo a lo explicado en el capítulo anterior, se debe dimensionar la estructura exterior para que proteja a los ocupantes del vehículo en impactos frontales de hasta 130 km/h, y en impactos laterales o traseros de hasta 80 km/h. Adicionalmente, se puede considerar que toda la estructura exterior de un automóvil moderno tiene un coeficiente de rigidez similar al estimado para el Saab 9-3, que depende sólo de la masa, y que toma un valor de $K \cong 1.225.000$ N/m. Por último, se considera que el habitáculo es indeformable, aspecto que va a ser tratado en la próxima sección, pero que es condición necesaria para todas las deducciones que siguen. Así, y a manera de resumen de lo analizado en el capítulo anterior, se puede observar que un automóvil actual presenta las siguientes velocidades límites para impactos en el caso en que se quiera evitar un choque elástico:

tabla 7.2

sector	largo [m]	K [N/m]	velocidad límite para choque elástico [km/h]
frontal	0,75	1.225.000	77
lateral	0,15	1.225.000	15
trasero	1,10	1.225.000	112

Todas las velocidades del cuadro resultan inferiores a las velocidades límite establecidas, salvo en el caso del sector trasero. Por eso, lo primero que puede evaluarse es la

posibilidad de aumentar la longitud de los resortes de cada una de las estructuras de los vehículos modernos –lo cual implica alargarlos y ensancharlos– hasta lograr que dicha longitud sea mayor que la amplitud teórica de los respectivos movimientos armónicos. Dado que hay dos velocidades límite (130 km/h y 80 km/h), de la ecuación (10.18) se obtienen las dos amplitudes correspondientes:

- para 130 km/h ($\cong 36,1$ m/s) $\rightarrow \bar{A} = \frac{1}{\sqrt{\frac{K}{m}}} \cdot \bar{v}_o = \frac{1}{\sqrt{\frac{1.225.000 \text{ N/m}}{1.500 \text{ kg}}}} \cdot 36,1 \text{ m/s} = 1,26 \text{ m}$

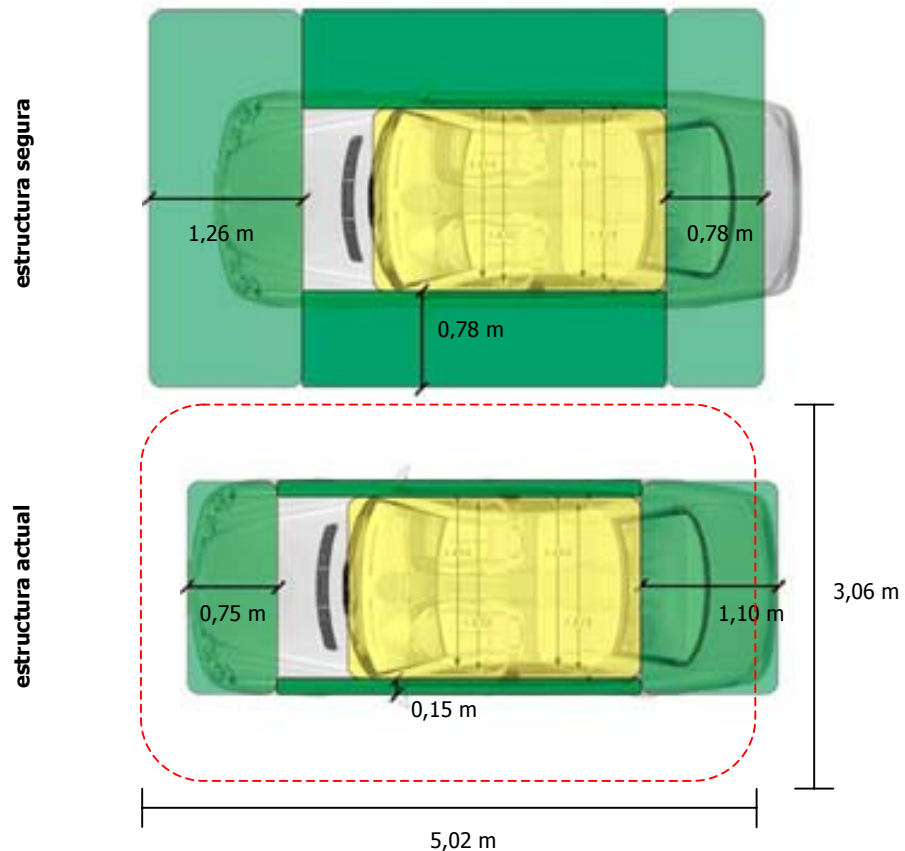
- para 80 km/h ($\cong 22,2$ m/s) $\rightarrow \bar{A} = \frac{1}{\sqrt{\frac{K}{m}}} \cdot \bar{v}_o = \frac{1}{\sqrt{\frac{1.225.000 \text{ N/m}}{1.500 \text{ kg}}}} \cdot 22,2 \text{ m/s} = 0,78 \text{ m}$

Es decir, que si se mantiene la rigidez de la carrocería actual, las longitudes de las estructuras frontal, lateral y trasera deberían ser:

tabla 7.3

sector	K [N/m]	largo actual [m]	largo seguro [m]
frontal	1.225.000	0,75	1,26
lateral	1.225.000	0,15	0,78
trasero	1.225.000	1,10	0,78

Eso evitaría que ocurrieran choques de tipo elástico en cualquiera de los tres tipos de impactos, pero supone modificar la estructura de un automóvil moderno hasta llevarla a las siguientes dimensiones:



Sin embargo, un vehículo de las dimensiones recién expuestas no podría circular por las calles y autopistas actuales. Si bien el largo no parece resultar un inconveniente⁹⁶, el ancho del vehículo capaz de evitar choques elásticos en impactos laterales es prácticamente el doble que el de uno actual. Es por eso que se debe buscar una solución alternativa. El otro parámetro que afecta la amplitud del movimiento armónico es el coeficiente de rigidez, y se puede considerar que la situación es la inversa, es decir que la nueva condición de borde consiste en mantener las dimensiones actuales de la estructura, adaptando la rigidez de cada sector del vehículo para que no se produzcan choques de tipo elástico. Para los cálculos hace falta una ecuación, que a su vez se deduce de las ecuaciones (10.16) y (10.17):

$$\bar{A} = \frac{\bar{v}_o}{\omega} = \frac{\bar{v}_o}{\sqrt{\frac{K}{m}}} \Rightarrow \bar{A} = \frac{\bar{v}_o}{\sqrt{\frac{K}{m}}} \Rightarrow \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{\bar{v}_o}{\bar{A}} \Rightarrow$$

$$K = \left(\frac{\bar{v}_o}{\bar{A}} \right)^2 \cdot m \quad (7.1)$$

Como ejemplo se puede calcular el coeficiente de seguridad necesario para que una estructura frontal de largo 0,75 metros pueda absorber la totalidad de la energía cinética de una masa de 1.500 kg. que se desplaza a una velocidad original de 130 km/h:

$$K = \left(\frac{\bar{v}_o}{\bar{A}} \right)^2 \cdot m = \left(\frac{36,1 \text{ m/s}}{0,75 \text{ m}} \right)^2 \cdot 1500 \text{ kg} \cong 3.475.000 \text{ N/m}$$

Repitiendo el mismo cálculo para los otros dos sectores se puede obtener la siguiente tabla:

tabla 7.4

sector	largo actual [m]	K actual [N/m]	K seguro [N/m]
frontal	0,75	1.225.000	3.475.000
lateral	0,15	1.225.000	32.925.000
trasero	1,10	1.225.000	625.000

Esto, en definitiva, implica mantener las dimensiones externas de un automóvil moderno, haciendo más rígido el frente, aumentando sensiblemente la rigidez del costado, y disminuyendo la del sector trasero. Pero para corroborar si la nueva estructura es capaz de proteger adecuadamente a los ocupantes se debe evaluar la aceleración media y el tiempo de acción al que es sometido el habitáculo, de manera de saber si se generan aceleraciones potencialmente peligrosas. Para la aceleración media se puede utilizar la siguiente ecuación, deducida a partir de las ecuaciones (10.22) y (10.23):

$$|a_{media}| = \frac{2}{\pi} \max a = \frac{2}{\pi} v_o \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} \Rightarrow |a_{media}| = \frac{2}{\pi} v_o \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (7.2)$$

Tomando nuevamente como ejemplo el caso del impacto frontal, la aceleración media que ejerce un resorte inelástico de coeficiente $K=3.475.000 \text{ N/m}$ y de largo 0,75 m sobre una masa de 1.500 kg. que se desplaza a 130 km/h es:

⁹⁶ Hay vehículos como el Maybach 62 que superan los seis metros.

$$|a_{media}| = \frac{2}{\pi} \cdot 36,1 \text{ m/s} \cdot \sqrt{\frac{3.475.000 \text{ N/m}}{1.500 \text{ kg}}} \cong 1.107 \text{ m/s}^2 \cong 113 \text{ g}$$

Para determinar el tiempo de acción de dicha aceleración se puede deducir otra fórmula más, esta vez a partir de las ecuaciones (10.16) y escribiendo el tiempo en función de la frecuencia angular:

$$t = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{K}{m}}} \Rightarrow t = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{K}{m}}} \quad (7.3)$$

Para el mismo ejemplo anterior, los valores son:

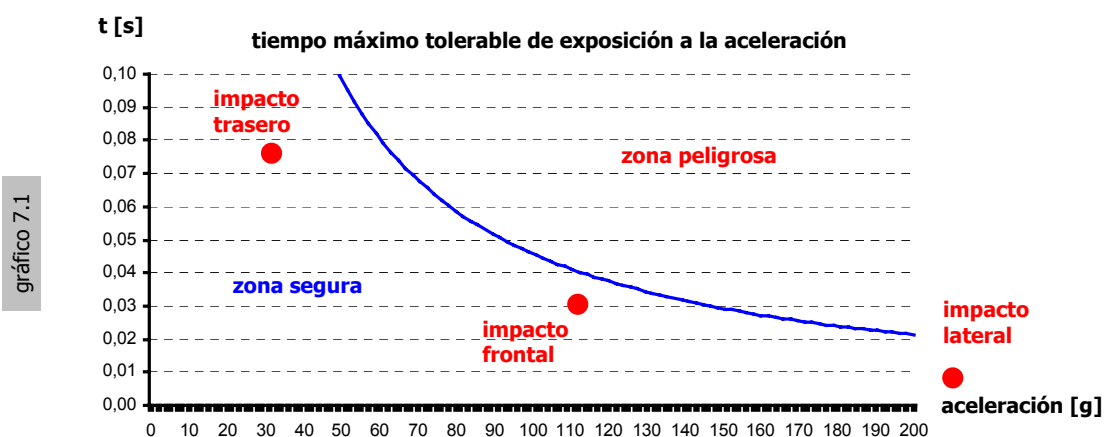
$$t = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{K}{m}}} = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{3.475.000 \text{ N/m}}{1.500 \text{ kg}}}} \cong 0,033 \text{ s}$$

Extendiendo los mismos cálculos al resto de los sectores, los valores de aceleración media y tiempo de acción para impactos frontales, laterales y traseros son los que siguen:

tabla 7.4

sector	largo [m]	K [N/m]	a media [g]	t [s]
frontal (impactos hasta 130 km/h)	0,75	3.475.000	113	0,033
lateral (impactos hasta 80 km/h)	0,15	32.925.000	214	0,011
trasero (impactos hasta 80 km/h)	1,10	625.000	29	0,078

Queda entonces por verificar una aspecto adicional, y es si los valores de la tabla resultan peligrosos para el cuerpo humano. Una simplificación adicional que se debe hacer para poder usar el gráfico de aceleración tolerable en función del tiempo es que los ocupantes son sometidos a la misma aceleración que el habitáculo⁹⁷. Así se pueden colocar los valores de la tabla en el gráfico (5.9) de resistencia a la aceleración:



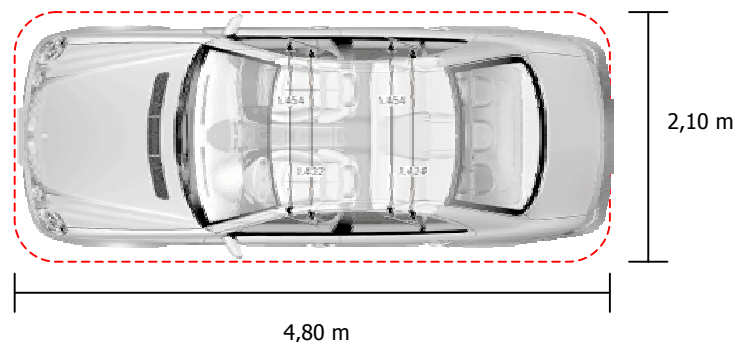
Como se puede observar, los tres sectores de la estructura externa someten al habitáculo a aceleraciones que en teoría no deberían dañar al cuerpo humano, si bien los 113 g y 214 g de valor absoluto de los impactos frontales y laterales parecen ser fe-

⁹⁷ Esto es teóricamente posible, siempre y cuando los automovilistas sean eficientemente sujetos desde el comienzo del impacto por medio de un pretensionador del cinturón de seguridad, y que éste no permita desplazamientos relativos. En lo que respecta a esta sección voy a considerar esta situación "ideal".

nómenos potencialmente peligrosos. Además, se debe tener en cuenta que existe mucha diferencia entre los tres tipos de impactos, aspecto que tiene que ver con las distintas longitudes de cada uno de los sectores y que puede ser mejorado. En otras palabras, la estructura actual de un automóvil moderno se puede modificar, manteniendo sus dimensiones actuales, de manera de aumentar o disminuir la rigidez de cada uno de los sectores indicados, lográndose con esto evitar que ocurran choques de tipo elástico en accidentes frontales de hasta 130 km/h y laterales o traseros de hasta 80 km/h, y ofreciendo además las siguientes oportunidades de mejora:

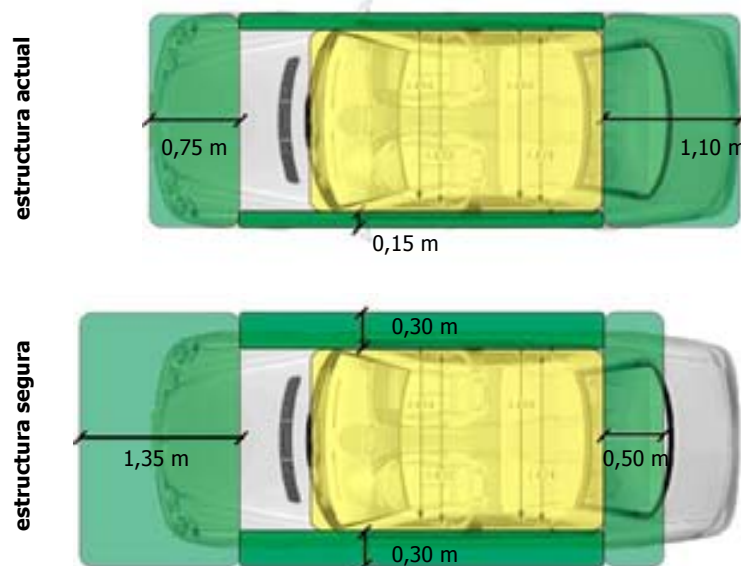
- a) la estructura delantera es mucho más corta que la trasera, cuando los accidentes frontales ocurren a mucha mayor velocidad y son mucho más peligrosos.
- b) la estructura lateral tiene una longitud muy limitada, y para evitar choques de tipo elástico debe exponer al habitáculo a aceleraciones mayores a 200 g.
- c) la estructura trasera expone al habitáculo a aceleraciones de valor absoluto mucho menores que la de los otros dos sectores.

Por lo tanto, se puede pasar a la tercer alternativa de diseño, que consiste en modificar, simultáneamente, la longitud del resorte inelástico y la frecuencia angular del sistema. Y la manera de empezar es a través de la definición de las dimensiones máximas que podría tener un vehículo para circular por la estructura vial moderna. De las consideraciones recién hechas surge que el ancho del automóvil presenta el doble problema de ser demasiado angosto para generar aceleraciones de bajo valor absoluto en el caso de impactos laterales, pero al mismo tiempo debe estar limitado al ancho de las calles o de los carriles de las autopistas. Manteniendo un criterio de prudencia, se puede establecer un ancho máximo de 2,10 metros, que corresponde al ancho de algunos automóviles grandes (el Volkswagen Touareg tiene un ancho de 2,22 metros, y un camión llega casi a los 2,50 metros). Por otro lado, y debido al aumento del ancho del vehículo con respecto al que se está considerando como modelo, no es conveniente modificar el largo (para no aumentar demasiado la masa del vehículo), manteniendo en consecuencia unas dimensiones similares a las del Mercedes-Benz clase E:



El próximo paso consiste en definir los largos de cada uno de los sectores, donde el del sector lateral es de fácil resolución, ya que surge de ampliar la estructura hasta el ancho máximo del vehículo, lo cual supone llevar el valor de dicha estructura de los 0,15 metros actuales a 0,30 metros. Para los sectores frontal y trasero, la decisión resulta ser algo más complicada, ya que el largo total debe permanecer sin variación. Sin embargo, se acaba de decir que **el frente del automóvil actual tiene una longitud menor al sector trasero, cuando se puede comprobar que debería ser justamente al revés**. Considerando un criterio (arbitrario) que establece que ambas es-

estructuras deben someter al habitáculo a aceleraciones medias nominales de valor similar⁹⁸, los cálculos indican que el frente debería modificarse desde los 0,75 metros actuales de longitud hasta los 1,35 metros, y que el sector trasero puede reducirse hasta los 0,50 metros. Así definidos, los tres sectores del automóvil propuesto se pueden observar en el siguiente dibujo, junto con la estructura actual para poder compararlos:



Usando la ecuación (7.1) hace poco desarrollada se pueden calcular los valores de los coeficientes de rigidez adecuados para evitar choques de tipo elástico, para una estructura de las dimensiones recién indicadas. Así se pueden comparar en la siguiente tabla los valores del vehículo actual con los del propuesto:

tabla 7.6

sector	largo actual [m]	K actual [N/m]	largo seguro [m]	K seguro [N/m]
frontal	0,75	1.225.000	1,35	1.075.000
lateral	0,15	1.225.000	0,30	8.215.000
trasero	1,10	1.225.000	0,50	2.950.000

De esta manera se ha logrado modificar los dos parámetros fundamentales que definen el movimiento armónico (la longitud del resorte y la frecuencia angular⁹⁹) para cumplir con la condición de que la estructura no someta al habitáculo a cambios de velocidad instantáneos. Falta por otro lado corroborar que la aceleración sea poco perjudicial, repitiendo los cálculos de las ecuaciones (7.2) y (7.3) que arrojan como valores los que se detallan en la siguiente tabla:

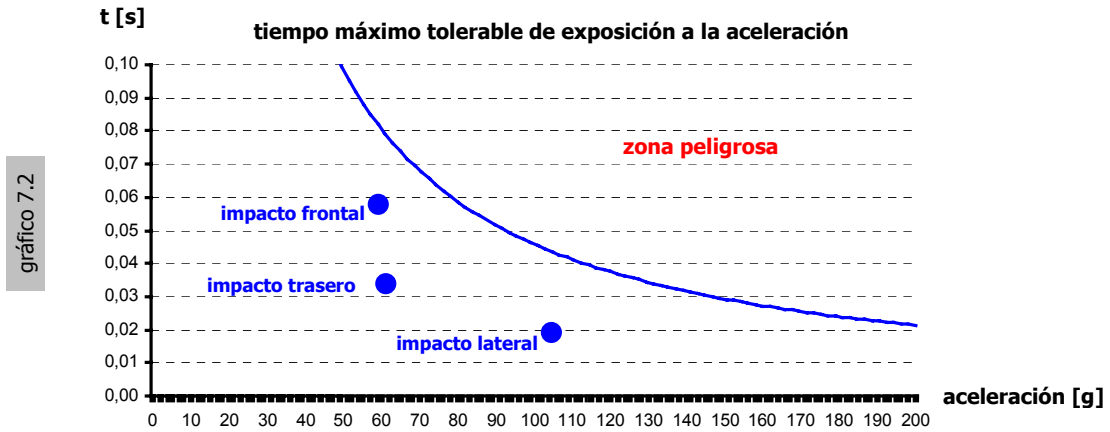
tabla 7.7

sector	largo [m]	K [N/m]	a media [g]	t [s]
frontal (impactos hasta 130 km/h)	1,35	1.075.000	63	0,059
lateral (impactos hasta 80 km/h)	0,39	8.215.000	108	0,021
trasero (impactos hasta 80 km/h)	0,50	2.950.000	64	0,035

⁹⁸ Más adelante en esta misma sección se encuentran los valores calculados que determinaron las nuevas longitudes de los sectores frontal y traseros.

⁹⁹ Suponiendo que la masa de ambos vehículos es la misma, el hecho de variar el coeficiente de rigidez hace que se modifique la frecuencia angular.

Los puntos obtenidos en las dos últimas columnas se pueden volcar nuevamente en el gráfico (5.9) para comprobar si los valores de aceleración media resultan potencialmente peligrosos:



Los valores de esta tercer alternativa parecen ser menos peligrosos¹⁰⁰ que los anteriores del gráfico (7.1). Los impactos frontales y laterales tienen un valor absoluto cercano a los 60 g¹⁰¹, y la aceleración media de un impacto lateral a 80 km/h es sensiblemente inferior a los 214 g de la alternativa precedente. Repasando entonces la propuesta que surge de las tres alternativas analizadas, la nueva estructura es, desde el punto de vista dimensional:

- más ancha que la actual (ofreciendo aproximadamente el doble de longitud transversal de material parcialmente deformable que un vehículo moderno).
- igual de larga que la actual, pero con una estructura frontal más larga que la estructura trasera, en consonancia con los riesgos relativos.

La modificación en sentido transversal se puede ver en los siguientes esquemas:

estructura actual



estructura propuesta

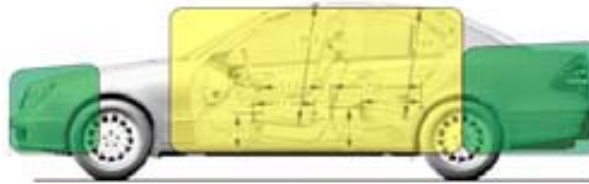


¹⁰⁰ Es importante destacar que el gráfico fue construido a partir de información incompleta, y que por ello fue necesario tomar un importante coeficiente de seguridad (tolerancia a la aceleración cinco veces menor a la indicada en la bibliografía consultada).

¹⁰¹ Valor límite utilizado en algunas programas de ensayo como el EuroNCAP (1).

Por otro lado, la principal modificación en la estructura exterior (la transferencia de longitudes) se puede esquematizar como sigue:

estructura actual



estructura propuesta



En realidad esta última modificación surge sólo de la aplicación del sentido común. Si los accidentes delanteros son mucho más peligrosos que los accidentes traseros, no parece lógico que la longitud de la estructura exterior trasera sea mayor que la de la delantera. Así es que cuando en la década de los '70 Volvo desarrolló el vehículo conceptual VESC para explorar los futuros dispositivos de seguridad una de las características salientes era un paragolpes delantero que se extendía 20 ó 30 centímetros hacia delante del borde de la carrocería.



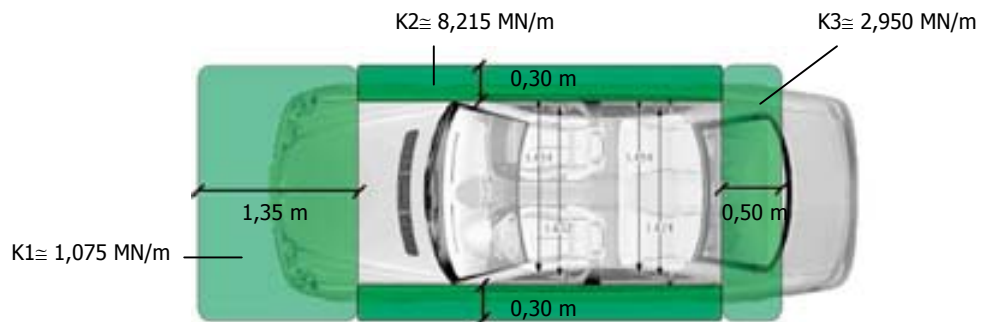
La imagen muestra el pronunciado paragolpes delantero del VESC. Además, esta misma característica se repetía en el paragolpes trasero, dando una señal acerca de la importancia de mantener la mayor distancia posible entre el habitáculo y el punto de impacto.

Esa notable característica señalaba precisamente la necesidad de alejar lo más posible el primer punto del impacto del habitáculo, si bien desde el punto de vista estético la solución no parecía ser la mejor.

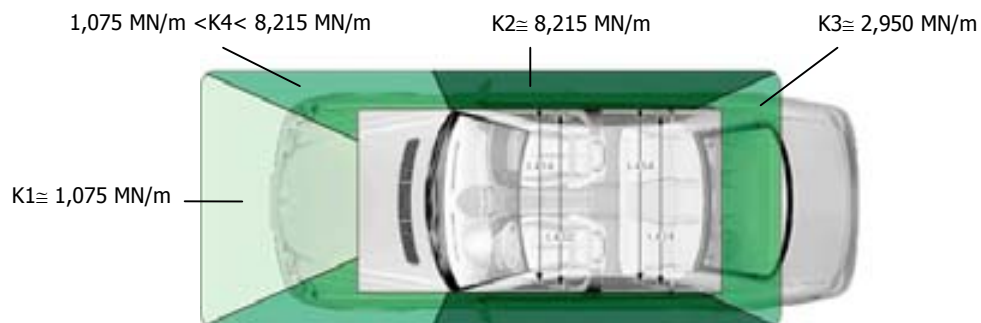
Pasando a la segunda innovación de la estructura, desde el punto de vista de su rigidez consiste en:

- disminuir ligeramente la rigidez del frente.
- aumentar sensiblemente la rigidez del sector lateral.
- aumentar la rigidez del sector trasero.

Así se llega a la próxima propuesta, aclarando antes que si bien lo cierto es que más allá de que (por motivos de simplificación) hasta ahora se ha hablado de impactos frontales, laterales o traseros, en realidad **los choques ocurren en sentidos que no siempre están alineados con los ejes longitudinal o transversal del auto**. Con lo cual, es de utilidad pensar en que el automóvil no debería contar solamente con cuatro estructuras resistentes, sino con algunas más que permita ofrecer una mayor continuidad. Por eso si bien hasta ahora se propuso el siguiente tipo de estructura:



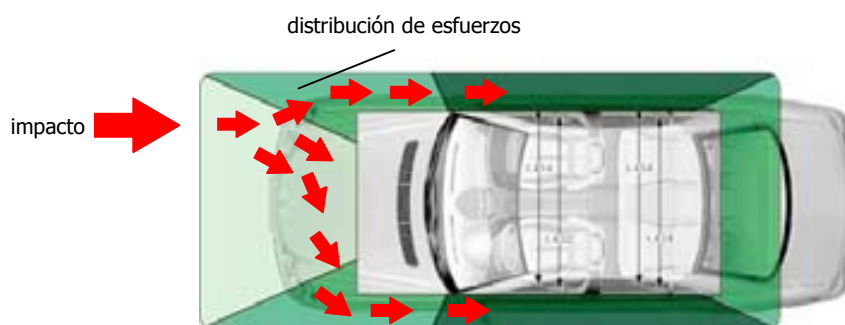
Lo ideal sería diseñar un tipo de estructura que tenga secciones que vayan variando su coeficiente de rigidez de acuerdo a un esquema de tipo radial¹⁰²:



A esto se suma el otro concepto de continuidad que merece ser tenido en cuenta, y que consiste en lo siguiente. La única función de la estructura exterior en lo que hace a la protección de los ocupantes ante un impacto consiste en absorber la totalidad de la energía cinética del vehículo. Esto debe hacerse en cualquier condición de circulación, asegurando que no existan elementos extraños que modifiquen el coeficiente de rigidez ideal. Esto último puede parecer un comentario menor, pero no lo es. Porque implica la necesidad de mantener dicha estructura libre de objetos que entran y salen, que se desplazan, que ocu-

¹⁰² En el dibujo hay seis zonas, pero este tal vez no sea el número ideal de particiones, sino que se deben hacer los ensayos empíricos correspondientes para determinarlo.

pan alternadamente un espacio u otro. O sea, que la estructura exterior parcialmente deformable no debe contener al motor, no debe cumplir la función de baúl (porque la introducción de objetos de rigidez desconocida introducen una incertidumbre en el comportamiento de la estructura ante un impacto), ni estar asociada a ninguna otra función que no sea la de absorber lo más eficientemente posible la energía del impacto. De esta manera, en combinación con la propuesta de aumentar la cantidad de secciones de la estructura deformable, se lograría que no exista una estructura frontal, otra lateral y otra trasera, sino zonas con una progresiva variación de rigidez (que se podría denominar "continuidad progresiva"). De esta manera, la estructura del automóvil podría ofrecer una absorción eficaz de la energía cinética del impacto, oponiéndose a los esfuerzos provenientes de cada sentido a través de la rigidez más adecuada y permitiendo, además, una mejor distribución de la deformación, que dejaría menos expuesto al habitáculo:



El último aspecto a considerar en las innovaciones de la estructura exterior consiste en la necesidad de adaptar el coeficiente de rigidez a las condiciones de marcha del automóvil. Este es el momento de retomar el tema de la variación de masa, que al comienzo de la sección se propuso dejar para más adelante. Porque los cálculos hechos hasta ahora suponían una masa constante, de unos 1.500 kg. que corresponden a la masa del vehículo tomado como modelo, en vacío, es decir sin ocupantes ni equipaje. Y al tener en cuenta un automóvil en orden de marcha la situación cambia, porque la masa del mismo vehículo deja de ser constante. Así, por ejemplo, se puede considerar al Volkswagen Golf 1.4 16V 3 puertas en dos situaciones distintas: por un lado circulando con el conductor solo, y por el otro circulando con 5 personas a bordo (para lo cual está homologado) y una masa adicional de 80 kg. en equipaje. En estas circunstancias los coeficientes de rigidez teóricos calculados de acuerdo a la metodología introducida en esta sección varían notablemente, como se puede apreciar en el siguiente cuadro:

tabla 7.8

condición del vehículo	masa [kg.]	K frontal [N/m]	K lateral [N/m]	K trasero [N/m]
un solo pasajero	1.160	830.000	6.350.000	2.300.000
cinco pasajeros más equipaje	1.540	1.100.000	8.450.000	3.050.000
diferencia	+33%	+33%	+33%	+33%

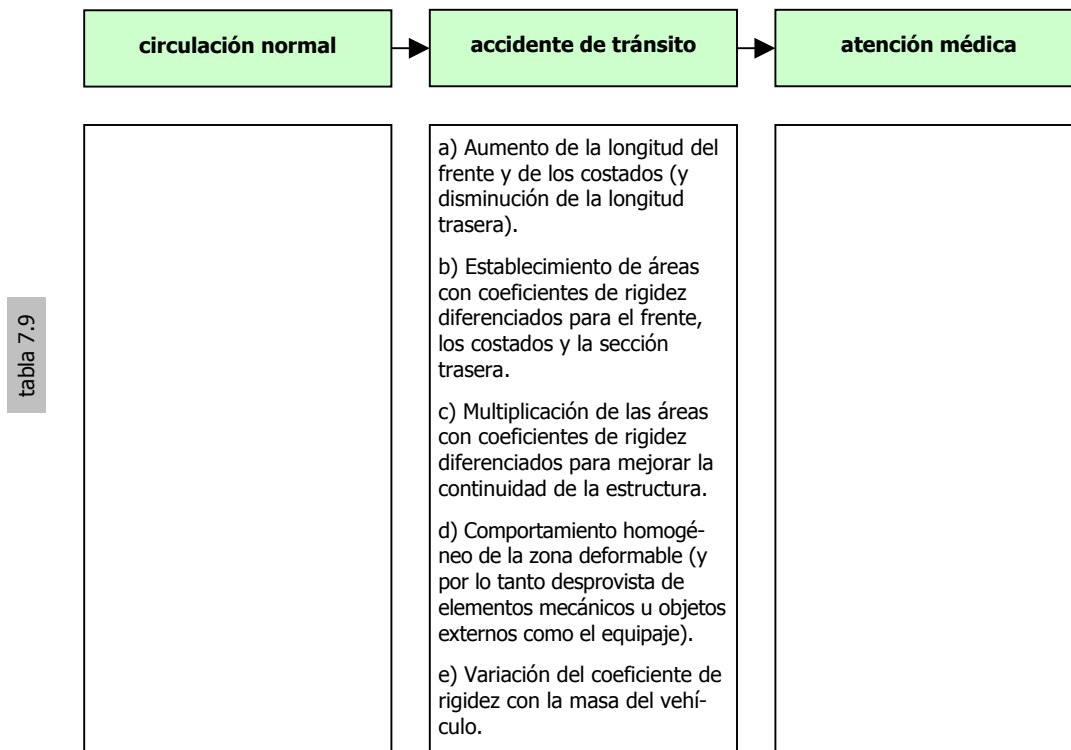
Es decir, que un mismo automóvil que impacta con un solo pasajero a bordo o con cinco pasajeros más equipaje se puede considerar que supone dos situaciones completamente distintas, como si se tratara de **dos vehículos distintos**¹⁰³. En lo que hace

¹⁰³ En el capítulo anterior se citaron las consideraciones de la NHTSA acerca de que los resultados de los ensayos sólo se pueden comparar entre vehículos de masa similar. La diferencia máxima de masa que establece dicho organismo para poder compararlos es de unos 150 kg., o sea que los impactos en ambas condiciones de circulación deberían considerarse dos sucesos absolutamente distintos, y que requieren estructuras completamente diferentes.

a los aspectos analizados en esta sección, el automóvil con cinco pasajeros y equipaje va a tener una amplitud teórica del movimiento armónico mayor que la del más liviano. Así, si el coeficiente de rigidez se dimensiona de acuerdo al que transporta sólo uno, el más pesado va a sufrir un choque de tipo elástico para los impactos cercanos a la velocidad máxima del cálculo. Si en cambio el coeficiente se calcula para la condición de mayor masa, cuando el auto impacte con un solo pasajero a bordo, el habitáculo va a ser sometido a una aceleración máxima mayor a la considerada como límite. Es decir, que no es conveniente encontrar una solución de compromiso (por ejemplo calculando el coeficiente de rigidez de acuerdo a la masa promedio del auto en orden de marcha) sino simplemente **ajustar el coeficiente de rigidez a la masa del vehículo, para cada una de las distintas condiciones de circulación**. Pero se debe aclarar un punto importante. Hace poco se propuso eliminar los objetos que puedan afectar el coeficiente de rigidez de la estructura para que ésta no sufriera modificaciones en su coeficiente de rigidez. Y ahora se propone adaptarlo a la masa del vehículo para cada condición de circulación. Pero existe una gran diferencia entre modificar el coeficiente de rigidez a través de una acción controlada (y deseada) y la modificación de dicho coeficiente a través de la intrusión caótica de objetos contra la cual se opuso el requisito de que la estructura no tuviera discontinuidades. En otras palabras, se debe encontrar la manera de modificar la rigidez de la estructura exterior, aumentándola conforme lo hace la masa total del vehículo. La manera exacta de hacerlo escapa a las incumbencias de este trabajo, si bien se puede deducir que desde el punto de vista tecnológico la posibilidad existe.

Síntesis de las innovaciones en la estructura exterior

El siguiente cuadro resume lo indicado hasta el momento:



En definitiva, las innovaciones propuestas permitirían mejorar la seguridad en impactos contra objetos fijos, sobre todo en el caso de impactos frontales o laterales, donde los vehículos actuales tienen una menor eficiencia. Quedan por solucionar los aspectos de la estructura exterior que permitirían disminuir el peligro potencial de los impactos entre dos vehículos, tema sobre el cual, como se dijo, se hará un breve comentario recién al final del trabajo.

7.3. Innovaciones en el habitáculo del automóvil

Para empezar a analizar las innovaciones del habitáculo se pueden recordar las funciones principales de los dispositivos de seguridad agrupados en él:

Mantener la integridad estructural del espacio vital de los ocupantes.

Evitar la penetración de objetos al espacio vital de los ocupantes.

Proteger a los ocupantes en caso de producirse un incendio.

Permitir la rápida extracción de las víctimas para ser atendidas.

Antes de seguir es muy importante resaltar que la indeformabilidad del habitáculo durante el impacto no es un requerimiento caprichoso, sino que es consecuencia de que, en el caso de impactos entre dos vehículos, parte de la energía cinética del accidente no puede ser absorbida por las estructuras exteriores de ambos vehículos, como se indicó recientemente. Por lo tanto, si el habitáculo no fuera indeformable, esa energía cinética no absorbida tendría la capacidad de deformarlo, aplastando a los ocupantes y condenándolos a lesiones serias o fatales. De todas maneras tampoco hay que olvidar que la condición de indeformabilidad del habitáculo protege a los ocupantes de posibles aplastamientos, pero los somete a choques de tipo elástico, que es un suceso potencialmente peligroso. Pero de acuerdo a lo analizado en el capítulo 5, el criterio adoptado en este trabajo es el que establece que es preferible generar un choque de tipo elástico en el habitáculo, antes que permitir su deformación hasta el punto de que partes de la carrocería impacten el cuerpo de los automovilistas. Para terminar, el hecho de que el habitáculo sea indeformable protege a los ocupantes en el caso de impactos contra objetos fijos a velocidades mayores a las tomadas como referencia en la sección anterior para dimensionar la estructura externa¹⁰⁴.

Mantenimiento de la integridad estructural del habitáculo

Existen maneras sencillas de dar más rigidez estructural al habitáculo: basta con aumentar el espesor de los materiales que lo conforman, utilizar materiales de mayor resistencia, o agregarle refuerzos. De hecho en las competencias automovilísticas el habitáculo del piloto se refuerza hasta el punto de ser capaz de resistir impactos a velocidades mucho mayores que las que alcanza el vehículo. Se pueden dejar de lado las estructuras que se diseñan exclusivamente en función de un vehículo de carreras (como en el caso de la Fórmula 1) y analizar lo que sucede con la carrocería de un vehículo de Rally, que utiliza como base la estructura de un automóvil de serie. En estos casos se agrega a la estructura del vehículo una cierta cantidad de barras de acero soldadas. Este proceso en donde se aumenta la rigidez del habitáculo mediante la soldadura de barras de acero es **un ejemplo más de la deficiencia estructural del au-**

¹⁰⁴ 130 km/h en impactos frontales, 80 km/h en impactos laterales o traseros.

tomóvil de serie para resistir los impactos. Y, al mismo tiempo, la jaula de protección de los ocupantes de un auto de Rally es un buen argumento para rebatir la opinión de aquellos que indican que un auto rígido es peligroso para los ocupantes por las altas aceleraciones que genera. Sobre todo teniendo en cuenta que los impactos en una competencia de Rally suelen ser mucho más violentos que aquellos de los automóviles de serie. Sin tener en cuenta aquellas opiniones, los diseñadores y expertos en seguridad coinciden en indicar que **lo más conveniente para proteger a los ocupantes en caso de accidente es aumentar la rigidez del habitáculo.** Dejan la función de absorber la energía del impacto a la estructura exterior, y construyen un habitáculo absolutamente indeformable, para proteger el espacio vital de los ocupantes.



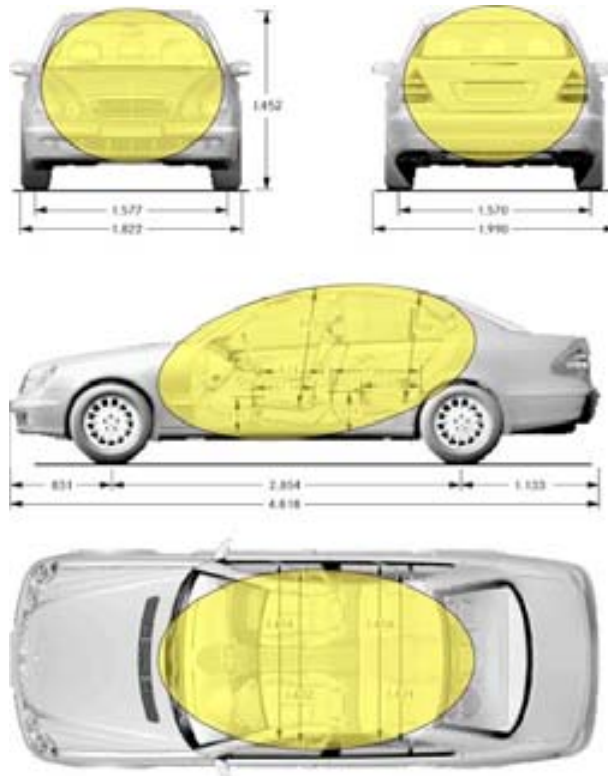
En esta foto de una de las fases de preparación de un Peugeot 206 WRC para carreras de Rally se observa claramente la multitud de refuerzos que se añaden a la estructura original para aumentar considerablemente su resistencia a los impactos.

Pero por más eficientes que resulten los refuerzos tubulares lo cierto es que no es posible pensar en usarlos en los automóviles de producción en serie, ya que la posición que ocupan dificulta enormemente el acceso de los automovilistas al habitáculo, y restringe, además, seriamente el espacio interior. Por eso se debe pensar en aumentar la resistencia del habitáculo a través de otros métodos. Las tres características siguientes son aquellas que se pueden modificar del habitáculo para hacerlo más rígido:

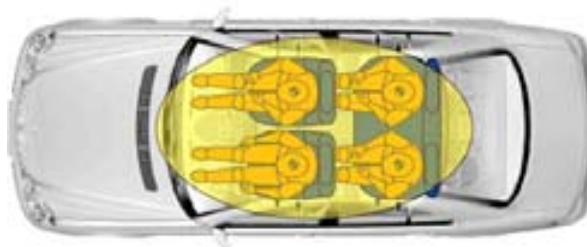
- la forma del habitáculo
- el tipo de componentes estructurales (chapas, tubos, perfiles, etc.)
- los materiales de los componentes estructurales (acero, aluminio, etc.)
- el espesor de los componentes estructurales

No es el objetivo de esta sección extender demasiado el estudio de este aspecto y lo que sigue es apenas una serie de indicaciones sobre la manera de aumentar la rigidez del habitáculo. En cuanto a la forma, es necesario recurrir a la Naturaleza para recordar que el tipo de estructura más resistente es la esfera, seguida de cerca por las es-

estructuras de tipo elipsoidal. Dicha forma es la que ofrece mejor resistencia en todos los sentidos y al mismo tiempo requiere de menos cantidad de material, ya que los bordes de las estructuras rectangulares concentran esfuerzos y hacen necesarios componentes estructurales adicionales que aumentan la masa del conjunto. Así, la primer innovación en el habitáculo consiste en modificar su forma para llevarla a una similar a la siguiente:



Sin embargo, la forma elipsoidal del habitáculo restringe en parte el espacio de los ocupantes con lo cual, para ubicar en él cuatro automovilistas, se debe alargar unos centímetros el habitáculo (el ancho máximo está restringido a los 2,10 metros establecidos anteriormente y no hay posibilidad de modificarlo). El inconveniente de la forma se percibe sobre todo en la vista superior, donde queda claro que parte del espacio que ocupan las piernas de los pasajeros delanteros queda limitada por la curva de la elipse. Pero si se disminuye la distancia lateral entre los asientos se pueden colocar a los pasajeros de la siguiente manera¹⁰⁵:

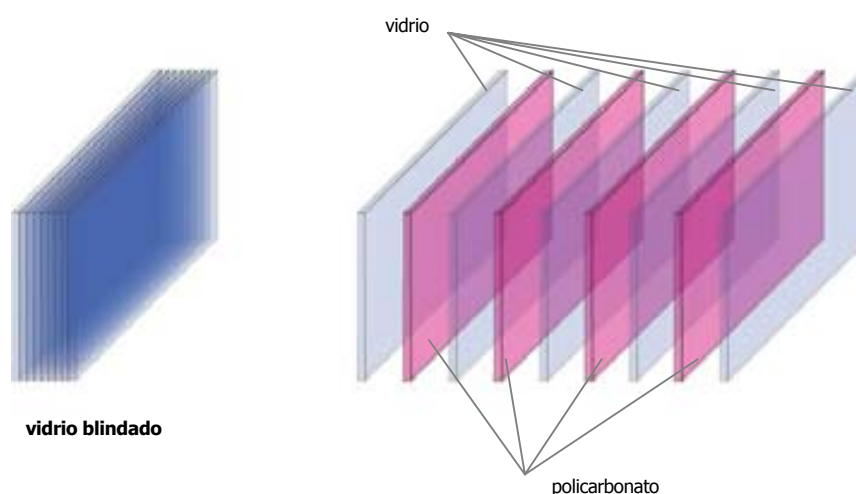


¹⁰⁵ Esto hace que el habitáculo homologado para cinco personas pueda albergar sólo a cuatro.

De todas maneras el dibujo intenta dar sólo una idea aproximada de las dimensiones, que deberán controlarse y analizarse a través de los métodos ergonómicos usados en la actualidad para diseñar el habitáculo. Resuelta entonces la forma, quedan tres puntos más a resolver en lo que respecta el aumento de resistencia del habitáculo. Y que consisten en el tipo de elementos estructurales, los materiales, y las dimensiones de aquellos, y que exceden como tantos otros elementos analizados la incumbencia del trabajo. La solución definitiva a los requerimientos aquí planteados debe llegar a través de los trabajos realizados en un laboratorio, realizando innumerable cantidad de ensayos empíricos y análisis económicos con una multitud de datos e índices de los cuales se puede disponer a través de otros medios. Por lo tanto, **para lo que queda de la Tesis se va a asumir que el habitáculo se comporta como un elemento indeformable, por lo menos a las velocidades de impacto consideradas** (130 km/h en impactos frontales y 80 km/h en el resto) y se va a pasar al segundo aspecto del habitáculo que se relaciona fuertemente con lo que se acaba de analizar, y que tiene que ver con la posibilidad de que objetos ajenos al vehículo impacten contra los ocupantes.

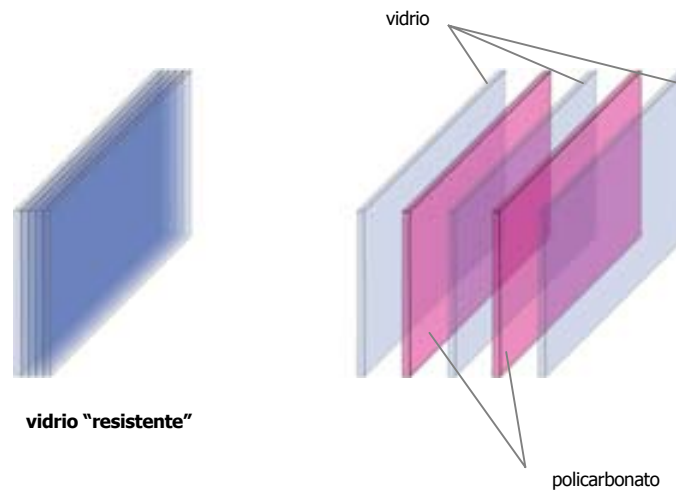
Aumento de la resistencia a la penetración de objetos

Como se ha dicho, la preservación del espacio vital de los ocupantes no se limita a la indeformabilidad del habitáculo. Se ha comprobado que las superficies vidriadas actuales, hechas a partir de vidrio laminado (parabrisas) o templado (ventanillas) ofrecen una resistencia mecánica insuficiente frente al impacto de objetos externos. Casi en el otro extremo se encuentran los vidrios del tipo blindado, preparados para resistir inclusive un disparo de un arma desde una corta distancia. Estos otros tipos de compuestos están formados por múltiples capas de vidrio y de policarbonato. El número de capas depende del tipo de protección deseado, y puede variar desde siete (cuatro de vidrio y tres de policarbonato) a más de once (seis de vidrio y cinco de policarbonato):

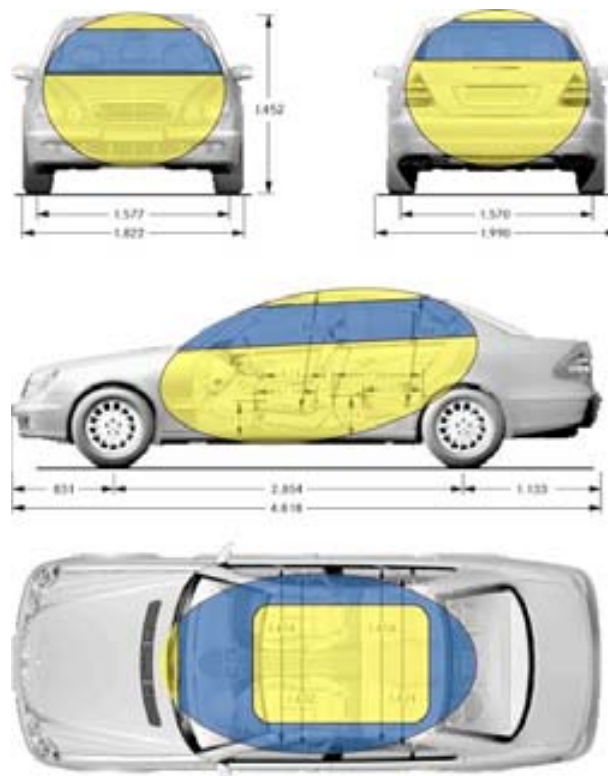


El problema de este tipo de vidrios blindados es que tienen una masa considerable, que no sólo suman peso al vehículo por su peso mismo, sino por los refuerzos que se deben hacer en la estructura para albergarlos. Además, si se trata de accidentes de tránsito, es difícil que existan fenómenos similares a los que genera una bala que impacta contra un vidrio, por eso parece que sería suficiente dotar a los automóviles de

vidrios que tengan un material plástico más resistente que el PVB (por ejemplo el policarbonato) pero que no tenga tantas capas como el vidrio blindado. Un compuesto posible sería el siguiente:



Lo importante a tener en cuenta es que **todos los vidrios del vehículo que completan la estructura denominada "habitáculo" deben ser del tipo propuesto**, (o uno similar que conserve la propiedad de evitar que objetos penetren en el espacio vital de los automovilistas). También es importante que el compuesto desarrollado tenga una masa específica contenida, no muy superior a la de los vidrios actuales, para no generar un aumento de masa del vehículo. Con unos vidrios de estas características, el habitáculo indeformable propuesto se completa de la siguiente manera (en amarillo las zonas de metal, en azul las zonas vidriadas):



Así **se obtiene un espacio que protege a los ocupantes de cualquier intrusión o aplastamiento, y al mismo tiempo permite una visibilidad adecuada.** De todas maneras queda un aspecto más a resolver.

De nada sirve diseñar un tipo de estructura a prueba de intrusiones si finalmente en el momento justo las ventanillas se encuentran bajas, y los ocupantes son expuestos a un impacto directo. Esta es una de las decisiones más difíciles de tomar, porque atenta contra un montón de sensaciones placenteras que los automovilistas buscan, pero lo cierto es que no se debe permitir circular con las ventanillas abiertas, que **se deben cerrar automáticamente apenas el vehículo comienza a moverse.**



Si bien no es la manera más segura de circular, viajar con el viento agitando el rostro es una de las que da mayor placer.

En realidad, si se hace un análisis minucioso de las costumbres modernas de los automovilistas, sobre todo en los países desarrollados, se puede observar que existen otros factores que fuerzan a los conductores a circular con las ventanillas cerradas. Desde conflictos con la propia seguridad (temor a hurtos en las esquinas, etc.) hasta las cuestiones climáticas (en verano se usa el aire acondicionado y en invierno la calefacción) y que obligan a muchos a viajar en las condiciones que se proponen. Con lo cual lo que al principio puede parecer un inconveniente molesto es probable que con el tiempo no genere disconformidades. Así, en definitiva, se llega a una verdadera “célula de protección” que evita tanto el aplastamiento de los ocupantes, como que cualquier objeto externo los dañe (en cualquier circunstancia) **eliminando de plano los impactos directos a los automovilistas**¹⁰⁶. Sin embargo, y siguiendo con la secuencia temporal del accidente, el peligro todavía no se neutralizó por completo, ya que todavía falta evitar que los ocupantes sufran las consecuencias del posible incendio que podría seguir al impacto.

Protección de los ocupantes en caso de incendio

Siguiendo con la sinergia que debe existir entre los distintos sistemas de seguridad es de vital importancia que una vez que se logró asegurar el espacio vital de los ocupantes a través de las modificaciones analizadas al habitáculo se establezca **algún tipo de barrera que proteja a las víctimas del accidente en caso de que se produzca un incendio.** Y aquí se debe tener en cuenta que el incendio puede tener origen en otro vehículo, y que por lo tanto se trata de un evento que puede estar fuera del control del propio automóvil. Por más que se diseñe un auto que no contenga materiales combustibles (ni aquellos que son la fuente de potencia del motor ni los que conforman algunas de los elementos del interior) existe una cierta posibilidad de que el vehículo se vea atrapado –con los ocupantes en su interior– dentro de un fuego generado por circunstancias ajenas. Por eso se habla de “barrera”. Esto supone **aislar a dicho habitáculo del exterior para que, ante la eventualidad de un incendio, los ocupantes estén protegidos.** Esa aislación se puede proveer mediante materiales ya desarrollados, como los que se utilizan en las carreras automovilísticas para proteger a los pilotos.

¹⁰⁶ Que fueron señalados como el principal peligro de los accidentes de tránsito (Ver capítulo 5).

De todas maneras, el uso de estos materiales (como el "Nomex" de Dupont) debe hacerse teniendo en cuenta que existen dos importantes diferencias entre los distintos tipos de accidentes. Por un lado, en los accidentes viales no se cuenta con un equipo de asistentes estratégicamente colocados como para llegar al lugar del accidente en menos de 45 segundos como ocurre en la Fórmula 1 por ejemplo. O sea, que la protección debe estar diseñada para actuar mientras dure el fuego¹⁰⁷. Pero por el otro lado, la gran ventaja de oponer una barrera al fuego que se desata en el exterior de una célula indeformable y sin fisuras que permitan el ingreso de objetos, es que el calor afecta a los ocupantes de manera indirecta, a través de la estructura resistente de metal y vidrio. En consecuencia, lo que hay que lograr es que la temperatura del interior del habitáculo permanezca en niveles tolerables durante el tiempo que dure el fuego. Que, una vez más, puede resultar ser una variable de magnitud incierta.



Gerhard Berger sobrevivió sin consecuencias graves al incendio posterior a su tremendo impacto en Imola gracias al buzo antiflama.



Existen materiales que permiten resistir el fuego directo durante varios segundos sin afectar a la persona que se está protegiendo.

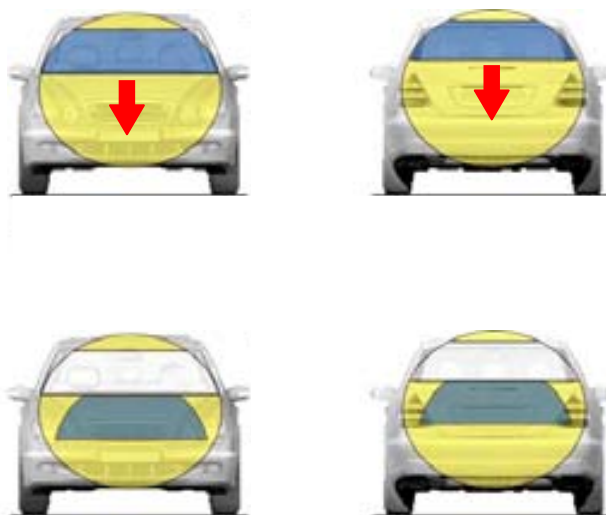
Es decir, no es necesario obligar a los automovilistas a circular con casco y buzo antiflama, sino que basta con "vestir" al habitáculo con Nomex u otro material resistente al fuego. Pero no todo termina ahí. Todo lo se está proponiendo para el habitáculo, inclusive en los dos aspectos anteriores, se basa en el concepto de encerrar a los ocupantes en una célula protectora hasta que pase el peligro. Esto se debe a que no siempre es posible evitar que sucesos imprevistos afecten a los ocupantes. Por lo tanto es preferible mantenerlos en un estado de máxima protección hasta que puedan salir de su caparazón (por medios propios o con ayuda de terceros). Bajo este precepto, el vehículo debe estar preparado para ofrecer la mejor protección posible en caso de incendios, a través de la barrera citada anteriormente, y a través de asegurar las condiciones vitales del habitáculo. Y esto significa **que el aire sea respirable, durante el tiempo en que el incendio no permite extraer a las víctimas**. O sea, que se debe asegurar que no entren gases de combustión del exterior al interior del vehículo (principalmente monóxido y dióxido de carbono) y que los niveles de oxígeno del interior permitan la supervivencia del total de los ocupantes durante el tiempo que dure el incendio. Nada de lo que se está proponiendo es una empresa fácil de realizar. Pero, una vez más, el propósito en este trabajo es **pensar en las innovaciones posibles, considerando el mínimo posible de restricciones, y dejando las soluciones finales para la investigación en los laboratorios adecuados**. En consecuencia, todo parece indicar que la tecnología actual permite desarrollar un sistema que genere que el habitáculo pueda resistir temperaturas exteriores extremadamente altas durante un tiempo prolongado, aislando también el aire del interior de los gases nocivos de la combustión, suministrando al mismo tiempo el oxígeno necesario para que los automovilistas puedan seguir respirando hasta salir del vehículo. La manera de lograr el objetivo excede esta investigación, y probablemente aporte menos beneficios econó-

¹⁰⁷ Según el tipo de incendio, y teniendo en cuenta que hay materiales que una vez que se encienden el fuego que generan es difícil de extinguir (como el caucho de los neumáticos, por ejemplo), el fuego puede durar decenas de minutos.

micos que los deseables, si bien, como todo lo propuesto aquí, sería extremadamente beneficiosas para proteger a las víctimas de los accidentes viales.

Extracción rápida de los ocupantes del habitáculo

El problema que genera el concepto de “caparazón” protector es que, una vez que el peligro pasa, se debe estar en condiciones de auxiliar rápidamente a los ocupantes, y que **las mismas características de inviolabilidad que protegieron a los automovilistas durante el accidente atentan contra su extracción una vez que dicho accidente termina**. En la actualidad la débil protección que ofrecen las ventanillas laterales también permite extraer a las víctimas en caso de que la carrocería se haya deformado de tal manera que no se puedan abrir las puertas. Pero anteriormente se propuso aumentar la resistencia de todas las superficies vidriadas, con lo cual eso ya no es posible. Y de acuerdo a lo que se analizó con respecto a la estructura exterior, el hecho de que se deforme como si fuera una estructura integral que rodea el habitáculo indeformable puede generar movimientos de material que impidan la apertura de las puertas del habitáculo. Por lo tanto, se debe aprovechar el único espacio que queda libre de toda obstrucción o deformación: las superficies vidriadas, pero bajo un concepto totalmente distinto al de la actualidad. Es que las superficies vidriadas permanecen por encima de la línea de impacto en la mayoría de los choques, y ofrecen casi siempre un flanco libre para poder extraer a las víctimas del accidente. A lo que se suma la ventaja de contar con una estructura indeformable que permite deslizarse dentro de la misma a las ventanillas¹⁰⁸. Y además la situación se puede replicar con el parabrisas y la luneta trasera (hoy completamente fijas) que ofrecerían una amplia superficie para sacar con facilidad a los ocupantes:



También sería conveniente que todas las superficies vidriadas estén diseñadas de manera de poder bajar simplemente por acción de su propio peso, con sólo accionar el mecanismo de emergencia (que permitiría esta acción solamente cuando ocurre un ac-

¹⁰⁸ En la actualidad esto no sería posible, en muchos casos porque la puerta queda deformada trabando el descenso del vidrio.

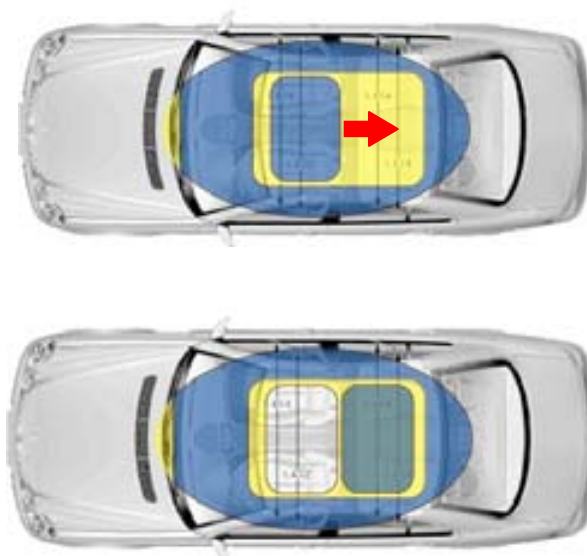
cidente). Además, el mecanismo de apertura debería estar en varios lugares del interior, como para que cada ocupante pueda accionarlo, e inclusive en varios lugares del exterior del vehículo, para que las personas que auxilian a las víctimas puedan abrir el habitáculo desde afuera¹⁰⁹. Por último, se puede sumar una última superficie vidriada de la cual no se habló todavía: el techo corredizo. Que en el contexto de este trabajo se va a considerar que se mantiene fijo (lo cual parece una contradicción) salvo cuando es necesario usarlo, o sea exclusivamente cuando se deben sacar a los ocupantes del vehículo luego del accidente. Casualmente existe una tendencia en el diseño de los nuevos vehículos que consiste en la eliminación del techo corredizo y su reemplazo por una superficie de vidrio que cubre todo el techo.

Como se dijo antes esto responde a un mayor uso de parte de los automovilistas de la climatización del auto y, al mismo tiempo, a la fascinación que genera la visión del paisaje que rodea al vehículo. Lo peligroso de esto es que se trata de vidrios laminados de baja seguridad en caso de accidente, y por lo tanto es preciso reemplazar dichos vidrios por otros de mayor resistencia como los propuestos en esta misma sección, además de reducir su tamaño.



El techo de un Peugeot 307 SW, hecho completamente en vidrio, permite apreciar el paisaje al costo de una menor seguridad.

Así se llega a un techo fijo de vidrio que se puede correr en caso de sufrir un accidente de manera similar a la propuesta para el resto de las superficies vidriadas. En definitiva, en el siguiente esquema se puede observar la última de las aberturas propuestas para extraer a los ocupantes luego del accidente, y que completa un abanico de opciones para que los automovilistas puedan ser atendidos con rapidez:



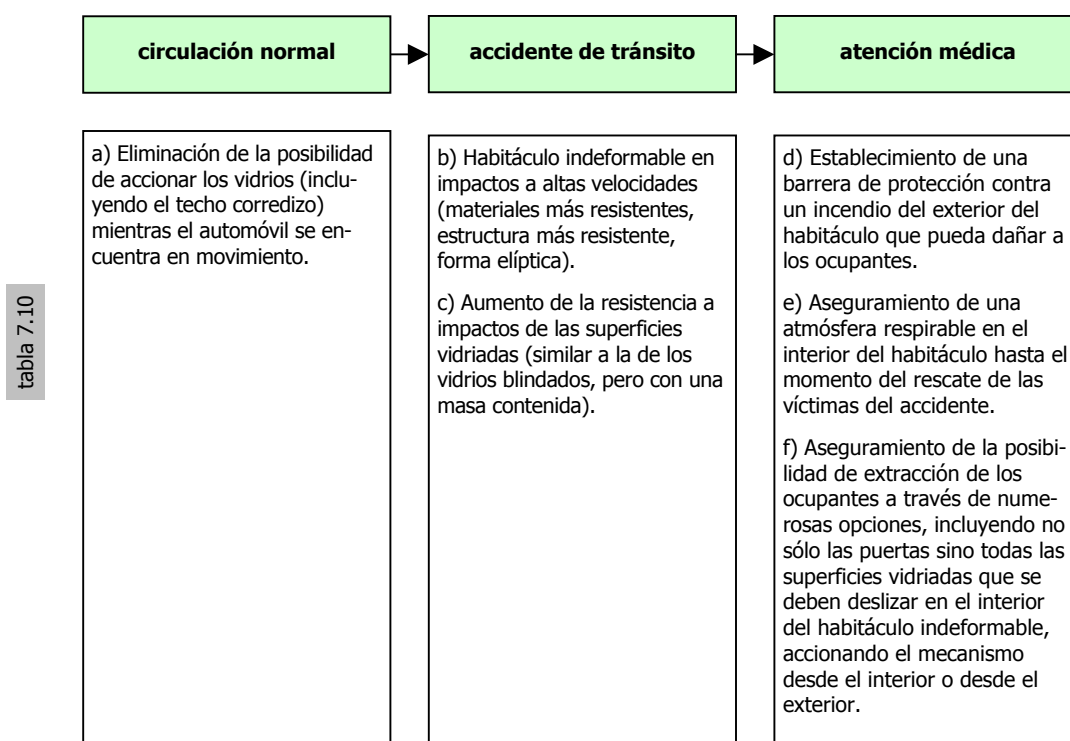
Es momento entonces de resumir los conceptos de esta última sección. La forma propuesta de extraer con relativa facilidad y de manera veloz a los ocupantes es a través

¹⁰⁹ Esto implica algunos riesgos que tienen que ver con la posibilidad que a través de este mecanismo se pueda ingresar al automóvil para robar, por eso los mecanismos de apertura exterior deberían activarse sólo en caso de accidente.

de la combinación de asegurar la indeformabilidad del habitáculo, sumado a la posibilidad de abrir varias “puertas” de salida a través de la carrocería, función que deben cumplir todas las superficies vidriadas del vehículo, deslizándose en el interior de la carrocería indeformable, con la posibilidad de accionar la apertura desde el interior del auto, o desde afuera en caso de ser necesario. Desde ya que esta situación es la de mayor deformación exterior (choques más violentos) porque en el caso de los impactos a bajas velocidades basta con abrir las puertas del habitáculo indeformable que no han sido bloqueadas por la deformación de la estructura exterior o por la superposición del vehículo con otros autos u objetos fijos.

Síntesis de las innovaciones en el habitáculo

Como en el caso de las innovaciones propuestas para la estructura exterior, todo lo indicado para el habitáculo se limita a la solución a la que se podría llegar, sin exponer la manera específica en que se debe hacerlo. Ya se ha dicho anteriormente que para poder diseñar los muchos dispositivos necesarios para lograr estas innovaciones se deben utilizar herramientas y recursos de los cuales se carece. En definitiva, los conceptos vertidos anteriormente se resumen en este cuadro:



Se debe notar que, a diferencia de las innovaciones de la estructura exterior –que se limitan a mejorar la seguridad de los impactos contra objetos fijos–, lo importante es que **todas estas innovaciones mejoran la seguridad de cualquier tipo de impacto, incluyendo también los vuelcos e incendios.**

7.4. Innovaciones en los dispositivos de sujeción del automóvil

Una vez más se puede comenzar recordando, desde el capítulo anterior, las funciones de los dispositivos de seguridad del automóvil, en este caso en lo que respecta a los dispositivos de sujeción:

Absorber la totalidad de la energía de movimiento de los ocupantes (para evitar choques de tipo elástico o cambios instantáneos de velocidad), manteniendo la desaceleración en niveles tolerables.

Aquí cobra una importancia capital la estrecha simbiosis que existe entre los distintos dispositivos del automóvil en caso de accidente (y de la cual ya se habló). Es que **es prácticamente imposible que los dispositivos de sujeción aseguren que no existan cambios instantáneos de velocidad de parte de los ocupantes si al mismo tiempo el habitáculo está sufriendo otro cambio instantáneo de velocidad como el que ocurre en un choque de tipo elástico**. La máxima eficacia de los dispositivos de sujeción se alcanza, entonces, cuando no existen choques de tipo elástico, por lo tanto en lo que hace a este capítulo, el análisis consiste en estudiar la forma de mejorar la capacidad de los dispositivos de sujeción al momento de proteger a los ocupantes de un vehículo en colisión, con la restricción de que **lo que sigue es particularmente útil cuando el vehículo no sufre los tipos de choques citados anteriormente**. Además, a diferencia de las innovaciones introducidas en el caso de la estructura exterior o el habitáculo, las de los dispositivos de sujeción se limitan a pequeñas modificaciones del elemento de seguridad más eficaz introducido en las últimas décadas en el automóvil: el cinturón de seguridad de tres puntos.



cinturón de seguridad
3 puntos

Como ya se ha dicho anteriormente, las mejoras factibles al cinturón de seguridad ya están desarrolladas desde el punto de vista técnico, y esperan solamente el momento propicio para ser introducidas. Así, lo que sigue es un resumen de muchos de los conceptos ya analizados que aportan una mayor eficacia de los dispositivos de seguridad, más dos elementos nuevos, cuyo desarrollo parece posible dado el estado de la tecnología actual.

Sujeción del cuerpo en general

La mejor manera de sujetar a los automovilistas es a través de un cinturón de 4 puntos o más. Como se analizó en el capítulo anterior, este tipo de cinturones evita los desplazamientos hacia los costados, los giros, o las caídas (en el caso de vuelcos). Las ventajas de este tipo de dispositivo de seguridad son indudables, y al día de hoy se pueden encontrar numerosos artículos en Internet que anuncian su pronta introducción en algunos vehículos. Lo que queda por resolver es la aparente reticencia que podrían llegar a demostrar algunos automovilistas, si es que perciben una mayor incomodidad, comparando el cinturón de 4 puntos con el tradicional de 3 puntos. Pero parece ser que bastaría con una amplia campaña de educación para que la población tome conciencia de los beneficios del nuevo dispositivo. Existen muchas propuestas distintas¹¹⁰ casi todas tendientes a facilitar la colocación del cinturón y la liberación del mismo, de manera que resulte lo menos incómodo posible. Así, puede decirse que una de las innovaciones principales propuestas ya se encuentra en su fase final de desarrollo, y que es de esperar su pronta introducción en los vehículos actuales:



cinturón de seguridad
4 puntos

El otro costado de la sujeción del cuerpo consiste en la manera en que se lo hace. Se debe recordar que en el capítulo anterior se analizaron las ventajas del pretensionador del cinturón de seguridad, que permite que el cuerpo humano tenga un movimiento parecido al del automóvil, lográndose aceleraciones máximas menores, en un tiempo algo más prolongado, y que **parecerían ser menos peligrosas que las que genera un cinturón de seguridad sin pretensionador** (que son más altas y de tiempo más reducido). Por eso es fundamental que el cinturón de seguridad cuente con un eficaz pretensionador, que sostenga al pasajero desde el instante mismo del choque, y que evite cualquier desplazamiento relativo –o por lo menos que lo minimice–. Queda también un aspecto más, en cuanto al pretensionador, que se relaciona con su actuación en conjunto con un “limitador de carga” que permite un cierto movimiento relativo del cuerpo del automovilista, en un intento por disminuir la aceleración que sobre aquél se ejerce. Pero su funcionamiento es demasiado complicado como para explicarlo en brevedad, y se debe prestar particular atención al hecho que **su eficacia depende exclusivamente de una serie de mediciones que no se hacen en la actualidad**: para que el “limitador de carga” actúe correctamente (ayudando en lugar de perjudicando) se debe conocer con una cierta aproximación la masa del cuerpo a sujetar, la velocidad del impacto, la

¹¹⁰ En el Volvo SCC descrito en el capítulo 4 se presentan dos alternativas distintas.

dirección del movimiento del cuerpo, aspectos que raramente se conocen o se miden. No caben dudas que un desplazamiento controlado hacia delante del cuerpo generaría una menor aceleración, pero dicho desplazamiento debería terminar antes del límite que impone la traba del cinturón, para no generar una variación instantánea de la velocidad, hecho que impone la necesidad no sólo de las mediciones anteriormente citadas, sino también de dispositivos extremadamente complicados, capaces de aplicar distintas fuerzas en función de las innumerables combinaciones de masas, velocidades de impacto y direcciones del mismo que se generan durante los accidentes de tránsito. Siguiendo con el tema, sería útil que a medida que el vehículo aumenta su velocidad también se ejerza progresivamente una mayor tensión sobre el cinturón de seguridad, anticipando la acción del pretensionador, lo que además podría provocar un efecto de presión psicológica sobre el conductor que sería consciente del aumento del peligro potencial. Pasando a otro aspecto más del cinturón de seguridad, **es fundamental que se controle que todos los ocupantes del vehículo tengan el cinturón colocado** ya que, de no hacerse esto, algún automovilista puede sufrir serios daños al ser embestido por otro de los ocupantes que no se encontraban sujetos al momento del accidente. Para esto es preciso que los sistemas de control actúen midiendo en todo momento si el cinturón de seguridad de cada ocupante está ajustado, **y de no ser así no permitir el movimiento del vehículo**. De manera similar, si durante el viaje alguien se desabrocha el cinturón, una alarma deberá indicarlo, haciendo que el vehículo comience a detenerse lentamente (luego de dar los avisos luminosos correspondientes). Esta medida, similar a la indicada para el caso en que el conductor retire las manos del volante, parece ser demasiado estricta, pero tiene la función principal de ejercer una presión considerable sobre los automovilistas, de manera de obligarlos a usar el cinturón de seguridad, protegiéndose a sí mismos, **pero además protegiendo a los demás ocupantes que no deberían ser perjudicados por la irresponsabilidad de otros**.

El último aspecto a analizar acerca de la sujeción del cuerpo en general es lo que se refiere a las distintas dimensiones de los automovilistas, desde los niños hasta las personas mucho más gordas o grandes que la mayoría de la población.



Aquí se observan por un lado la capacidad de los asientos de modificar la altura de acuerdo al tamaño del pasajero, y por el otro las dos alternativas de cinturón de seguridad de 4 puntos propuestas en el Volvo SCC.

Lo cierto es que **la protección que ofrecen los automóviles no debe limitarse solamente a la que se puede ofrecer a la población que comparte las características de la mayoría, sino a todos por igual**. Para ello es que, por ejemplo, se han diseñado innumerables asientos para niños que compensan la imposibilidad de las butacas de un automóvil para adaptarse a las características del ocupante. Y si bien puede que exista algo de confusión para aquellos padres que quieren comprar una silla¹¹¹ al menos existe un intento por parte de los diseñadores de dar una solución para cada necesidad. A medida que el niño crece, sin embargo, llega un momento en que es demasiado grande para sentarse en una silla de niño, y demasiado pequeño como para que el cinturón de seguridad cumpla con su función eficientemente. Por eso parece sensata la solución encarada en el Volvo SCC, no sólo en lo que respecta a la posibilidad de modificar la altura del asiento para alojar a los ocupantes de menor tamaño, sino también –y fundamentalmente– en el concepto de adaptar el interior del vehículo a las características del automovilista, modificando su interior de acuerdo a aquéllas. Se puede recordar que dicho “concept car” está diseñado de manera de modificar la altura del asiento del conductor, del volante y del resto del habitáculo, para que la posición de los ojos sea la ideal (o sea la que permite la mejor visibilidad del camino). El mismo concepto se puede usar al momento de modificar la altura de los anclajes del cinturón, de los asientos, o de todo el conjunto, **para permitir que los dispositivos de seguridad actúen de la manera más eficiente**. Otro aspecto más en donde la tecnología actual ha dado soluciones a necesidades no satisfechas, pero que siguen sin ser utilizadas.

Sujeción de la cabeza

La sujeción de la cabeza en impactos traseros se realiza de manera eficiente. Los distintos sistemas alternativos de sujeción (todos partiendo del apoyacabezas tradicional) que actúan en caso de accidente logran proteger adecuadamente a los ocupantes, excepto en los casos en que no se dota al automóvil de este fundamental dispositivo de seguridad. Es importante destacar que es bastante común observar que en muchos vehículos **los apoyacabezas traseros brillan por su ausencia**. O sea, que es preciso hacer obligatoria la provisión de apoyacabezas para todos los ocupantes de los automóviles¹¹² y que todos tengan la capacidad de acercarse a la cabeza de las personas que han sufrido un accidente (a través de alguno de los sistemas actuales, como el utilizado por Saab u otros fabricantes¹¹³). Y mejor todavía sería que el apoyacabezas se sitúe por sí solo a la distancia ideal de la cabeza, replicando el mecanismo de adaptación indicado recién en la sección anterior. Por otro lado en los impactos frontales el movimiento de la cabeza hacia delante no representa ningún riesgo por el movimiento en sí mismo¹¹⁴, sino que el problema consiste en evitar que la cabeza golpee algún objeto (fundamentalmente el volante en el caso del conductor), aspecto que se va a analizar por separado. Lo lleva al verdadero problema a solucionar con respecto a la sujeción de la cabeza: **los peligrosos movimientos que genera un impacto lateral**. La solución a esto la provee por ejemplo el sistema HANS, analizado en el capítulo 4, usado por los pilotos de Fórmula 1, e impracticable en los automóviles de serie, debido a la incomodidad que genera un cuello rígido colocado permanentemente en todos los ocupantes de un vehículo. Por eso lo que se propone es una solución intermedia, que permite evitar el movimiento hacia los cos-

¹¹¹ Hay muchas normas, que varían de país en país, entre otros problemas que, además, incluyen el desconocimiento de parte de los usuarios de los medios de anclaje compatibles con cada modelo de asiento.

¹¹² Incluyendo el apoyacabezas para el quinto ocupante para los autos homologados para esa cantidad de automovilistas.

¹¹³ Consultar el capítulo 5 para comprobar el peligro de la excesiva flexión del cuello, cuyas consecuencias pueden manifestarse años después de haber sufrido la lesión.

¹¹⁴ Esto es así en el caso de los adultos, pero en el caso de niños muy pequeños el riesgo es importante, por eso se recomienda que los bebés circulen con su espalda hacia delante, justamente para evitar que el movimiento de la cabeza lo dañe.

tados de la cabeza en un impacto lateral, sin incomodar en absoluto a los automovilistas. Aprovechando el hecho que el automóvil está dotado de cinturones de seguridad de 4 puntos, se pueden agregar dos bolsas del tipo airbag que se inflen en caso de accidente, adquiriendo la forma del HANS:



cinturón de seguridad
4 puntos con sistema
tipo HANS inflable

De esta manera, se puede dar al automovilista la **vital protección de un sistema HANS en el preciso momento en que se necesita**, sin que esto genere una incomodidad adicional permanente. Además, hay varios fabricantes de accesorios que ofrecen sistemas similares, pero con otro uso¹¹⁵ y que indican que la tecnología para realizar lo que se propone también está disponible.

Sujeción de las extremidades

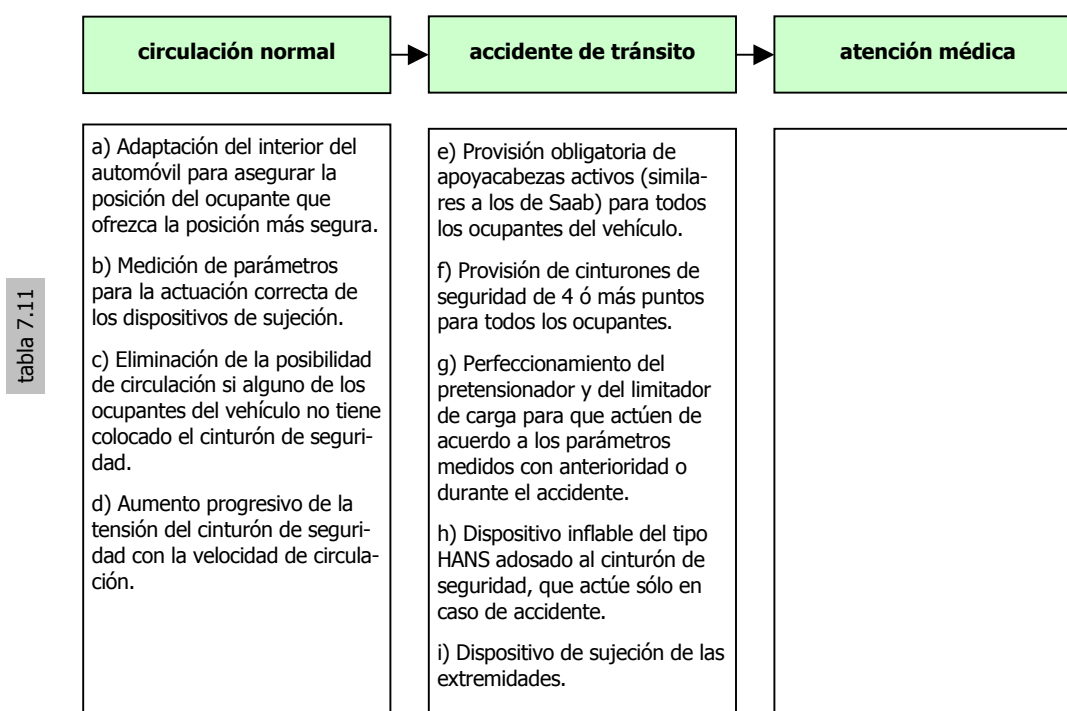
Si se trata de pensar sin restricciones, lo que se va a proponer cumple perfectamente con dicha premisa. Es que se hace muy difícil lograr sujetar a las extremidades en un impacto de la violencia de la de un choque automovilístico, sin apelar a medidas extremas. Ya se ha analizado la peligrosidad que supone el hecho que las extremidades se encuentren sin sujeción. Por un lado, las piernas pueden golpear libremente contra la parte inferior del tablero. Pero todavía más peligroso es el hecho de que los brazos no sujetos tienen no sólo la capacidad de dañarse a sí mismos golpeando contra algún objeto del interior del automóvil, sino al mismo cuerpo de la víctima, o alguna parte del cuerpo de alguno del resto de los ocupantes del vehículo. Por eso es muy importante sujetar las extremidades, para lo cual la manera más eficaz (aunque no sea ni la más cómoda ni la que coseche más adeptos entre los automovilistas) podría ser la que replica el sistema que sujeta el tobillo de los surfistas a su tabla. Con el cambio que debería haber cuatro hilos, uno para cada una de las extremidades, sujetando ambos tobillos y ambas muñecas a la carrocería del vehículo, con la capacidad de permitir cierto movimiento durante la circulación normal, y con la posibilidad de acomodar a las extremidades en la posición correcta durante el choque, evitando que se muevan más de lo prudente. Una vez más, ésta probablemente no sea la forma más cómoda de circular (bastante parecida a estar atrapado por grilletes que poco tiene que ver con la idea de una circulación confortable en un ambiente agradable, que es lo que la mayoría de los

¹¹⁵ Cinturones de seguridad que se inflan en caso de accidente para ofrecer una superficie mayor de sujeción, o una campera/airbag para motociclistas.

automovilistas asocia a la conducción) pero parece ser **la única eficaz al momento de tener que sujetar las extremidades durante un accidente**. El sistema debería asegurar que las piernas queden retenidas en un lugar cercano al que ocupan durante el viaje, pero en el caso de los brazos la situación cambia. Para las extremidades superiores se deberá tirar del hilo que une la muñeca con la carrocería hasta que queden lo más cerca de las piernas que se pueda, y con una tensión suficiente como para evitar que los brazos golpeen el cuerpo del automovilista o de sus acompañantes. Probablemente los usuarios de automóviles no acepten esta última propuesta (especialmente cuando una alta proporción de ellos ni siquiera acepta colocarse un mucho menos incómodo cinturón de seguridad) pero no se puede dejar de considerar que las heridas en las extremidades son la principal causa de discapacidad permanente en los accidentes de tránsito y que, por más absurda que parezca para un automovilista, no deja de ser una solución más eficaz (desde el punto de vista de evitar lesiones) que la circulación sin sujeción actual. El último comentario al respecto repite un poco los conceptos hasta ahora vertidos en el sentido que no se puede indicar con precisión el mecanismo de sujeción sin hacer numerosos ensayos en condiciones similares a las de circulación e impacto por lo tanto, como en los casos anteriores, las indicaciones de esta sección tienen como objetivo señalar la manera conceptual de solucionar una necesidad, dejando para quienes tienen los medios adecuados el diseño y análisis de factibilidad del dispositivo definitivo.

Síntesis de las innovaciones en los dispositivos de sujeción

Lo dicho hasta el momento se resume en el siguiente cuadro:



Es muy importante recordar que, de la misma manera que en el caso de las innovaciones propuestas para la estructura exterior, **las propuestas recién citadas se circunscriben solamente a los choques en donde no se produce un choque elástico**. Lo

que también significa que a pesar de los numerosos puntos a mejorar en cuanto a la protección de los ocupantes de un automóvil en caso de impacto, es poco lo que se puede hacer en el caso en que se produzca un choque de tipo elástico (que precisamente se produce en la mayoría de los accidentes).

7.5. Innovaciones en la estructura interior del automóvil

Mucho de lo que se va a proponer en esta sección ha sido discutido anteriormente. La mayoría de los aspectos tratados en la estructura exterior, en el habitáculo y en los dispositivos de sujeción están relacionados estrechamente con los que se tratan aquí. La única razón por la cual la estructura interior del habitáculo está separada del habitáculo es para resaltar las diferencias que existen entre proteger al ocupante de un impacto externo, y protegerlo de un golpe contra las superficies interiores, función que hoy en día se asigna generalmente a distintos airbags distribuidos a lo largo del automóvil, y que a continuación se van a analizar con mucho cuidado, empezando por la lista de objetivos que debe cumplir la estructura interior del automóvil.

Evitar cualquier contacto con las superficies potencialmente peligrosas del interior del vehículo.

Proteger a los ocupantes en caso de producirse un incendio.

Permitir la rápida extracción de las víctimas para ser atendidas.

De las tres la que parece más interesante y difícil de resolver es la primera, ya que las otras dos dependen mucho más de la estructura del habitáculo que del interior del mismo.

Protección de los impactos contra las superficies peligrosas

Hay algo importante que se debe resaltar antes de seguir. El orden en que están propuestas las innovaciones de todo este capítulo no es caprichoso ni casual, y responde a una secuencia lógica, que culmina con el intento de evitar golpes a los ocupantes, y que se puede sintetizar de la siguiente manera:

- 1) absorber la mayor cantidad de la energía cinética del vehículo (estructura exterior).
- 2) evitar las intrusiones o el aplastamiento del volumen ocupado (habitáculo).
- 3) sujetar al ocupante que tiende a seguir el movimiento original (dispositivos de sujeción).
- 4) evitar los golpes del ocupante contra las superficies peligrosas cercanas (estructura interior).

Es decir, que **nada de lo que se diga aquí tiene sentido si no se ha logrado diseñar el automóvil de manera de haber cumplido con las premisas de las secciones anteriores**. Por eso a partir de este momento se va a suponer que vehículo se detiene sin que se produzca un cambio instantáneo de la velocidad, que el habitáculo no se ha deformado, y que cada ocupante ha sido sujeto de manera de no tener ningún desplazamiento de importancia de su posición original¹¹⁶. En este contexto, el único peligro

¹¹⁶ Esto significa que, para el cuerpo en general, el movimiento hacia delante no debe superar los 5/10 cm; en el caso de las extremidades la definición del volumen en el cual pueden moverse sin peligro es más difícil de establecer, pero se va a suponer que a través de los medios de sujeción adecuados se ha logrado minimizar dicho desplazamiento.

que queda por neutralizar es el movimiento relativo entre la cabeza y el tronco, y sólo en el caso de los accidentes frontales –para los accidentes traseros o laterales ya se han propuesto las innovaciones que disminuyen ese movimiento relativo–. Este no es un problema menor, ya que los accidentes frontales representan la mayoría de los accidentes y no es conveniente extender el concepto del dispositivo HANS a los movimientos hacia delante de la cabeza, por eso la mejor solución parece ser la de dejar que aquella se desplace libremente hacia delante, evitando los golpes contra superficies peligrosas, para lo cual se han desarrollado los airbags, fundamentalmente en el caso de los ocupantes delanteros. Pero se debe insistir una vez más en que en el momento de diseñar los dispositivos de sujeción se deben hacer de tal manera que los movimientos posibles de los ocupantes se limiten a pequeños desplazamientos, del cuerpo general y de sus extremidades, excepto para la cabeza que podrá moverse libremente sólo hacia delante. Aquí toma mucha importancia lo que en el libro del doctor Hyde (2) se define bajo el concepto de “flail volume”, que es el volumen máximo que pueden ocupar tronco o las extremidades de un automovilista teniendo en cuenta su posible desplazamiento. Para un brazo no sujeto, el “flail volume” equivale a una semiesfera de radio equivalente a la longitud de dicha extremidad, que en el caso del conductor invade el espacio ocupado por el volante, el tablero, y el acompañante delantero, pudiendo inclusive alcanzar el volumen ocupado por los acompañantes traseros.

En el caso particular del diseño propuesto en esta Tesis, el “flail volume” es apenas mayor al del ocupante¹¹⁷. Lo cual es muy importante para lo que sigue, porque como se dijo en el capítulo anterior, los cinturones de seguridad actuales permiten un desplazamiento mayor al recomendable (generando que la cabeza golpee indefectiblemente el volante) y las extremidades se hallan libres de toda sujeción, generando un “flail volume” de algo más del doble del volumen de un ocupante (2). Y en estos dos escenarios, completamente distintos, el concepto de “superficie interior peligrosa” varía sensiblemente. En el caso actual, donde el “flail volume” es muy importante, el ocupante corre el peligro de impactar con la cabeza contra los vidrios, contra los parantes laterales o los del parabrisas, contra el volante (conductor) o el tablero (acompañante delantero). O corre el riesgo de impactar con sus extremidades superiores contra casi todas las superficies imaginables del interior, incluyendo por supuesto el resto de los ocupantes. Por lo tanto, ante esta situación particularmente peligrosa, es necesario dotar al automóvil con numerosas superficies interiores acolchadas, capaces de evitar golpes dañinos. De ahí la profusión de airbags de los automóviles modernos, a los que a medida que pasa el tiempo se suman cada vez más alternativas (airbags para las rodillas, para los pies, etc.). Pero estos dispositivos aumentan exponencialmente la complejidad de los sistemas de protección –y su costo–, dejando para los automóviles de grandes series de producción (como el Volkswagen Golf) la única opción de provisión de los airbags delanteros, que apenas mejoran en algo la protección de los ocupantes en los accidentes más frecuentes, pero que no lo hacen en todas las ocasiones. De todas maneras, y como indica el análisis del capítulo anterior, los peligros del accionamiento del airbag no se pueden despreciar al tener en cuenta las mejores soluciones para la protección de los automovilistas en caso de accidente, y es por eso que parece conveniente **limitar su uso a las superficies interiores donde no existe otra opción mejor**. Volviendo a las superficies potencialmente peligrosas, si el cuerpo está sujeto por un cinturón de 4 puntos o más, la cabeza por la combinación de un apoyacabezas activo y un sistema HANS inflable, y las extremidades por algún mecanismo pertinente, las posibilidades de impactar cualquier superficie interior disminuyen drásticamente. Con la sola excepción de la cabeza del conductor, que todavía

¹¹⁷ Como ya se ha dicho, esto es consecuencia del supuesto que los dispositivos de sujeción actúan con la suficiente anticipación y eficacia como para minimizar los desplazamientos.

está demasiado cerca del volante como para tener la seguridad de que no la golpea, el resto del cuerpo de los ocupantes de automóvil propuesto está poco expuesto a los encontronazos.

Y lo estaría mucho menos si el interior del automóvil fuera del tipo propuesto por la General Motors Company en su prototipo Hy-wire presentado en el año 2002. Dicho prototipo extiende el concepto ya presentado por otros diseñadores, como aquellos de Mercedes-Benz en el F200 de 1996, que proponen reemplazar los mecanismos de control mecánicos (volante, acelerador, embrague, freno y caja de cambios) por mecanismos electromagnéticos similares a los usados hoy en día en la Fórmula 1.



El interior del F200 prototipo de Mercedes-Benz que reemplaza el volante y los pedales por un joystick que concentra sus funciones.

Esto tiene la ventaja de eliminar, entre otras cosas, la columna del volante (que en muchos casos se desplaza hacia el conductor, a pesar de que en casi todos los modelos dicho dispositivo se diseña de manera de colapsar frente a un esfuerzo), y la conexión mecánica de los pedales de freno, embrague y aceleración. Aprovechando esto, y sin llegar al extremo del F200 que sustituye el volante por el joystick, el Hy-wire propone un habitáculo totalmente distinto al actual, y que a su vez se propone adoptar como innovación factible.



El habitáculo del prototipo Hy-wire de la General Motors Company muestra como uno de sus rasgos característicos la ausencia de tablero, o de conexión mecánica entre el volante y las ruedas, o el pedal de frenos y dichos dispositivos, entre otras novedades.

Como se observa en la foto anterior, las superficies contra las cuales el conductor puede impactar en caso de accidente se reducen drásticamente en comparación con un vehículo moderno. Lo importante es que al quitar el tablero, reducido a su mínima

expresión en el espacio que separa a los ocupantes delanteros, el conductor sólo puede chocar contra el volante y el costado izquierdo del vehículo, y el acompañante delantero contra el costado derecho. En otras palabras, **se ha ampliado sensiblemente el espacio interior del vehículo en donde los ocupantes pueden desplazarse sin impactar contra ningún objeto**. Basta entonces dar las siguientes dos soluciones:

- en el caso de las superficies laterales (ventanillas y puertas) se debe asegurar que dichas superficies absorban los posibles golpes que se generarían¹¹⁸ a través de materiales blandos en los paneles de las puertas y en los parantes, y airbags laterales que cubran por completo las superficies vidriadas.
- en el caso del volante, se puede diseñar de manera que al chocar el automóvil la columna completa se desplace hacia delante alejándose de la cabeza del conductor, dejando un espacio libre mucho mayor, para que la cabeza se desplace sin riesgo de golpes.

Esto último se puede hacer gracias a que no existe un tablero que restringe la posibilidad de movimiento. Ahora bien, el hecho de alejar el volante de la cabeza del conductor es un concepto bastante distinto al que se usa actualmente, donde el volante queda fijo, y lo que se hace es acercar (violentamente) hacia la cabeza una bolsa de aire que no siempre es capaz de evitar los golpes, y que muchas veces es la que genera las heridas.



La proximidad entre el volante y la cabeza del conductor hace que muchas veces, según la velocidad original del impacto, la cabeza golpee un airbag que se está inflando todavía, y que puede provocar serias heridas a la víctima del accidente.

O sea que **el nuevo planteo implica una nueva definición del airbag**, que se limitaría a cambiar las características de las superficies vidriadas (en lo que hace a la superficie interior del automóvil¹¹⁹), ofreciendo una protección mayor especialmente en el

¹¹⁸ A pesar de que el habitáculo no se deforma, y que los dispositivos de sujeción limitan el movimiento a unos pocos centímetros, es conveniente considerar un factor adicional de seguridad, suponiendo que de todas maneras se puede generar algún impacto.

¹¹⁹ Recordar que en la sección anterior se propuso un tipo de airbag que cumple la función de un sistema HANS.

caso de los impactos laterales o los oblicuos¹²⁰. Y también implica abandonar el concepto del airbag surgiendo desde el volante o desde el tablero para detener el movimiento de la cabeza hacia delante. Esto si bien significa romper con la línea actual de la protección de los ocupantes tiene la ventaja de considerar un problema dado y aplicar la más sencilla de las soluciones. Porque de acuerdo a lo que se analizó anteriormente la única manera de que el airbag frontal actúe eficientemente es a través de la medición de todas las variables que inciden en dicha eficiencia, y el diseño de un airbag capaz de adaptar su velocidad de inflado y presión a cada necesidad –que depende de una multitud de factores– lo que parece extremadamente complicado de realizar. En cambio alejar el volante de la cabeza del conductor implica una mayor sencillez de diseño, porque basta con hacer que el brazo que sostiene el volante se mueva rápidamente hacia delante, a una velocidad dada¹²¹ **que no varía para los numerosos escenarios posibles de un accidente de tránsito**. Una situación análoga es la de los airbags que cubren las ventanillas, que sólo deben ofrecer al ocupante una superficie menos dura, en accidentes que por otro lado ocurren a velocidades mucho menores. A todo esto se suma, que además de representar una solución más sencilla a la necesidad de evitar los impactos contra las superficies interiores peligrosas, también implica **una reducción de dispositivos complejos que se traduciría en un menor costo**.

Protección de los ocupantes en caso de incendio

Este problema se puede resolver de la manera indicada en el análisis de las innovaciones del habitáculo. Si se supone que el habitáculo ofrece una barrera protectora contra los incendios que se puedan provocar fuera del vehículo, y si a esto se le adiciona la condición que no se permita ningún elemento combustible en el interior del habitáculo, los ocupantes no deberían correr riesgo de incendio, a menos que intencionalmente sean ellos lo que llevan un material combustible en el interior. Lo importante entonces es **asegurarse de que todos los elementos del interior del vehículo estén fabricados a partir de materiales ignífugos**, situación que hoy en día no se da, ya que desde el tapizado hasta los rellenos de los asientos se encienden con facilidad al ser alcanzados por las llamas. Muchos de los plásticos utilizados en el interior también, y con las alfombras se completa un escenario extremadamente propicio para la rápida extensión del incendio a la zona ocupada por los automovilistas.

Extracción rápida de los ocupantes del habitáculo

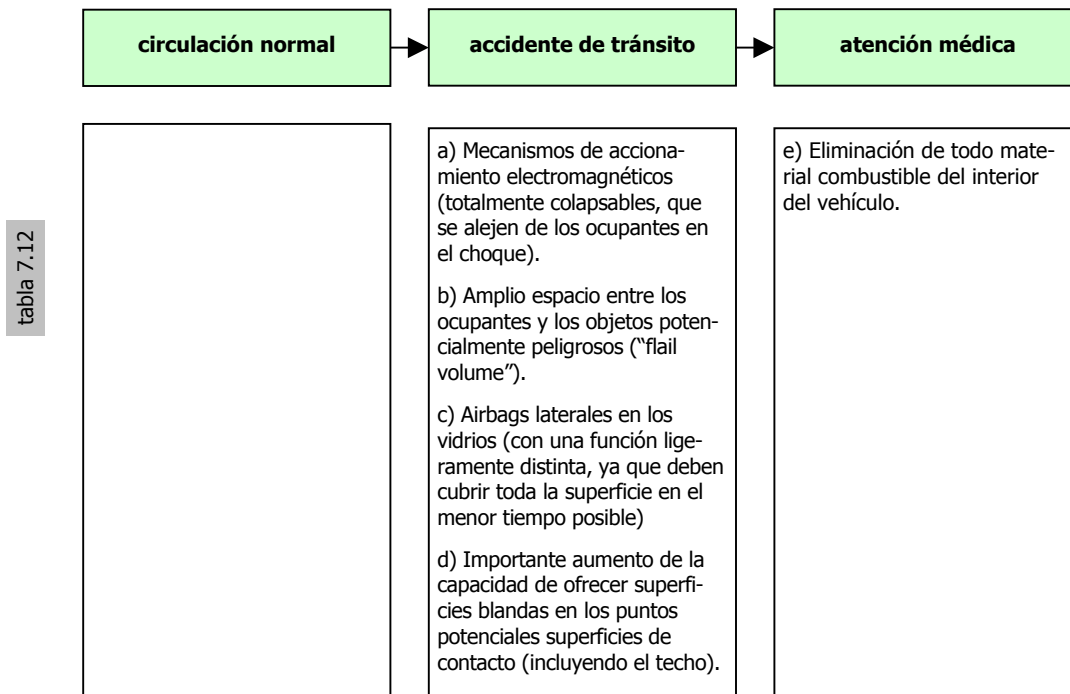
Esto también está íntimamente ligado a la solución indicada para el habitáculo, con el agregado que si bien las superficies vidriadas ofrecen la vía de escape para que las víctimas sean retiradas con relativa rapidez y sencillez, el interior del vehículo debe estar diseñado de una manera que no obstruya dicha extracción. La eliminación del tablero y el mayor volumen libre ayudan a despejar el área que rodea a los ocupantes facilitando entonces el rescate.

¹²⁰ También se debe recordar que un impacto frontal puro es un suceso poco frecuente (ver capítulo 6) y que, en general, en los impactos frontales se produce algún tipo de rotación que puede empujar a los ocupantes hacia los costados del vehículo.

¹²¹ Que debe ser lo suficientemente elevada como para alejarse a tiempo en accidentes de hasta 130 km/h.

Síntesis de las innovaciones en la estructura interior

Con el siguiente cuadro finaliza el análisis de las innovaciones que se deben introducir en los vehículos modernos para mejorar la protección que se ofrece a los ocupantes en el caso de que sufran un accidente:



Sin embargo, todavía queda un aspecto más a analizar, que tiene que ver con la integración de las innovaciones propuestas en un diseño que sea factible producir y comercializar, para lo cual se pueden hacer algunos comentarios generales que ayudan a estimar dicha factibilidad que, por supuesto, debe ser confirmada con análisis mucho más profundos realizados con los medios adecuados.

7.6. Diseño integrado (habitáculo/estructura exterior/sujeción)

Lo importante para poder diseñar un automóvil más seguro que el actual es establecer cuales son las prioridades a adoptar al momento de comenzar el desarrollo del diseño definitivo. Parafraseando los dichos del capítulo 3, todo diseño exitoso debe poder lograr satisfacer tanto las necesidades básicas como las otras necesidades de los usuarios de automóviles, prestando particular atención a la necesidad básica que ha sido prácticamente ignorada en los primeros cien años de historia del auto: **la seguridad**.

Es decir, que la propuesta de esta sección es romper un paradigma histórico, que consiste en diseñar un automóvil para luego tratar de hacerlo seguro. Cambiar la historia, **diseñando un vehículo seguro, para luego intentar que sea exitoso desde el punto de vista comercial**. Esto es de suma importancia, ya que un automóvil que proteja adecuadamente a los ocupantes pero que no es adquirido por ningún cliente no aporta nada a la mejora de la seguridad. El siguiente ejemplo ilustra la facilidad de diseñar un automóvil seguro: basta con aumentar sensiblemente la longitud del vehículo, por ejemplo hasta unos 30 metros, y con eso se estaría en la seguridad que dicha longitud es suficiente para absorber cualquier magnitud de energía cinética involucrada en el impacto. De manera similar se puede aumentar el ancho hasta unos 10 metros, pero las dimensiones indicadas del vehículo no sólo impedirían su comercialización por el excesivo costo sino que, además, no permitirían la circulación en la red vial existente. Por eso para evitar esto, se va a recorrer nuevamente el camino del capítulo 3, analizando las necesidades a satisfacer y la manera de hacerlo, empezando por la necesidad básica principal.

Necesidad básica I: seguridad

La primera parte de este capítulo estuvo dedicada al análisis de las mejoras que deberían introducirse en el automóvil para mejorar la seguridad de impacto. Justamente el desafío de esta sección consiste en lograr una integración entre las innovaciones recién propuestas y un diseño acorde a los requerimientos productivos y de comercialización. La única salvedad al respecto (y que se ha comentado oportunamente) es que **todas las mejoras analizadas son efectivas solamente para los impactos de hasta 130 km/h contra objetos fijos**. Esto no significa que no sean efectivas para los impactos entre múltiples vehículos. Sólo se indica a través de este comentario que en los impactos más comunes existe una alta incertidumbre acerca de las distintas masas y velocidades, que hace que no se pueda asegurar que los ocupantes de los distintos vehículos salgan indemnes del accidente¹²². Igualmente, antes de pasar a la siguiente necesidad básica a satisfacer se deben analizar brevemente dos aspectos adicionales. Por un lado, es necesario reforzar la importancia de los sistemas de control de información, de vital importancia al momento de asegurar el correcto funcionamiento de los dispositivos de seguridad, de gestionar la información necesaria para la protección, y de avisar rápidamente a los centros de atención más cercanos acerca de la posición de las víctimas. En este caso **la tecnología actual está en condiciones de dar todas estas soluciones con relativa sencillez, y de esta manera se complementarían adecuadamente las innovaciones hasta aquí propuestas**. Por el otro lado hasta este momento no se consideraron a los protagonistas de los accidentes viales que no circulan en automóviles. Anteriormente se explicó la razón de esto, pero ahora se puede hacer una consideración al respecto ya que cuando se habla de víctimas de acci-

¹²² Aunque lo que sí se puede prever es que aquellos de los automóviles de menos masa que circulan a menor velocidad al momento del impacto serán los más perjudicados.

dentes viales, éstas no incluyen solamente a los ocupantes de los vehículos, sino a quienes son embestidos por ellos. Por ejemplo en Estados Unidos, de los aproximadamente 40.000 muertos anuales como consecuencia de accidentes, algo más de 4.000 son peatones¹²³ (3). Se debe que tener en cuenta, además, que en el caso de los peatones, si bien tienen una pequeña participación en la cantidad de heridos, su proporción se quintuplica en el caso de las muertes, indicando el serio riesgo al que se expone un peatón cuando es embestido. A este análisis se le puede sumar otro que indica el sector del auto más peligroso para el peatón, que consiste en el sector frontal, ya que en el 92% de los accidentes fatales es ese sector que impacta al peatón. Esto puede atribuirse a la velocidad del impacto, ya que los accidentes en que la parte trasera los golpes probablemente sean consecuencia del impacto del ciclista o peatón contra el automóvil, o de una embestida mientras el vehículo se desplaza marcha atrás (generalmente a bajas velocidades). Algo similar ocurre con los accidentes en que el sector lateral es el que golpea a ambos, con la salvedad de que el vehículo probablemente tenga una velocidad intermedia entre los impactos frontales y traseros, con el vehículo desplazándose mientras es embestido por el ciclista, o con el mismo haciendo alguna maniobra de evasión (siempre a velocidades menores que en un impacto frontal). Por esto más adelante se va a proponer una innovación que permita mejorar la protección de los peatones al menos en el sector frontal del automóvil.

Necesidad básica II: generación de potencia

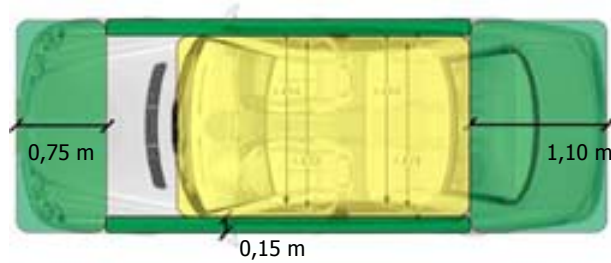
Todo parece indicar que los días del motor de combustión interna están prontos a finalizar. Y si bien ninguna de las alternativas propuestas hasta el momento se destaca claramente sobre la otra, todas se centran en la utilización de hidrógeno en combinación o no con motores eléctricos. Las ventajas que ofrece la combustión de hidrógeno en comparación con la de los combustibles fósiles son indiscutibles desde el punto de vista ecológico. Además, lo cierto es que el respeto del medio ambiente es otra de las necesidades no satisfechas, y se impone alguna solución al respecto. Por eso **el automóvil propuesto va a tener propulsión eléctrica**, a pesar de que la industria moderna está en una situación similar a la que imperaba en los primeros treinta años de historia del automóvil¹²⁴: existe una multitud de proyectos y de teorías, y ninguna se destaca claramente del resto como lo hizo el motor de combustión interna sobre el resto de las alternativas a partir de 1940. De todas maneras, todo parece indicar que **será posible contar en un plazo razonable de tiempo con una fuente de potencia que ocupe poco espacio, que entregue una cantidad adecuada de potencia, con una autonomía acorde a las necesidades actuales, y que al mismo tiempo contamine lo menor posible el ambiente**¹²⁵. Y de todos estos puntos mencionados el que interesa recalcar es el del espacio que ocupa el motor. Esto se debe a que, de acuerdo a lo planteado en las mejoras a introducir en la estructura exterior, es necesario dotar al automóvil de un amplio volumen capaz de absorber la energía cinética del impacto sin aumentar demasiado las dimensiones totales del vehículo. Pero al mismo tiempo la otra condición es que dicho volumen que se deforma de manera controlada esté exento de elementos mecánicos que modifiquen su coeficiente de rigidez. Lo cual implica dejar al motor, transmisión y demás componentes que puedan afectar el comportamiento de la estructura exterior **fuera de ella**. En otras palabras,

¹²³ En los países en desarrollo la situación es aún peor, de acuerdo al último informe de la WHO (5), donde la proporción de muertos por accidentes de tránsito que no ocupan vehículos es bastante más alta que en el caso de los países desarrollados.

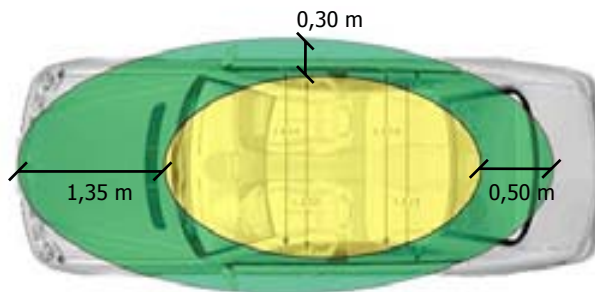
¹²⁴ Ver capítulo 3.

¹²⁵ Ver en los Anexos la información adicional acerca de las tipologías de propulsión alternativa a los motores de combustión interna propuestas por diversos fabricantes de automóviles.

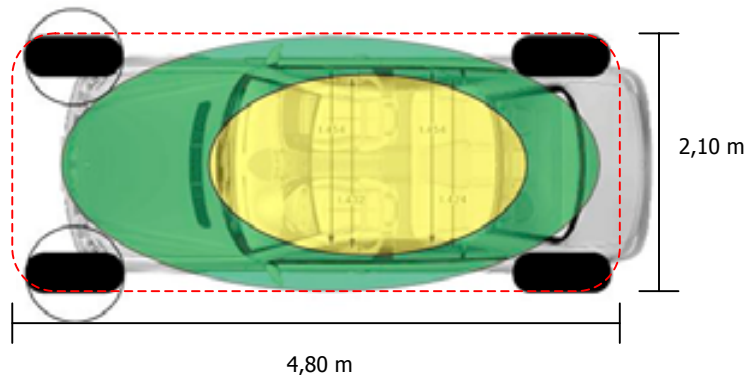
construyéndolo desde dentro hacia fuera el automóvil debería tener **un habitáculo indeformable, rodeado de una estructura parcialmente deformable homogénea, y el resto de sus componentes fuera de ellos** (con la salvedad de los que se puedan colocar dentro del habitáculo y que no afecten el espacio vital de los ocupantes). Hasta ahora la estructura exterior propuesta estaba formada por distintas secciones que variaban su coeficiente de rigidez de manera progresiva, conformando un "anillo protector" del habitáculo. Pero en el momento en que se analizó dicha solución todavía no se había indicado que al mismo tiempo era conveniente adoptar un habitáculo en forma de elipse. Siendo así, se puede considerar que el "anillo protector" también toma la misma forma, y de esta manera se pasaría de la siguiente estructura actual:



A esta estructura, que resume lo recién propuesto:



Y que a su vez permite dotar al automóvil de ruedas, manteniendo las dimensiones totales dentro de los límites establecidos al principio de este capítulo:



El inconveniente que se genera es que, debido a la fuerte restricción de espacios, se hace extremadamente difícil la utilización de un motor de dimensiones similares a las de uno actual. Por eso es que la adopción de un motor eléctrico resulta una solución adecuada para este problema. Y entre las distintas configuraciones posibles la que

mejor se adapta a las necesidades del diseño propuesto es la adopción de un motor eléctrico en cada rueda, tal como se dispone en distintos prototipos, entre ellos el denominado KAZ¹²⁶ y que utiliza una configuración híbrida para alimentar cada uno de los ocho motores eléctricos conectados a sus ocho ruedas, suficientes para impulsar al vehículo a una velocidad máxima de 300 km/h.

Pero el KAZ no es el único prototipo que propone reducir el volumen ocupado por el motor. Además de las características innovadoras del habitáculo del Hy-wire de la General Motors Company, dicho prototipo presenta un conjunto motor/transmisión integrado en un grupo junto con las baterías y el resto de los componentes mecánicos. Así, el total de los dispositivos que generan la potencia y que mueven el vehículo se encuentran reunidos en una sola estructura compacta, de dimensiones contenidas.



El KAZ, un vehículo desarrollado por la universidad japonesa de Keio para explorar los usos de motores eléctricos.

Como ventaja adicional el prototipo ofrece la posibilidad de ensamblar el grupo motor/transmisión con distintas carrocerías, racionalizando la producción de los distintos vehículos del fabricante, permitiendo un importante ahorro de costos.

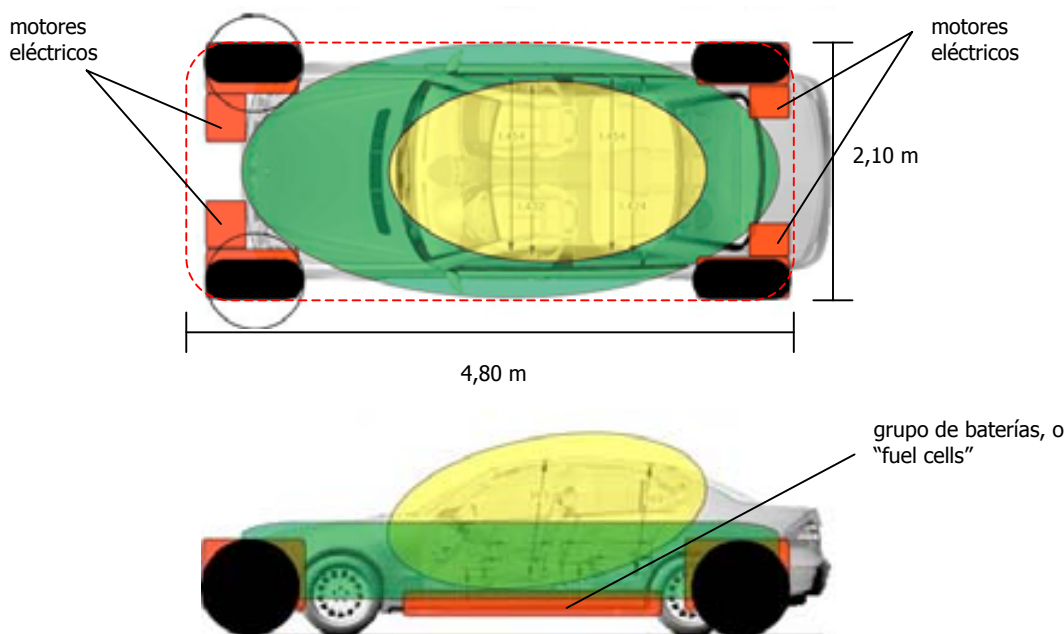


La original propuesta de la General Motors Company (en su "concept car" Hy-wire) que propone concentrar las estructuras de generación de potencia y transmisión de la misma en un conjunto compacto, denominado por su forma "skateboard".

Llegado a este punto, no queda más que tomar estas ideas de los prototipos y vehículos de serie recién analizados, y proponer la utilización de cuatro motores eléctricos, uno en cada rueda, con la fuente de energía (tanto "fuel cells" como baterías, según corresponda a la configuración definitiva) por debajo del habitáculo. Esto es precisa-

¹²⁶ Desarrollado por la universidad japonesa de Keio.

mente lo que proponen el KAZ, el Honda FCX o el Hy-wire, y que en realidad parece ser la mejor combinación que se pueden deducir de los aspectos presentados en dichos vehículos. La estructura del nuevo automóvil se completa entonces de la siguiente manera:



La introducción del grupo de baterías o de "fuel cells" debajo del habitáculo indeformable obliga a aumentar algo la altura del vehículo (al menos comparado con el Mercedes-Benz tomado como modelo), llevándola a valores similares a la de los vehículos "todoterreno", lo cual no presenta en principio ningún inconveniente. Además, el hecho de colocar una masa importante por debajo del eje de las ruedas genera descenso del centro de masa, con las consecuentes siguientes ventajas de este fenómeno.

Por un lado, el bajo centro de masa ayuda a evitar muchos vuelcos, en un contexto en donde los vehículos circulan cada vez más rápido y se exponen cada vez más a situaciones potencialmente peligrosas. Y por el otro, sirve también para minimizar el efecto de giro que se produce en un impacto entre dos vehículos, que tienden a levantar la cola, aumentando el peligro de golpes de los ocupantes contra el interior, y disminuyendo la longitud útil del resorte inelástico del frente del automóvil.



Imagen de una colisión entre dos automóviles realizada por Saab para ensayar choques más cercanos a la realidad.

Otro elemento más que se suma a esta propuesta es el aumento del diámetro de las ruedas, lo que permite un eje más alto, que también ayuda a minimizar los riesgos de vuelco o de giro durante el impacto. En definitiva, ya sea a través de motores eléctricos alimentados por "fuel cells" o motores híbridos similares a los del Toyota Prius (que en el futuro podrían ser alimentados con hidrógeno como propone BMW), lo

cierto es que parece posible lograr lo que resulta más conveniente tanto a la seguridad como al medio ambiente, satisfaciendo al mismo tiempo las necesidades de potencia y autonomía los usuarios.

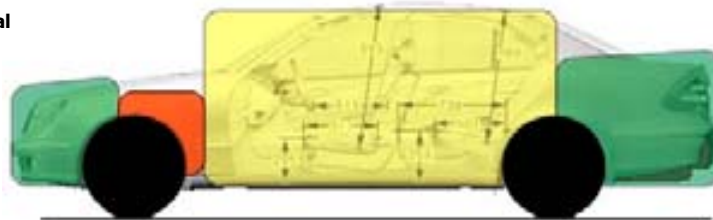
Necesidad básica III: movimiento y control del vehículo

Muchos de los aspectos del movimiento y control del vehículo han sido tratados en el punto anterior. El Hy-wire es un buen ejemplo de la manera en que se puede mover y controlar el automóvil a través de dispositivos electromagnéticos. Además, la posibilidad de utilizar el motor de las ruedas como generador en el momento en que el vehículo debe disminuir la velocidad ayuda a aumentar la capacidad de frenado, disminuyendo los requerimientos sobre los frenos a disco (que deberían ser obligatorios, para todos los modelos, en las cuatro ruedas). A esto se suma que la tracción en las cuatro ruedas es la más segura desde el punto de vista de la adherencia al camino, en cualquier condición, y que los cuatro motores correctamente gestionados a través de la central de tracción permiten un correcto control del vehículo. Por supuesto que esto significa sistemas de gestión más complicados que los actuales, pero que están dentro del alcance de lo que el desarrollo actual de la tecnología automotriz permite.

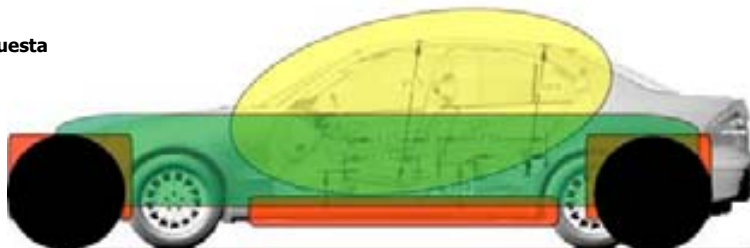
Necesidad básica IV: estructura resistente

En este punto es donde es necesario reflexionar acerca de la palabra “resistente”. En el capítulo 3, dicho concepto se refería principalmente a la capacidad de la carrocería de soportar la masa del motor, la de los elementos mecánicos que permiten el movimiento, la de los ocupantes y la de la carga que transporta el vehículo. En cambio a lo largo de este capítulo la “resistencia” del automóvil **está orientada hacia la protección de los ocupantes durante el impacto**. Para lo cual es necesario, como se dijo anteriormente, diseñar un habitáculo indeformable (por lo menos para impactos de hasta 130 km/h contra o objetos fijos) y una estructura exterior de acuerdo a lo explicado. Aquí se pueden observar las diferencias con un vehículo actual:

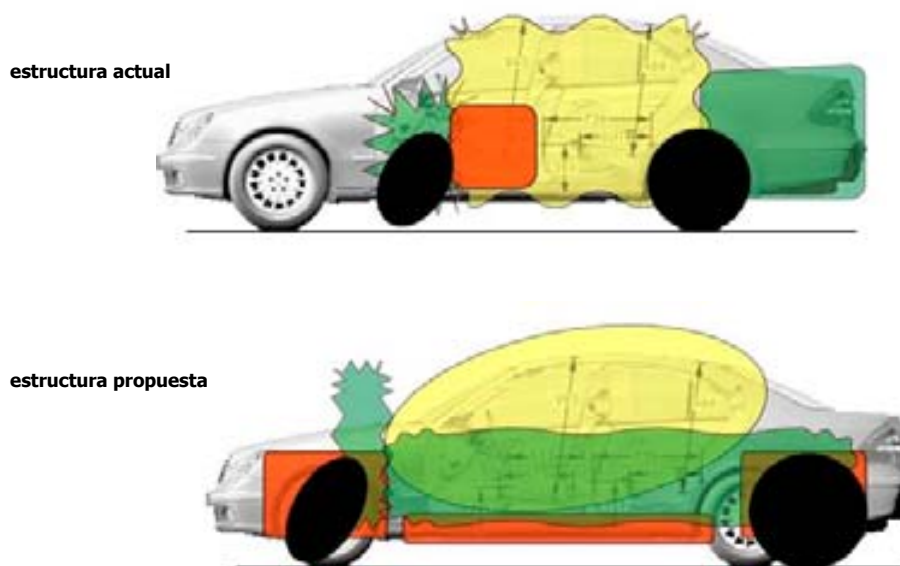
estructura actual



estructura propuesta



Las ventajas de la estructura propuesta se observan con claridad en el caso de impactos a alta velocidad. Ya se dejó en claro que no existen ensayos de impactos a velocidades mayores a los 64 km/h, y por lo tanto tampoco se puede contar con detalles que permitan inferir lo que ocurre con el habitáculo a esas velocidades, si bien se puede suponer que se genera una importante deformación. Al mismo tiempo, en un automóvil actual, el motor es empujado hacia atrás, violando el espacio vital de los ocupantes. A estos dos sucesos ya de por sí graves se le agrega un tercero que es que, inclusive en los impactos contra objetos fijos, un vehículo moderno no cuenta con una estructura externa capaz de absorber la energía cinética inicial, generando un peligroso choque de tipo elástico. La nueva estructura, por otro lado, permite absorber dicha energía, pero también evita las deformaciones del habitáculo, y cualquier tipo de penetración de objetos dentro de él. En los siguientes dibujos se puede apreciar, de manera muy esquemática, las diferencias entre el comportamiento de ambos tipos de estructuras en un choque a altas velocidades:



Desde ya que para que esto sea posible se debe diseñar la estructura de acuerdo, una vez más, a los análisis realizados con los medios adecuados. Lo único que se pretende aquí es indicar las ventajas comparativas de la nueva estructura en lo que hace a la resistencia a los impactos, dejando la ingeniería de detalle para los profesionales.

Sin embargo, parece que vale la pena agregar un aspecto más a la estructura resistente del automóvil, que se relaciona con la protección a los peatones. Si bien es un tema marginal para el trabajo, aprovechando la definición de la posición relativa de los componentes principales del automóvil se puede indicar cómo se podría mejorar, aunque sea parcialmente, la protección ofrecida. Donde la forma del frente toma una importancia vital para determinar la suerte del peatón embestido.



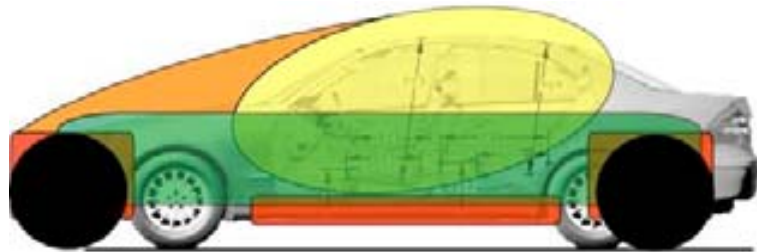
Un Cadillac Fleetwood Sixty Special de 1957, cuyo hermoso frente representaba un serio peligro para los peatones.

Dicha forma debe ser lo más redondeada posible, libre de puntas que puedan generar heridas, y debe además tener la capacidad de evitar que el peatón sea lanzado debajo de las ruedas del vehículo. Pero más allá de la forma, lo importante es que el frente tenga la capacidad de absorber parte de la energía cinética de movimiento, para disminuir la fuerza del impacto sobre el peatón. En algunos vehículos se está ensayando un tipo de airbag externo, que se acciona ante un golpe de un peatón.



Una versión pintoresca del Volkswagen "New Beetle" que muestra la ausencia de salientes potencialmente peligrosas.

Uno de esos vehículos es, nuevamente, el Volvo SCC ya presentado en ocasiones anteriores, si bien no es el único. Otra de las soluciones a explorar, y que es compatible con la estructura que se está proponiendo, es el diseño de un automóvil monovolumen¹²⁷ que ofrezca la mayor superficie de contacto posible al peatón. De esta manera, se distribuyen mejor los esfuerzos, y la probabilidad de daño disminuye.



Ahora bien, la posición del habitáculo, bastante atrasada con respecto al frente, ofrece una posibilidad hasta ahora difícil de igualar. Al estar el parabrisas muy alejado de los ocupantes delanteros se puede hacer que aquél se retraiga al ser embestido, permitiendo disipar mejor la energía cinética del impacto¹²⁸. Igualmente, este nuevo dispositivo debe ser diseñado con mucho cuidado, respetando las premisas indicadas en las innovaciones del habitáculo, teniendo en cuenta que el parabrisas no debe dejar que objetos externos impacten contra los ocupantes. Es decir, que el parabrisas debe tener la capacidad de retroceder para minimizar el impacto contra un peatón, pero no moverse más allá de lo prudente en caso de que en lugar de un peatón el objeto de impacto sea uno que represente un potencial peligro para los automovilistas. Un último comentario acerca de la estructura resistente tiene que ver con los materiales a usar. Es casi obvio que los dichos materiales debe ser los que ofrezcan **la máxima resistencia mecánica con la menor masa**, y que por lo tanto se debe extender el uso de aluminio o de fibra de carbono, en detrimento del acero. En particular el habitáculo debería tener una gran proporción de estos dos materiales, siendo que se debe diseñar un espacio indeformable, manteniendo la masa del conjunto en un valor contenido. En cuanto a la estructura exterior, por el otro lado, existen algunos nuevos desarrollos que sería interesante analizar con más detalle, como la espuma de aluminio por ejemplo. Este material ofrece la posibilidad de absorber eficientemente la energía ci-

¹²⁷ La mayoría de los vehículos están siendo diseñados en ese sentido.

¹²⁸ Desde el punto de vista del peatón la situación es similar a ser chocado por un vehículo que circula a menor velocidad.

nética (4), y se adaptaría muy bien al requerimiento de la variación continua de coeficiente de rigidez que se debe lograr en la estructura exterior que rodea el habitáculo indeformable.

Volviendo a la fibra de carbono, todo parece indicar que no es un material apto para los automóviles de producción en serie, ya que se trata de un compuesto que se produce de manera casi artesanal. Pero en los últimos años BMW logró introducir la fibra de carbono en la fabricación de los techos de los autos más caros de la Serie 3, logrando un proceso de alta productividad que abre un mundo de posibilidades para su utilización sobre todo en los paneles planos¹²⁹.



El techo de los automóviles de alta gama de la Serie 3 de BMW está hecho de fibra de carbono.

Necesidad básica V: confiabilidad y gastos de operación

Ésta es la quinta necesidad básica que los automóviles deben satisfacer, y con esto se cierra el recorrido por dichas necesidades, para pasar a las demás, que no por no ser básicas son menos importantes. Lo cierto es que los automóviles modernos cumplen holgadamente con los requerimientos de confiabilidad y gastos de operación. En cuanto al vehículo aquí propuesto, lo importante es decir que en el corto plazo es probable que la propulsión eléctrica sea más costosa y menos confiable que la de combustión interna. Pero una vez afianzada, dicha fuente de potencia probablemente genere menos desperfectos que un motor a nafta, con la ventaja adicional que al tener cuatro motores en lugar de uno, ante el mal funcionamiento de una de las unidades, sería factible continuar la marcha con el resto.

Antes de terminar se debe resaltar el hecho que algunos fabricantes de neumáticos ofrecen una nueva tecnología que permite circular con las ruedas desinfladas y que no sólo elimina la necesidad de ruedas de auxilio (dando mayor confiabilidad), sino que **disminuye la necesidad de espacio en el baúl**. Por otro lado el resto de los mecanismos que completan el diseño comparten la misma tecnología usada en la actualidad, y tienen probada eficacia en cuanto a los dos requerimientos de este punto.



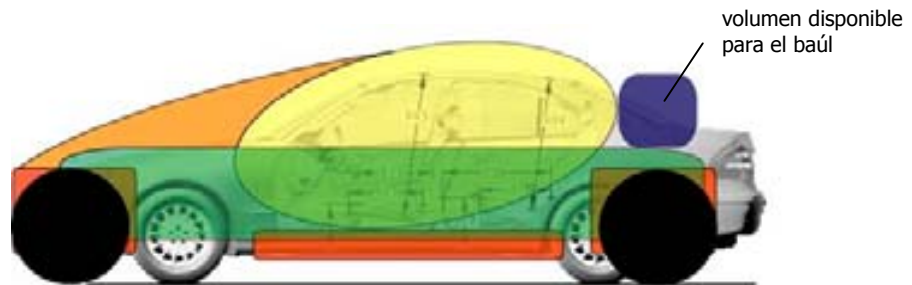
El sistema "run flat" permite que el vehículo continúe su marcha con los neumáticos desinflados.

Otras necesidades I: confort y lujo

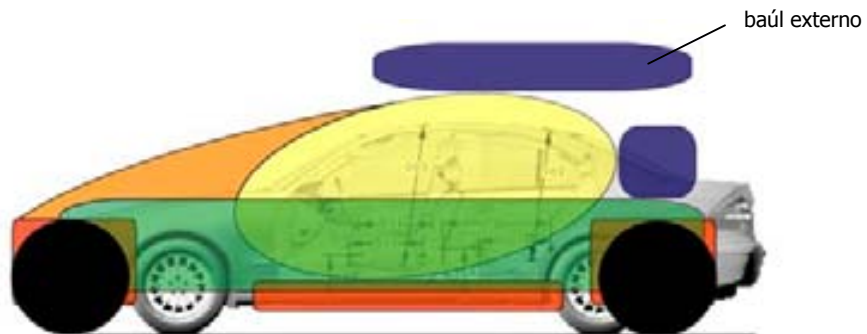
De manera similar a lo recién argumentado, la mayoría de los elementos de confort y lujo de los automóviles modernos pueden ser adaptados al nuevo modelo propuesto. De hecho

¹²⁹ Estos paneles son los que se pueden conformar por estampado, como los que conforman la estructura externa del techo, del baúl, del capot o de las puertas, entre otros.

las dimensiones del habitáculo corresponden a las de un vehículo de gama media, capaz de albergar cuatro pasajeros de manera cómoda. Existe, sin embargo, un problema que tiene que ver con el volumen que la propuesta destina a la estructura externa, y que debe ser utilizado exclusivamente para absorber la energía cinética del impacto. Esto hace que el espacio ahora destinado al motor disminuya drásticamente, lo que fue solucionado a través de la adopción de los motores eléctricos distribuidos en las ruedas que ocupan un volumen menor. Pero al mismo tiempo, la disminución del espacio disponible afecta también –y especialmente– al baúl del automóvil. Por un lado se ha transferido parte de la longitud que separa el habitáculo del paragolpes trasero hacia el frente del vehículo. Pero además, lo que hoy sería el baúl del automóvil en esta propuesta se convierte en una masa homogénea de espuma de aluminio (o algún material de propiedades similares) que no deja espacio para colocar objetos. Por lo tanto, el pequeño volumen disponible es probable que no alcance para los requerimientos de un automovilista, sobre todo en lo que hace a los viajes largos, donde en general el equipaje ocupa un volumen importante:



Existe, sin embargo, una solución posible (descartando la posibilidad de aumentar las dimensiones del automóvil) que consiste en utilizar un baúl adicional en el techo, tal cual es de uso frecuente en muchos casos. Esto se debe a que en realidad la gran mayoría de las veces en que se usa el automóvil no se requiere de un gran baúl, y esto último ocurre sólo esporádicamente, durante algunos fines de semana, o durante las vacaciones. Por eso parece posible agregar al vehículo la capacidad adicional de volumen mediante un dispositivo externo, que durante el uso cotidiano estaría guardado en el hogar:



Otras necesidades II: velocidad y potencia

Tal vez ésta sea la necesidad más controversial de todas. En el capítulo 2 se analizó la relación que existe entre la velocidad y el conductor. Pero al mismo tiempo se demostró, a lo largo del resto de los capítulos que, **a las velocidades actuales de circulación se hace muy difícil proteger adecuadamente a los automovilistas que sufren un accidente.** Inclusive con las modificaciones e innovaciones propuestas, una gran

cantidad de accidentes peligrosos queda fuera de las capacidades del automóvil "seguro". Sobre todo en lo que se refiere a los accidentes entre dos o más vehículos. Una de las alternativas consiste en proponer una baja en los límites de velocidad de circulación, aspecto prácticamente imposible de llevar a cabo, en un contexto en donde los conductores viajan cada vez más rápido (y para ello compran autos cada vez más potentes y veloces). Al mismo tiempo, la capacidad de los motores eléctricos se limita a entregar una potencia suficiente como para mover el automóvil a velocidades altas, pero que no alcanzan los valores actuales. Éste es el motivo por el cual BMW, en su búsqueda de un motor menos agresivo hacia el medio ambiente, eligió la combustión del hidrógeno. Casi en el mismo sentido, los grupos Volkswagen y Daimler-Chrysler apuestan a las naftas hechas a partir de desechos urbanos (no muy distintas a las producidas a partir del alcohol de caña de azúcar, de gran difusión en Brasil hace unos años). Pero lo cierto **es que algún límite se debe poner**. Los motores eléctricos que se proponen usar son capaces de desarrollar velocidades mayores a los 130 km/h, suficientes para los límites de velocidad en la mayoría de los países (pero insuficientes para los deseos de la gran mayoría de los conductores, en casi todos los países). Por eso la adopción de este tipo de motores puede ayudar a disminuir la velocidad de circulación, a lo que se puede sumar la ayuda de la tecnología para controlar dichos límites. Hoy en día fabricantes como BMW o Mercedes-Benz limitan la velocidad máxima de sus vehículos a 250 km/h a través de la central de gestión de alimentación de combustible. Es decir que bastaría que ese límite se fijara en 130 km/h, por ejemplo.

Paralelamente, tienen amplia difusión, sobre todo en los países desarrollados, sistemas satelitales de navegación que permiten saber al conductor en qué lugar se encuentra, y la ruta más conveniente a seguir para llegar al destino. Si se pudiera entonces relacionar la situación del automóvil (si se encuentra en una ciudad, en un camino rural o en una autopista) con la velocidad máxima que puede desarrollar el vehículo, se podría indicar a la central que controla la potencia el límite de velocidad para cada circunstancia.



La alta velocidad que desarrollan algunos automóviles no permite proteger adecuadamente a sus ocupantes en caso de choque.

Pero por supuesto que esto atenta contra el sentimiento de libertad que brinda el automóvil, por eso me la implementación o no de estas medidas **debe surgir de las conclusiones de los debates que se llevan a cabo en los ámbitos pertinentes a la seguridad vial**.

Otras necesidades III: gustos personales

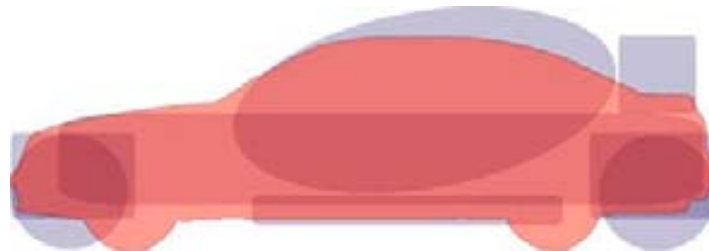
Como se dijo en el capítulo 3, **este aspecto es vital para determinar el éxito comercial o el fracaso de un automóvil**. Los diseñadores saben de esta importancia, y hoy en día se pueden observar numerosos ejemplos de diseños brillantes¹³⁰, y en este contexto no deberían existir problemas para dotar al automóvil que se propone de un estilo exterior atractivo. Sólo a título de ejemplo el siguiente es podría ser el aspecto que de un vehículo como el que se propone:

¹³⁰ En la actualidad existen muchos tipos distintos de vehículos, que van desde los monovolúmenes con aspecto de nave espacial hasta los que tienen un estilo "retro", imitando modelos famosos y prestigiosos de otras épocas.

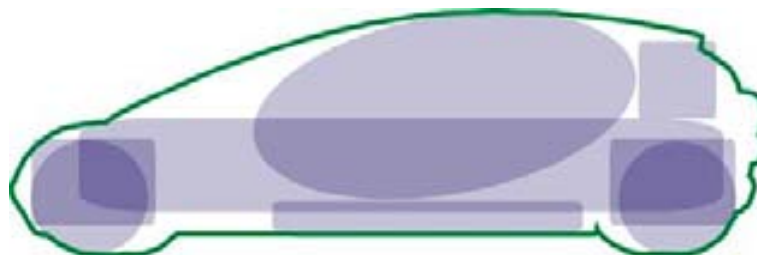
- silueta con “puntos duros”¹³¹:



- silueta con “puntos duros” y silueta del Mercedes-Benz clase E superpuesta:

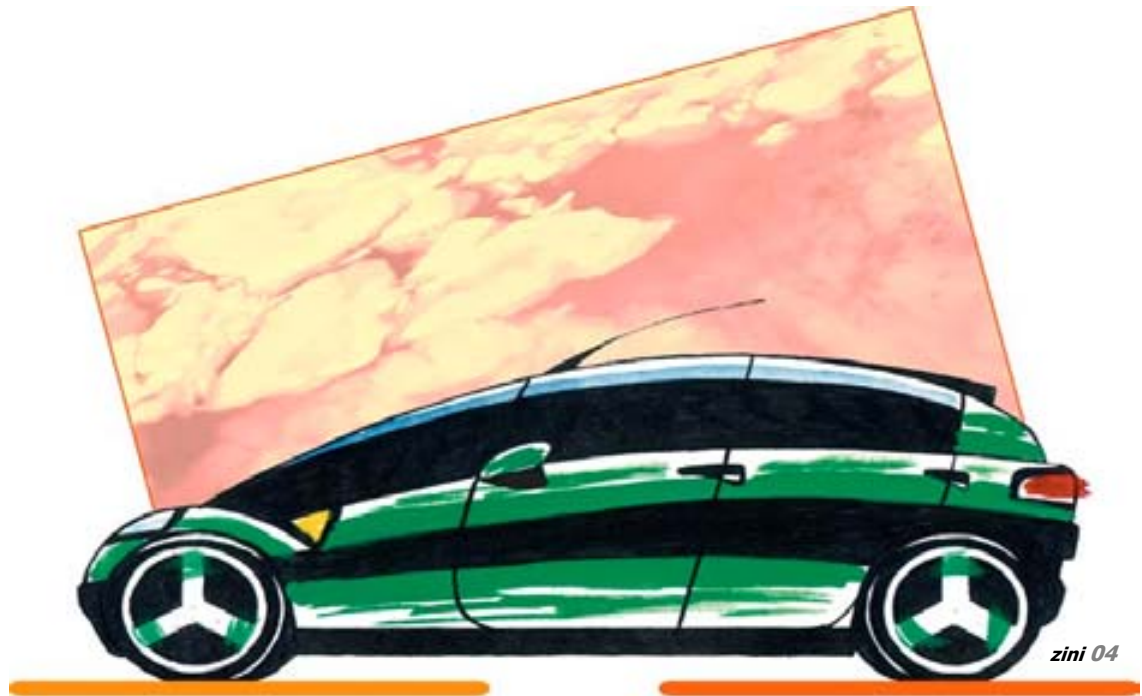


- silueta con “puntos duros” y silueta del diseño definitivo:



¹³¹ Aquellos que definen la silueta general del automóvil.

- diseño definitivo, comparado con el Mercedes-Benz clase E:



Esta única vista lateral del nuevo modelo, si bien esquemática, sirve para demostrar el aspecto exterior que podría tener el vehículo, de líneas modernas y compatibles con la tendencia de los próximos automóviles, manteniendo las dimensiones aproximadas del Mercedes-Benz tomado como referencia, mejorando al mismo tiempo de manera sensible la seguridad de impacto que ofrece este último.

Otras necesidades IV: libertad, individualidad y prosperidad

Hace poco se propuso limitar la libertad del conductor, por lo menos en lo que hace a la posibilidad que tiene de elegir la velocidad máxima de circulación. Pero en definitiva **esa propuesta no hace más que sincerar la cuestión**, ya que los dichos límites, si bien dejados a merced del libre albedrío humano, existen (si bien no siempre son respetados). Lo que parece que no es conveniente modificar, en cambio, es el resto de las elecciones que toma el conductor: qué camino usar, donde detenerse, y el resto de las libertades de la que goza al ser quien decide no sólo a donde va a ir el vehículo que controla, sino de qué manera va a hacerlo. Por eso parece que la automatización de la conducción, analizada a través de distintos estudios, dejando los mandos del automóvil en manos de un sistema central que gestione el tránsito, atenta contra una de las sensaciones fundamentales que da el automóvil a sus usuarios. Si se le quitan las posibilidades de elección, el automóvil será entendido como un servicio público más, y probablemente ya no sea lo mismo. Así en este trabajo **se propone un tipo de vehículo que sea controlado por el conductor**, quien, según parece, no puede dejar de sentir la libertad, individualidad y prosperidad que provee desde hace más de un siglo el automóvil.



El panorama urbano nocturno que, como tantos otros, hipnotiza al conductor de un automóvil, sumergiéndolo en un mundo de sensaciones placenteras, difíciles de igualar cuando no se puede controlar el destino del vehículo que lo transporta.

7.7. Conclusión del capítulo

En materia de seguridad de impacto es mucho lo que se puede hacer para mejorar la protección que ofrece un automóvil a sus ocupantes. A lo largo de este capítulo se han estudiado las innovaciones factibles, que deberán ser analizadas exhaustivamente para determinar su viabilidad técnica y económica, y a las que se pueden sumar otras que surjan de dichos estudios.

Sin embargo, a pesar del notable avance que la implementación de dichas innovaciones puede representar para la seguridad de impacto, lo cierto es que todavía queda por disminuir el riesgo de los accidentes más frecuentes: los choques frontales entre dos vehículos. La incertidumbre que genera la cantidad de energía cinética de auto embestido hace que, inclusive contando con un habitáculo indeformable, los ocupantes tengan la posibilidad de sufrir daños como consecuencias de choques de tipo elásticos y de los cambios instantáneos de velocidad que ellos generan.

En el caso de impactos contra objetos fijos la estructura exterior es la encargada de la absorción de energía de movimiento, mientras que el habitáculo indeformable protege adecuadamente el espacio vital de los ocupantes. Uno de los conflictos más importantes de los diseñadores de automóviles es lograr una carrocería lo suficientemente rígida como para evitar el aplastamiento de los ocupantes pero al mismo tiempo lo suficientemente deformable como para someterlos a aceleraciones tolerables. Como se explicó, la manera de hacerlo es a través de la separación de las funciones, haciendo rígido el habitáculo, deformable la estructura exterior (con exclusividad de esa función) y colocando el resto de los componentes a su alrededor.

Pero los impactos contra otro vehículo obligan a buscar una solución distinta. La incertidumbre de la cantidad total de energía cinética del momento inicial del accidente no se puede compensar a través de un aumento de las dimensiones del vehículo, por las restricciones que impone la red vial existente, y sobre las que se ha hablado anteriormente. Además, tal cual se analizó en este capítulo, aunque cada vehículo tuviera un resorte inelástico en el frente capaz de absorber la energía cinética del impacto, las diferencias de masa o velocidad entre ambos generarían un cambio de velocidad instantáneo, de menor magnitud y peligrosidad que el de un choque de tipo elástico, pero que representa un serio inconveniente al momento de asegurar la supervivencia de los ocupantes de uno de los dos vehículos.

Por lo tanto, el desafío pendiente para el caso de impactos frontales entre dos vehículos, sigue siendo encontrar la manera de absorber la energía de movimiento de los ocupantes sin someterlos a cambios de velocidad instantáneos, solución que una estructura del tipo masa/resorte inelástico es incapaz de proveer. Es decir, el desafío es encontrar la manera de lograr que si el ocupante comienza a ser detenido por los medios de sujeción en un impacto, siempre lo sea en un único sentido, y que no sea obligado a retroceder violentamente, tal como sucede con los medios actuales anclados a una carrocería que en algún momento de un accidente entre dos vehículos es empujada para atrás (por lo menos en el caso de uno de los automóviles).

Reflexión

Este capítulo puede ser el generador de dos sentimientos contrapuestos. Decepción y esperanza. Decepción, por el gran Dios Auto, que se muestra con todos sus defectos y

costados débiles. Decepción, por tomar conciencia de que existen muchas mejoras factibles para que los automóviles sean más seguros, y mientras tanto el peligro de los accidentes de tránsito crece hasta convertirse en una de las principales causas de muerte en el mundo. Decepción, por los diseñadores que deben tomar un diseño donde la seguridad no es una necesidad básica a satisfacer –sino algo similar a un opcional como el aire acondicionado o las llantas de aluminio– y a partir de ese concepto buscar la máxima seguridad posible. Y esperanza, al entender que un automóvil más seguro depende solamente de un cambio de punto de perspectiva. Esperanza, al vislumbrar que una mayor conciencia de parte de los usuarios actuales de automóviles puede ser el comienzo de una verdadera integración entre los fabricantes de vehículos y el Estado, para que a través de un programa de mediano plazo venzan las dificultades que inhiben el desarrollo y comercialización de automóviles seguros. Esperanza, y decepción. Decepción y esperanza; **pero, por lo menos en lo que se refiere al autor de este trabajo, mucho más de la última.**



Imagen de un accidente ocurrido en Italia el 13/03/2003 donde colisionaron aproximadamente 250 vehículos en la autopista Venecia – Trieste. El saldo del incidente incluyó 13 muertos y 102 heridos.

7.8. Referencias del capítulo

- 1) *Description of crash analysis criteria*. Chichos D., de Vogel D., Otto M., Zolsch S. (Workgroup for processing measured data in vehicle safety, algorithm group – 2002)
- 2) *Crash injuries – how and why they happen*. Hyde A.S. (Hyde Associates Inc. – 1992)
- 3) *Traffic safety facts 2000*. (National Highway Traffic Safety Administration – U.S. Department of Transportation – 2002)
- 4) *Aluminum foam applications for impact energy absorbing structures*. Lorenzi L., Fuganti A., Todaro E., Fossat E. (SAE paper 970015 – 1997)
- 5) *World Report on road traffic injury prevention*, World Health Organization, World Bank (2004)

New Hudson
ONLY CAR WITH THE STEP-DOWN DESIGN

ONLY HUDSON BRINGS YOU ALL THIS: Automatic gear shifting with Drive-Master Transmission* • 121 h.p. high-compression Super-Six Engine or 128 h.p. Super-Eight • Chrome-Alloy Motor Block • Dual Carburetion • Fluid-Cushion Clutch • Monobloc Body-and-Frame** • Safety Jack Pads under frame • Full-View Curved Windshield • Wide-Arc Vision • No-Glare Instrument Panel • Super-Cushion Tires • Safety-Type Rims • Weather-Control Heater-Conditioned-Air System*.

*Optional at slight extra cost. **Trade-mark and patents pending.

8. Venta de las innovaciones

"Es nuestro sentir, un sentir profundo, que las medidas en favor de la seguridad de los automóviles no deberían ser el producto de la demanda del público, sino el resultado de la preocupación de los fabricantes de automóviles que siempre deberían adelantarse a aquella demanda".

Sherwood Egbert (Presidente de Studebaker) *al anunciar la instalación de cinturones de seguridad en los asientos delanteros de sus vehículos a partir de febrero de 1963.*

-
- **Evaluación económica del desarrollo de las innovaciones**
 - **Posicionamiento y comercialización**

8.1. Introducción y resumen del capítulo

En un contexto en donde la Humanidad está obligada a desarrollar nuevas alternativas que permitan disminuir los costos sociales y económicos de los accidentes de tránsito, es tan importante definir la estrategia de venta de las innovaciones en materia de seguridad como la manera de maximizar el beneficio de las inversiones realizadas en los nuevos desarrollos. Con la industria automotriz ocurre algo extraño y paradójico a la vez. Sería impensable que un laboratorio medicinal descubriera y diera a conocer al mundo científico una vacuna más eficaz que otra, y que dicha innovación no llegara a quienes la necesitan para dejar de sufrir. Sin embargo, en el mundo del automóvil las reglas son distintas. De hecho el cinturón de seguridad tardó décadas desde su invención hasta que fue introducido como un elemento de serie más. Inclusive hoy en día se puede observar que la evolución de dicho dispositivo (el cinturón de cuatro puntos) de probada mayor eficiencia, brilla por su ausencia en los automóviles modernos. Algunas de las razones que motivan esto se encuentran desarrolladas en los capítulos pasados y es importante, en consecuencia, tener en cuenta que no se puede pensar en recuperar ninguna inversión en investigación y desarrollo si luego no hay manera de obtener un beneficio a partir de la venta de dicha innovación.

Por otro lado, se puede anticipar, de acuerdo a lo que se analizará en este capítulo, que los beneficios económicos derivados de la mejora de la seguridad exceden ampliamente cualquier inversión necesaria para ello. Basta con pensar en que el costo de desarrollar un nuevo automóvil, desde el diseño en lápiz del tablero hasta la puesta en marcha de la producción (incluyendo la ingeniería de detalle y la construcción de las facilidades industriales necesarias) oscila entre los 5.000 y 10.000 millones de dólares, para una vida útil de por lo menos entre cinco y diez años. Y que al mismo tiempo el mundo pierde en su conjunto entre 2 y 3 puntos de su PBI debido a los accidentes de tránsito. Sólo en los Estados Unidos, las pérdidas económicas estimadas alcanzan los 230.000 millones de dólares por año. Suponiendo entonces que entre todos los fabricantes hicieran el esfuerzo en conjunto de desarrollar un automóvil seguro cuyo costo de diseño superara ampliamente los costos actuales, la Humanidad se vería beneficiada, en términos económicos solamente, en una cifra difícil de estimar, pero seguramente superior a los varios cientos de miles de millones de dólares.

Resumen del capítulo

Es imprescindible que, para que las mejoras en términos de seguridad de impacto sean exitosas, se haga una adecuada **evaluación económica del desarrollo de las innovaciones**, de donde se pueden destacar los siguientes aspectos de importancia:

- los primeros cálculos generales indican que el retorno de la inversión por parte del Estado supera los 700.000 millones de dólares sólo en el caso de los Estados Unidos.
- para un fabricante de automóviles el retorno es menor, de apenas unos miles de millones de dólares, que parecen alcanzar, sin embargo, para desarrollar las mejoras necesarias.
- de todas formas el secreto del éxito de la introducción de las innovaciones depende en gran medida de una adecuada política de promoción a fabricantes y

automovilistas de parte del Estado, y a la manera en que se vendan las novedades.

Por eso resulta fundamental establecer una correcta estrategia de **posicionamiento y comercialización** de los nuevos vehículos:

- la historia demuestra que las innovaciones en materia de seguridad no han tenido un gran éxito (incluyendo el cinturón de seguridad cuyo uso debió ser impuesto por ley en la mayoría de los países), a menos que hayan sido introducidos en los automóviles de alta gama, despertando de esta manera en el consumidor el deseo de contar con los dispositivos más sofisticados que existen.
- al mismo tiempo, probablemente sea conveniente mejorar la seguridad en etapas, para dar tiempo al automovilista a acostumbrarse a los cambios, y a percibir a las innovaciones como pasos naturales de una evolución hacia un futuro mejor, en lugar de un retroceso hacia la pérdida de los valores fundamentales del automóvil (los eternos libertad, individualidad y prosperidad).

8.2. Evaluación económica del desarrollo de las innovaciones

Lo primero que se debe hacer es definir con mayor precisión el significado de una inversión. De un texto del ingeniero Luis Jahn (1) se puede obtener dicha definición:

"En términos generales una inversión es una inmovilización o afectación de recursos (costos) en un proyecto determinado, con la esperanza de obtener un beneficio en el futuro."

Ahora bien, para determinar si una inversión (o un proyecto de inversión) es rentable se deben aplicar una serie de técnicas y criterios. En el caso de esta Tesis el estudio va a limitarse a estimar de una manera muy general la conveniencia del desarrollo de las innovaciones propuestas, dado el enfoque abarcativo del problema de la seguridad de impacto. En particular, debido a la calidad y cantidad de información a la que se puede tener acceso, no se llegará a un resultado que permita estimar el retorno de una inversión de este tipo (usando el método de la TIR¹³² por ejemplo), sino que se analizará qué cantidad de dinero puede invertirse como máximo, utilizando técnicas que permitan determinar el Valor Actual Neto (VAN) de los beneficios probables derivados de la introducción de dichas innovaciones. En cuanto al enfoque dado al análisis del proyecto de inversión es de suma importancia tener en cuenta tanto la rentabilidad que obtendría un dado inversor privado, como el impacto que dicho proyecto puede tener sobre la economía y la sociedad en su conjunto.

El Estado como inversor (evaluación social)

Además del criterio cuantitativo que se puede usar para evaluar una inversión también existen métodos subjetivos o cualitativos. Por eso antes de seguir se recomienda una nueva lectura del capítulo 2. En él se explican brevemente los beneficios esperados para la Humanidad que derivan de la disminución del millón de muertes que año tras año generan los accidentes de tránsito. Basta además recordar de ese capítulo que se espera que dicho flagelo aumente en importancia en los próximos años, llegando a representar la tercera causa de muerte en el año 2020. De aquí que no cabe ninguna duda que cualquier inversión de parte de la sociedad en aumentar la seguridad de los accidentes de tránsito –generando menor cantidad de víctimas a través de una disminución de la gravedad de los choques– se traduciría en un enorme beneficio social.

Volviendo ahora al método cuantitativo los beneficios puramente económicos de la disminución de víctimas de los accidentes de tránsito se pueden medir en cientos de miles de millones de dólares. Como ejemplo se va a aplicar el mismo criterio que en el caso del análisis de una inversión privada, estimando en VAN del beneficio esperado de una mejora en la seguridad de impacto. Para ello es necesario volver a analizar los valores indicados para Estados Unidos en el capítulo 2. Del total de pérdidas económicas estimadas para el año 2000, que ascendía a 230.000 millones de dólares, 145.000 millones correspondían a pérdidas de producción y consumo de las víctimas, y a gastos médicos directos. Los otros dos rubros en consideración eran pérdidas y daños materiales, y gastos administrativos. Dado que un nuevo diseño de automóvil, tal como es concebido en esta Tesis, **no disminuiría la cantidad de accidentes sino sólo su gravedad**, no es de esperar una disminución de las pérdidas económicas de los dos últimos rubros, es decir que el beneficio neto esperado de una reducción de las víctimas

¹³² Tasa Interna de Retorno.

de accidentes sería de unos 145.000 millones de dólares, sólo en los Estados Unidos, cada año. Pero lo cierto es que dicha reducción no puede completarse en el corto plazo, de manera instantánea. En el caso de lograr desarrollarse un modelo de automóvil que disminuya la gravedad de los accidentes, se debe esperar a que, a medida que las unidades se vayan renovando, exista una cierta proporción de automóviles "seguros" que irá creciendo con el tiempo. Haciendo una estimación prudente, no es de esperar que antes de 30 años el parque automotor se haya renovado hasta estar en condiciones de no generar víctimas de accidentes. Aún en ese caso, parte de las pérdidas económicas corresponden a víctimas que no circulan en los automóviles "seguros" como peatones, ciclistas o motociclistas, y por lo tanto el beneficio neto puede que no alcance los 145.000 millones de dólares, sino un valor menor. Para este ejercicio se van a considerar 120.000 millones de dólares de reducción. Debido a la progresión del ahorro debido la menor cantidad de víctimas, el beneficio neto va a ir creciendo año tras año, de acuerdo a la siguiente secuencia:

beneficio esperado por disminución de víctimas de accidentes de tránsito en los Estados Unidos [millones de us\$]									
año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8	año 9	año 10
4.000	8.000	12.000	16.000	20.000	24.000	28.000	32.000	36.000	40.000

beneficio esperado por disminución de víctimas de accidentes de tránsito en los Estados Unidos [millones de us\$]									
año 11	año 12	año 13	año 14	año 15	año 16	año 17	año 18	año 19	año 20
44.000	48.000	52.000	56.000	60.000	64.000	68.000	72.000	76.000	80.000

beneficio esperado por disminución de víctimas de accidentes de tránsito en los Estados Unidos [millones de us\$]									
año 21	año 22	año 23	año 24	año 25	año 26	año 27	año 28	año 29	año 30
84.000	88.000	92.000	96.000	100.000	104.000	108.000	112.000	116.000	120.000

Para simplificar los cálculos no se consideró en el cuadro el efecto de la inflación, que probablemente eleve el monto del beneficio¹³³. Pero, conservando el criterio de prudencia, es preferible considerar las cifras expuestas en el cuadro. Por otro lado, para poder calcular el VAN de dicha serie de beneficios, se debe considerar una tasa de descuento. En el caso de un privado, la tasa de descuento es más fácil de establecer, ya que basta con considerar el costo de oportunidad del capital a invertir, que puede ser equivalente a las tasas de interés activas o pasivas del mercado bancario, dependiendo de si se cuenta con el capital necesario o no. En el caso de un Estado el cálculo es algo más difícil, y no es necesario profundizar demasiado en un número que, gracias al criterio de prudencia, no afecta demasiado las conclusiones a las que se quiere llegar. De todas maneras, una tasa de descuento que podría ser considerada válida es la que corresponde a los bonos del Tesoro de los Estados Unidos, que no supera en la actualidad el 1% anual. Para aumentar todavía la precaución del cálculo se va a tomar, sin embargo, una tasa del 5% anual, varias veces mayor. Con todas estas suposiciones, se puede calcular el Valor Actual Neto de los ingresos (en realidad disminución de pérdidas) derivados de la menor cantidad de víctimas de accidentes de tránsito. El va-

¹³³ Sólo como ejemplo, si la inflación en los Estados Unidos fuera del 1% anual durante los próximos 30 años, los 120.000 millones de dólares de ahorro del año 30 se convertirían en algo más de 160.000 millones.

lor puede llegar a sorprender, porque se trata de un valor enorme, pero lo cierto que representa la inversión posible que puede hacer la sociedad de los Estados Unidos para desarrollar un automóvil “a prueba de choques y a prueba de tontos”, citando nuevamente a John Gordon¹³⁴. En definitiva, el VAN citado alcanza el siguiente valor:

- **735.980 millones de dólares.**

El cálculo es lo suficientemente conservador como para ser tenido en cuenta como **punto de partida para evaluaciones con mayor nivel de detalle**, realizadas a través de métodos más precisos y usando valores más cercanos a la realidad. El problema no es entonces el monto de la inversión necesaria para disminuir la cantidad de víctimas de accidentes de tránsito, sino la manera en que la sociedad (es decir el Estado) debe implementar dichas mejoras. Los 735.980 millones de dólares parecen ser más que suficientes para desarrollar miles de prototipos, ensayos y pruebas para poder llegar al diseño de un automóvil “seguro”. Sin embargo, con tener dicho diseño no alcanza, ya que para que exista un vehículo seguro en la calle tiene que haber alguien dispuesto a producirlo y alguien más dispuesto a comprarlo. Por eso se deben tener en cuenta dos aspectos fundamentales. **La industria automotriz raramente acepta regulaciones que puedan afectar sus ventas, y los usuarios de automóviles raramente aceptan cambios que puedan afectar la sensación de libertad, individualidad y prosperidad.** Basta para esto recordar por enésima vez el caso del cinturón de cuatro puntos. O el otro ejemplo que se adapta a este comentario, que consiste en el segundo objetivo del programa NCAP, que se desprende del análisis hecho en el capítulo 6:

*"Incentivar a los fabricantes de autos a mejorar la protección que sus vehículos ofrecen a los ocupantes durante los impactos, y al mismo tiempo a hacer que sean menos propensos a sufrir vuelcos. Es intención del programa que las mejoras se realicen de **manera voluntaria** por parte de los fabricantes en lugar de hacerlo compulsivamente a través de regulaciones".*

Lo cierto es que, más allá de las polémicas a las que dio forma Ralph Nader en la década de los '60, o de las controversias de un Estado intervencionista versus un Estado que fomente la libre empresa y competencia, es que **parece sensato que el Estado actúe de alguna manera para asegurar el bien común.** Y existen varias formas de implementar acciones que eleven la seguridad de los ocupantes de un vehículo a través de la introducción de automóviles más seguros sin imponerlos a través de leyes. Un ejemplo es a través de la disminución de impuestos a los autos más seguros, y el aumento de los mismos a los menos seguros. Esto debería hacerse a través de dos impuestos básicos:

- **el impuesto al valor agregado:** bajo la suposición que el I.V.A es del 21%, los automóviles más seguros podrían pagar sólo el 5%, y los menos seguros el 30% de I.V.A. Así, las empresas que inviertan en producir un automóvil seguro no estarían obligadas a trasladar un eventual aumento de costos de producción a los nuevos modelos, e inclusive podrían gozar de una importante ventaja competitiva con respecto a los fabricantes que no estén dispuestos a cambiar su política.
- **el impuesto a la posesión de bienes** (denominado “patente” en nuestro país): la situación en este caso es similar, y debería premiar a los automovilistas que compren un automóvil seguro, y castigando a quienes no lo hagan. Si, como ocurre en la Argentina, el impuesto a la posesión de un automóvil se acerca al

¹³⁴ Ver capítulo 4.

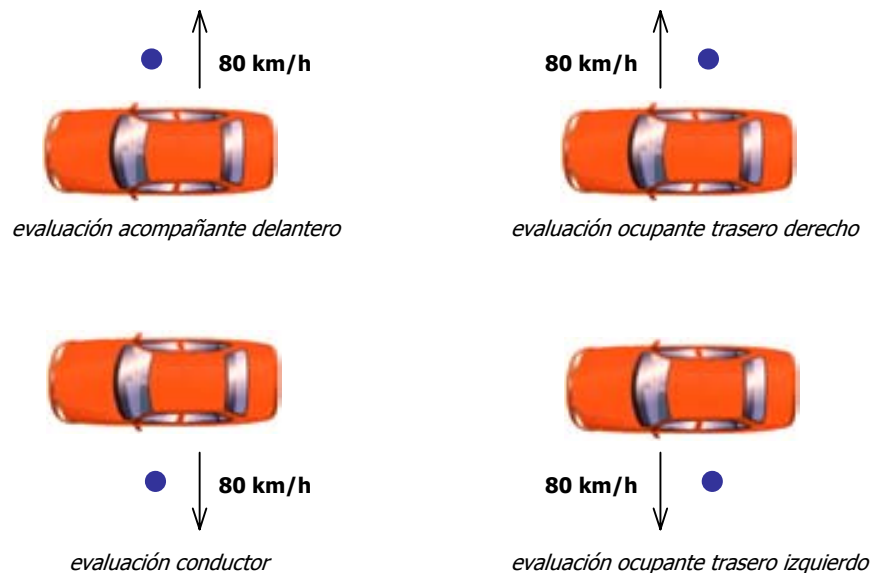
3% del valor del vehículo por año, para los automóviles seguros dicho impuesto podría ser de sólo el 0,5%, y para los vehículos menos seguros del 5%. Tanta asimetría de costos debería ser un argumento de peso para convencer a los automovilistas de comprar los nuevos desarrollos.

Queda por definir entonces la manera en que el Estado debe determinar si un automóvil es más o menos seguro. Y la respuesta es simple, porque se trata de realizar los mismos ensayos de impactos que se hacen en la actualidad, con algunas modificaciones que **permitan comparar homogéneamente todos los vehículos, en las peores condiciones que puede plantear un accidente real**, tal como se sugiere para cada una de las siguientes situaciones:

- **impactos frontales:** impacto del vehículo a ensayar circulando a 130 km/h contra un camión de masa 24.000 kg. circulando a 90 km/h en dirección paralela desfasada y sentido contrario.



- **impactos laterales:** cuatro impactos del vehículo a ensayar a 80 km/h contra un poste fijo, cada uno en el lugar más cercano a cada ocupante del vehículo.



- **impactos traseros:** camión de masa 5.000 kg. circulando a 80 km/h en la misma dirección, con el vehículo a ensayar detenido.



- **vuelcos:** vuelco inducido del vehículo circulando a 130 km/h.



- **incendios:** dos ensayos, induciendo un incendio en la parte anterior y posterior del vehículo a ensayar, midiendo el tiempo en que el automóvil permite retirar a las víctimas del accidente. Además, en cada uno de los ensayos de impacto o de vuelco se debe verificar que no se produzca ningún derrame de combustible ni un evento que pueda derivar en un incendio.

Todos los ensayos que se sugieren son mucho más rigurosos que los actuales. Además, son difíciles de realizar y muy costosos. Bajo las condiciones de las pruebas propuestas **es de esperar que ningún vehículo moderno ofrezca una protección medianamente adecuada a los ocupantes en ninguno de los ensayos excepto el de impacto trasero**. Y en cuanto a un prototipo que incluya todas las innovaciones que se proponen en esta Tesis, debería resultar un automóvil seguro para todos los ensayos menos el primero, que además resulta el más peligroso de todos. Pero dichos ensayos son la única manera de conocer la distancia que separa a la sociedad de contar con un automóvil seguro. De nada sirve que un automóvil sea medianamente seguro en caso de un accidente a 64 km/h contra un objeto fijo, si luego puede chocar a 80 km/h contra otro vehículo que circula en la misma dirección y sentido contrario a 100 km/h y provocar la muerte instantánea de todos sus ocupantes. Un ensayo de impacto a altas velocidades permitirá, además, conocer con detenimiento los mecanismos de deformación de la estructura exterior y del habitáculo, conduciendo las mejoras necesarias. Y parte de los beneficios esperados de la reducción de la cantidad de víctimas podrían ser utilizados para financiar programas de mediano y largo plazo que permitan hacer ensayos con todos los vehículos, en las condiciones recién indicadas, para evaluar adecuadamente el grado de seguridad que ofrecen a los ocupantes en caso de accidente. Los resultados de dichos programas deberían ser similares a los que entrega el programa NCAP¹³⁵, es decir una valuación que otorgue una estrella a los automóvi-

¹³⁵ Ver capítulo 6.

les menos seguros, y cinco estrellas a los más seguros. Dicho puntaje, además, debe darse a la protección de cada uno de los pasajeros del automóvil (en un número de ocupantes que coincida con la homologación del vehículo) y podría basarse en escalas del siguiente tipo:

tabla 8.2

calificación	probabilidad de sufrir heridas serias o fatales
	$60\% \leq P < 100\%$
	$40\% \leq P < 60\%$
	$20\% \leq P < 40\%$
	$5\% \leq P < 20\%$
	$0\% \leq P < 5\%$

Una escala de este tipo impone una alta exigencia a vehículos que están siendo ensayados con un alto rigor. Pero no todo termina aquí, ya que queda un aspecto más de la evaluación. Dicha calificación debería otorgarse a la protección que ofrece el vehículo a cada ocupante homologado, **en cada uno de los ensayos propuestos**. Es decir, que el resultado de los ensayos sería una matriz de las siguientes proporciones (para un vehículo homologado para cinco pasajeros):

tabla 8.3

	impacto frontal	impacto lateral	impacto trasero	vuelco	incendio
conductor					
pasajero delantero					
pasajero trasero derecho					
pasajero trasero izquierdo					
pasajero trasero central					

Como se puede observar, la multiplicidad de calificaciones puede confundir, y es necesario llegar a un único valor que represente qué tan seguro es el vehículo. Una propuesta para solucionar el inconveniente consiste en descartar cualquier ponderación posible, ya que no debe darse una importancia distinta a cada una de las vidas de los ocupantes del vehículo, y considerar que la calificación del vehículo es simplemente **la menor de las calificaciones obtenidas** (2 estrellas para el ejemplo). Para terminar, la reducción propuesta de impuestos ya no será simplemente una función de la seguridad o inseguridad del vehículo en términos absolutos, sino que dependerá del grado de seguridad que dicho automóvil sea capaz de dar a sus ocupantes, **siendo dicha reducción directamente proporcional a la cantidad de estrellas obtenidas**. En definitiva, con una guía coherente y un objetivo ambicioso como horizonte, el fabricante tendría como incentivo la posibilidad de desarrollar un vehículo seguro probablemente más costoso, manteniendo sin embargo el precio de venta sin afectar su contribución gracias a la baja de impuestos, por ende sin que esto provoque una disminución de ventas. Y por el lado del automovilista, también tendría la posibilidad de comprar un vehículo más seguro, al mismo precio que uno menos seguro, pero con un costo operativo menor¹³⁶. Así, se lo-

¹³⁶ No se tienen en cuenta las diferencias que puedan surgir en el costo operativo del vehículo debido a cambios de tipo de energía utilizada (combustión de nafta o electricidad), aunque deben ser tenidos en cuenta al momento del plan de incentivos para la adquisición de automóviles más seguros.

graría que los ingresos derivados de la disminución de pérdidas económicas por una menor cantidad de víctimas en accidentes de tránsito sean financiados a lo largo del tiempo con una menor recaudación de impuestos más la financiación de los programas de ensayos, en lugar de desde el principio con una inversión enorme. Puesto en otras palabras, a medida que las ventas de automóviles seguros aumenten, la recaudación por los impuestos al valor agregado y a la posesión de bienes disminuirán, pero también lo harán las pérdidas económicas derivadas de los accidentes de tránsito, resultando en un beneficio económico prácticamente nulo para la sociedad, que obtendrá en definitiva **el infinitamente mayor beneficio social derivado de la disminución paulatina la pérdida de su bien máspreciado: los seres humanos.**

El fabricante de automóviles como inversor (evaluación empresaria)

Dejando de lado la suposición de que el Estado analiza la conveniencia de invertir en mejorar la seguridad de los ocupantes de los automóviles para evaluar, desde el punto de vista del empresario se puede analizar qué monto de dinero es el que podría invertir en desarrollar un automóvil seguro, sin que esto afecte sus ingresos previstos. Ahora, antes de pasar a dicho análisis se deben indicar algunos aspectos del mercado automotor que son de utilidad para la evaluación que se quiere hacer. Lo primero que se debe dimensionar es el mercado automotor mundial, que para el año 2000 era de algo más de 57 millones de vehículos¹³⁷. La participación de cada fabricante era para ese año la que se describe a continuación:

tabla 8.4

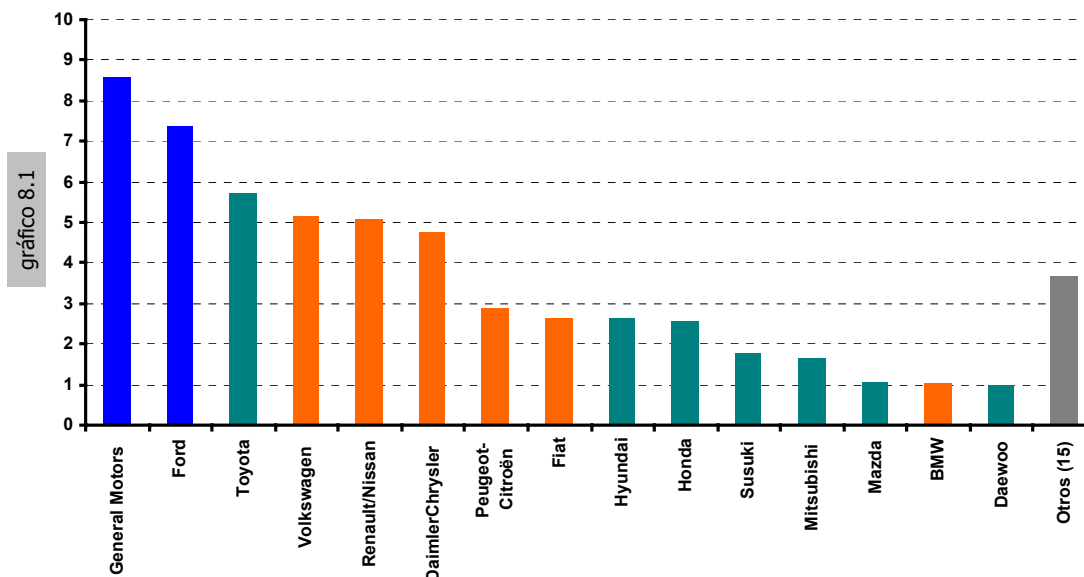
grupo empresario	Ventas [millones de unidades]	share
General Motors	8,59	15,0%
Ford	7,35	12,8%
Toyota	5,70	9,9%
Volkswagen	5,16	9,0%
Renault/Nissan	5,07	8,8%
DaimlerChrysler	4,75	8,3%
Peugeot-Citroën	2,88	5,0%
Fiat	2,65	4,6%
Hyundai	2,63	4,6%
Honda	2,54	4,4%
Susuki	1,77	3,1%
Mitsubishi	1,67	2,9%
Mazda	1,05	1,8%
BMW	1,01	1,8%
Daewoo	0,97	1,7%
Otros (15)	3,65	6,4%
Total mercado mundial	57,44	

Dichos valores se pueden observar también en forma de gráfico de barras, donde además los valores en azul corresponden a los grupos empresarios donde el capital es

¹³⁷ Datos obtenidos de la página web www.autointell.com.

mayoritariamente de origen estadounidense, los valores en celeste a los grupos empresarios de capitales japoneses, y los naranjas a los de capitales principalmente europeos:

ventas mundiales correspondientes al año 2001 por fabricante de automóviles [millones de unidades]



Para simplificar el análisis se van a considerar algunos datos más precisos de un solo fabricante, que represente al grupo empresario promedio, y que tenga presencia en la mayor parte de los segmentos del mercado automotor. Un buen candidato para ello es Volkswagen, para quien se va a estimar cuál es el monto de una inversión en el desarrollo de un automóvil seguro que equivale al ingreso previsto por las mayores ventas. En el siguiente cuadro se pueden observar los índices de importancia de la empresa, tomados de su informe financiero anual para el año 2003¹³⁸:

Tabla 8.5

rubro	año 2003
Ventas [millones de unidades]	5,01
Ventas [millones de dólares]	92.076
Costo variable de ventas [millones de dólares]	81.817
Contribución [millones de dólares]	10.259
Contribución [%]	11%

Con estos valores se puede calcular entonces el precio promedio por unidad vendida, y su contribución:

tabla 8.6

rubro	año 2003
Precio de venta [dólares]	18.360
Costo variable de venta [dólares]	16.315
Contribución [dólares]	2.046

Finalmente, del mismo informe anual se pueden obtener los valores de venta por cada modelo, ya que se va a considerar que la introducción de las mejoras no se realizan en

¹³⁸ Para transformar los € en us\$ se consideró un tipo de cambio de 1 € = 1,20 us\$.

toda la gama de vehículos simultáneamente, sino que se haría en tres fases, de acuerdo al posicionamiento de cada marca o modelo¹³⁹:

marca	modelo	miles de unidades	fase
Volkswagen	Passat	727,6	1
Volkswagen	Golf	647,1	1
Volkswagen	Polo	422,0	3
Audi	A4	324,6	1
Volkswagen	Bora	320,0	2
Volkswagen	Gol	274,0	3
Škoda	Fabia	261,8	2
SEAT	Ibiza	220,5	2
Audi	A3	159,5	1
Škoda	Octavia	156,5	2
Audi	A6	151,0	1
Volkswagen	Jetta	142,0	2
Volkswagen	Touran	136,5	3
Volkswagen	New Beetle	110,5	2
SEAT	León	96,5	2
Volkswagen	Polo Classic	84,3	2
Audi	Otros Audi	79,2	3
Volkswagen	Touareg	59,6	3
SEAT	Córdoba	59,3	2
Volkswagen	Sharan	46,0	3
Volkswagen	Lupo	42,7	3
SEAT	Toledo	36,0	2
Audi	A2	27,3	3
SEAT	Alhambra	23,7	3
Audi	A8	21,7	1
Škoda	Superb	19,3	3
Volkswagen	Parati	18,9	3
SEAT	Arosa	13,8	3
Volkswagen	Fox	10,4	3
SEAT	Inca	10,0	3
Volkswagen	Beetle	7,6	3
Volkswagen	Phaeton	5,9	1
Lamborghini	Lamborghini (varios)	1,3	3
Bentley	Bentley (varios)	0,8	3
Total Volkswagen¹⁴⁰		4.717,9	

Se pueden ahora resumir los datos que se van a usar para el análisis:

¹³⁹ En la próxima sección de este capítulo ("Posicionamiento y comercialización") se encuentra una explicación más detallada del porqué de las divisiones en etapas y el criterio para colocar a cada modelo en la etapa correspondiente al cuadro.

¹⁴⁰ El total incluye solamente automóviles.

- la venta anual de automóviles de Volkswagen es de 4.717.900 unidades.
- 2.037.400 de unidades corresponden a los vehículos de la primer fase de introducción de mejoras.
- 1.487.400 de unidades corresponden a la segunda fase.
- 1.193.100 de unidades corresponden a la tercera fase.
- la contribución de cada vehículo es de 2.046 dólares¹⁴¹.

A lo que se le pueden adicionar las siguientes consideraciones de borde:

- el período de análisis de la inversión es de 9 años (los correspondientes a la vida media de un modelo exitoso).
- dicho período está dividido en tres fases de tres años, en donde las mejoras se irán incorporando paulatinamente a toda la gama de vehículos producidos.
- la introducción de mejoras en los vehículos no modifica su contribución (el posible aumento de costos variables sería compensado por un aumento de precio, de manera de mantener la contribución sin variación¹⁴²).
- dicha introducción de mejoras aporta un 10% adicional de volumen de ventas, correspondientes tanto a los clientes que deciden comprar Volkswagen en lugar de otras marcas por haber desarrollado un vehículo más seguro y a los que deciden comprar porque quieren cambiar su vehículo viejo (y menos seguro) por uno de nueva generación.
- las modificaciones hechas en el diseño de los vehículos no afectan los gastos fijos de la empresa.
- para llegar a un resultado prudente, se supone que en los 9 años considerados no se produce aumento de ventas, manteniéndose el total en 4.717.900 automóviles (más el adicional de vehículos que generan las mejoras en seguridad).

En función de todo lo indicado se puede construir la siguiente tabla, que resume la cantidad de vehículos adicionales que se venderían en cada año considerado (todos los valores se indican en miles de automóviles):

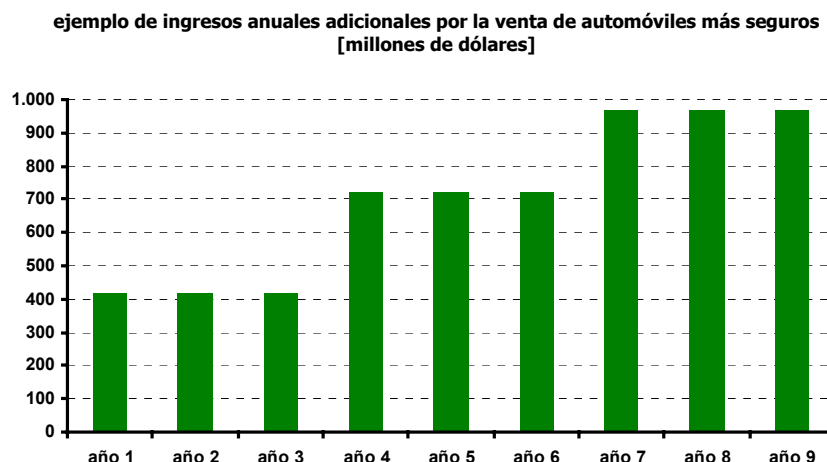
tipo de vehículo	fase 1			fase 2			fase 3		
	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8	año 9
"viejos"	2.681	2.681	2.681	1.193	1.193	1.193	0	0	0
"nuevos"	2.037	2.037	2.037	3.525	3.525	3.525	4.718	4.718	4.718
"nuevos" adicionales	204	204	204	353	353	353	472	472	472
total de vehículos vendidos	4.922	4.922	4.922	5.071	5.071	5.071	5.190	5.190	5.190

Si además a esto se agrega, tal como se consideró anteriormente, que la contribución adicional de cada vehículo es de 2.046 dólares, se puede obtener el ingreso neto marginal que generaría la inversión en desarrollar un tipo de vehículo más seguro que el actual:

¹⁴¹ Por motivos de simplificación se va a considerar la misma contribución para todos los modelos de todas las marcas, si bien en la realidad esto no es así.

¹⁴² Una alternativa a esto es que el Estado disminuya la carga impositiva para los autos más seguros, como se dijo anteriormente.

gráfico 8.2



Es decir, que la introducción de las innovaciones en materia de seguridad podría aportar, bajo todas las condiciones de borde indicadas, una contribución adicional que en los primeros tres años sería de unos 400 millones de dólares, para acercarse a 1.000 millones de dólares en los últimos tres años considerados. Si se calcula el VAN con una tasa de descuento del 10% (el doble de la usada para el Estado, y de una magnitud extremadamente alta) dicho índice toma el siguiente valor:

- **3.739 millones de dólares.**

Eso sería, con todas las consideraciones hechas, y teniendo en cuenta que se trata sólo de un ejercicio teórico, lo que una empresa automotriz (que tiene una participación de apenas el 9% del mercado total) podría invertir en el desarrollo de un vehículo más seguro, esperando recuperar la inversión en 9 años.

Un comentario que vale la pena hacer al respecto consiste en que se debe tener en cuenta que el desarrollo completo de un vehículo tiene un costo que supera varios miles de millones de dólares, que deben ser gastados sin importar si el vehículo es seguro o no. Ese desarrollo, que va desde el diseño en un papel del aspecto exterior hasta la producción de los primeros automóviles que serán comercializados, dura un tiempo que puede oscilar entre los tres y los cinco años.



Construir el prototipo SSR de Chevrolet costó unos pocos millones de us\$. Llevarlo a la producción costará miles de millones más.

En general todo el desarrollo citado se divide en ocho etapas:

- 1) decisión del aspecto definitivo del modelo (punto de "congelamiento del diseño).
- 2) exploración de todos los aspectos de importancia del diseño, comercialización y desarrollo técnico.
- 3) preparación de las distintas alternativas de soluciones tecnológicas y de comercialización del modelo.
- 4) elección de las alternativas de comercialización y tecnológicas que cumplan con los objetivos estratégicos del modelo.

- 5) diseño detallado y definitivo de los componentes del vehículo; definición de cuáles componentes se fabricarán y cuales serán comprados a terceros; construcción del herramental para los componentes propios.
- 6) inicio de la producción de los componentes pre-serie, corrigiendo los posibles errores de diseño.
- 7) inicio de la producción de vehículos para realizar los ensayos correspondientes.
- 8) inicio de la producción en serie del modelo.

La mayoría de estas etapas tendrán un costo que será independiente del grado de seguridad del automóvil. Excepto las etapas 2, 3 y 4, el resto necesitarán del mismo esfuerzo para un modelo similar a los actuales, o para un automóvil como el que se propone. Por eso es importante resaltar que los algo más de 3.700 millones de dólares son una cantidad adicional a los varios miles de millones que en la actualidad cuesta llevar a cabo las ocho etapas descritas, y que parecen suficientes para lograr dicho objetivo. Con una consideración adicional: si Volkswagen desarrolla un tipo de vehículo más seguro que sea exitoso desde el punto de vista comercial, lo más probable es que el resto de los fabricantes sigan la misma tendencia, gastando un monto enorme en desarrollar algo que no sólo tiene una alta dificultad, sino que varias empresas lo estarían haciendo simultáneamente, seguramente malgastando recursos económicos y humanos. Parecería más sensato entonces, **apostar a acuerdos entre empresas, que podrían amortizar de mejor manera las inversiones necesarias en los desarrollos**, quedando esta decisión supeditada a las políticas de cada fabricante.

8.3. Posicionamiento y comercialización

Hay algo que resulta fundamental para esta Tesis. Y que consiste en la siguiente pregunta:

¿Por qué, si la tecnología actual permite desarrollar automóviles más seguros, y la cantidad de dinero que se puede invertir en ello (para tener un retorno aceptable de la inversión) supera ampliamente los requerimientos financieros de esos desarrollos, no hay ningún fabricante que esté diseñando un vehículo sustancialmente más seguro que los actuales?

Para responder a esa pregunta se puede empezar por citar, una vez más, a Carl Sagan quien decía en 1998 (2):

*"El diseño de un tipo de automóvil nuevo, **seguro**, de consumo eficiente, limpio y que tenga en cuenta el efecto invernadero va a promover tecnologías novedosas y va a reportar importantes ingresos a quienes encabezan ese avance técnico."*

Ahora bien, nada indica que desde ese año a la actualidad las innovaciones en materia de seguridad de los automóviles hayan cambiado la situación. En realidad el problema es peor que en la época en que Sagan escribió ese libro, porque los autos son más veloces y pesados¹⁴³, y por ende con un mayor potencial de generar daños, mientras que **los dispositivos de seguridad son básicamente los mismos**. Sin embargo, en la afirmación de Sagan se encuentra el concepto que explica porqué no se avanza todo lo que se podría en materia de seguridad. En esa frase hay dos palabras que se deben tener en cuenta y sobre las cuales es necesario analizar su significado: "nuevo" y "seguro". Para la primera palabra no existen dudas, y justamente una de las columnas que sostienen esta propuesta es la generación de un diseño completamente nuevo, olvidando definitivamente la herencia de los carruajes movidos por pequeños motores ineficientes de principio del siglo XX, haciendo una profunda reingeniería del diseño, pensando sobre todo en la seguridad. En cambio la segunda y más importante de las dos palabras es mucho más vaga, se presta a distintas interpretaciones, y justamente ese el problema: **si un automóvil es seguro o no depende del grado de seguridad que cada protagonista considera aceptable**. Para muchos los automóviles actuales pueden ser suficientemente seguros. Para otros puede alcanzar con observar que un millón de personas mueren anualmente a causa de los accidentes de tránsito para concluir que no lo son. O que no existen ensayos que aseguren que un automóvil moderno puede proteger a los ocupantes en caso de un impacto a la velocidad que son capaces de desarrollar. O que ni siquiera a las velocidades de circulación legales un auto moderno es capaz de resistir un impacto frontal contra otro vehículo.

Pero la determinación del grado de seguridad satisfactorio para un automóvil –en la situación actual– no se puede hacer a través de un estudio como éste, ni a través de la consulta a los expertos. Porque **esa determinación la hace todos los días el usuario que compra un automóvil, a quien probablemente le importe poco el grado de la seguridad de impacto de su futuro vehículo**. O mejor dicho, sí le puede importar, por lo menos mucho más que hace unos años atrás, pero confía en que si el Estado autoriza a producir un vehículo, éste estará diseñado con todos los elementos de seguridad necesarios. Mira una publicidad en donde un automóvil es lanzado a 64 km/h contra un objeto fijo y se tranquiliza. El futuro usuario de un automóvil no se pregunta

¹⁴³ Ver capítulo 4.

por la magnitud de aceleración que alcanzó el pecho del “dummy” del ensayo. Ni tampoco va a medir la longitud del resorte inelástico del frente del automóvil para calcular, en función del coeficiente de rigidez y la masa del vehículo, la velocidad máxima a la que puede chocar sin que se produzca un choque de tipo elástico. Mucho menos va a leer ningún artículo sobre la devastación que puede generar en el cuerpo humano el cambio instantáneo de velocidad que se produce durante el choque de tipo elástico. Es más, probablemente tampoco sepa qué es un choque de tipo elástico. Y éste es el aspecto fundamental del problema. ¿Por qué no se desarrolla un automóvil más seguro? Probablemente **porque los automovilistas no lo demandan. Confían en que el gran Dios Auto es todo lo seguro que debe ser, con una ingenuidad pasmosa que no les permite ver con claridad la tragedia que enfrenta la Humanidad en los accidentes de tránsito.**

Con una pequeña consideración. Los automovilistas tampoco demandan vehículos más livianos o movidos con energía eléctrica. A la gran mayoría de los automovilistas no les preocupa el efecto invernadero ni las posibles consecuencias que la descarga de los gases de combustión tiene sobre la atmósfera y el clima planetario. Pero que los automovilistas consideren que los automóviles son todo lo ecológicos que deberían ser, no cambia el hecho comprobado que no lo son (aunque sí permite que las mejoras tecnológicas que cambiarían la situación no lleguen a los automóviles de producción en grandes series). En definitiva, todo indica que los automóviles deben ser más livianos y ser movidos por energía eléctrica para contaminar menos la atmósfera, y que para ello sería necesario usar materiales de menor masa específica como el aluminio y dejar de usar motores de combustión interna. Todo indica, también, y volviendo por último al tema principal de la Tesis, que los automóviles deberían ser mucho más seguros de lo que son y, sin embargo, los pocos dispositivos que se desarrollan en la actualidad no alcanzan a compensar los riesgos crecientes. Pero al menos hay algunos modelos de automóviles con carrocería de aluminio, y algunos otros con motores eléctricos o híbridos, mientras que no existen vehículos mucho más seguros que el promedio. Es decir, existen fabricantes que señalan la tendencia futura con vehículos como el Audi A8 o el Toyota Prius quienes –contra la corriente del mercado– sostienen que es útil para su estrategia empresarial contar con vehículos distintos, más parecidos a los de las próximas décadas que a los actuales. Al mismo tiempo, **no hay nadie que proponga un diseño completamente innovador en materia de seguridad.** En el mundo del automóvil, inclusive los dispositivos de probada mayor eficacia como el cinturón de 4 puntos no tienen cabida, por las dudas que genera en cuanto a la posibilidad que su introducción afecte las ventas. A lo que se suma un hecho bastante importante: cada mejora en los dispositivos de seguridad implica asumir una realidad: que los automóviles no son seguros, que son mortalmente peligrosos, que no son perfectos. De ahí, el rechazo a los grandes y fundamentales cambios que son necesarios en la seguridad de impacto. Como un adolescente que se niega a asumir su adultez, el automóvil después de cien años se niega a asumir esa realidad: **que no es un Dios, que es imperfecto, que es la causa de millones de muertes, y que debe proteger de mejor manera a sus ocupantes cuando sufren un accidente.** Y como muestra de la dificultad que ofrece la introducción de mejoras en la seguridad basta con hacer un breve análisis de lo que ocurrió con quienes lo propusieron en el pasado.

Presentaciones de innovaciones en materia de seguridad

En cada una de las exposiciones de automóviles se presentan anualmente cerca de una docena de prototipos, o “concept cars”. Las más importantes probablemente sean la de Frankfurt, Tokio, y Detroit donde se dan a conocer las novedades de relieve de

los productores europeos, japoneses y norteamericanos respectivamente. Haciendo un análisis superficial del tipo de prototipos que se presentan en cada feria, los productores japoneses se concentran en proponer muchas más innovaciones que sus competidores europeos o norteamericanos (aunque muchos de los prototipos jamás se fabriquen), quienes prefieren evaluar la respuesta del público a distintas nuevas soluciones estilísticas.

También se puede decir que existe una diferencia entre los fabricantes del viejo continente que proponen diseños de gusto más global, y los americanos que se preocupan más por investigar qué es lo que demanda el consumidor de su país (que en materia de estilo exterior es bastante distinto a lo que demanda el resto del mundo). Sin embargo, hay algo notable que comparten todos los fabricantes, y es que ninguno propone soluciones innovadoras en materia de seguridad.



Los prototipos de las exposiciones exploran muchos aspectos del diseño (como la apertura de puertas del futuro Peugeot 1007).

Como se dijo anteriormente, el único prototipo de la actualidad completamente dedicado a la seguridad es el Volvo SCC, que data del año 2001. Al mismo tiempo existen vehículos dedicados a explorar no sólo los requerimientos de motores no contaminantes. También se buscan decenas de nuevas soluciones a otras necesidades de los automovilistas, como distintos diseños exteriores, mejoras al uso de los espacios del habitáculo y al confort del mismo, o aumentos innecesarios de prestaciones, entre otras que, de acuerdo a lo explicado, **ya están siendo satisfechas aceptablemente**. Paradójicamente, y pesar de que la seguridad es una necesidad insatisfecha ninguno de las decenas de prototipos que se presentan anualmente exploran (como tema principal) el aumento de la eficacia de la protección a los ocupantes en caso de impacto. Para tener un antecedente del Volvo SCC hay que retroceder unos 30 años. El ya descrito Volvo VESC¹⁴⁴, donde se proponían una serie de innovaciones, entre las cuales una de las más importantes era el aumento notable de la longitud del paragolpes. Esa notable característica señalaba precisamente la necesidad de alejar lo más posible el primer punto del impacto del habitáculo, si bien desde el punto de vista estético la solución no parecía ser la mejor.

De hecho ese modelo conceptual, que significó al mismo tiempo un cambio importante desde lo estilístico, fue la base de uno de los modelos más exitosos (y famosos) del fabricante sueco: el Volvo 240. Con la salvedad que el discutible paragolpes del VESC fue sustituido por uno mucho más convencional. Lo que en definitiva redundó en un vehículo mucho más fácil de comercializar, pero también en un vehículo menos seguro que aquél que lo inspiró.



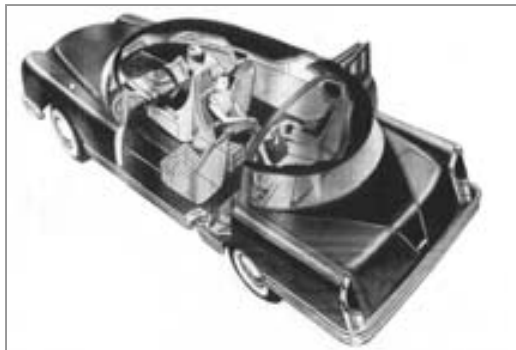
En el Volvo 240 los paragolpes del VESC habían dejado lugar a otros dispositivos similares a los del resto de los automóviles.

Lo notable es que, a pesar de no haber incorporado la totalidad de las innovaciones propuestas, el modelo 240 **ayudó a posicionar a Volvo como un proveedor de se-**

¹⁴⁴ Ver capítulo anterior.

guridad, aumentando sus ventas en lugar de disminuirlas. Yendo más atrás en el tiempo todavía, hacia fines de la década de los '50, en un esfuerzo conjunto de la compañía de seguros Liberty Mutual Insurance Company y del Cornell Aeronautical Laboratory se desarrolló un prototipo de automóvil pensado exclusivamente para mejorar la seguridad, y particularmente la de impacto.

El Survival Car I se diseñó en función de proteger de la mejor manera posible al ocupante del un automóvil en caso de impacto, bajo un lema que proponía "embalar al pasajero"¹⁴⁵. De los 65 dispositivos de seguridad que presentaba el vehículo, 41 tenían como objetivo minimizar los daños a los automovilistas en caso de que ocurriera un accidente. Uno de ellos consistía en un tablero suave, similar a un colchón que protegía al pasajero de los golpes al moverse hacia delante.



Algunas de las innovaciones propuestas en el Survival Car I desarrollado entre 1952 y 1957 nunca fueron adoptadas.

Otras mejoras de importancia eran:

- a) la inclusión de apoyacabezas para prevenir daños al cuello en los accidentes traseros.
- b) butacas de tipo envolvente que ofrecían una protección adicional al pasajero en caso de intrusión de objetos al habitáculo.
- c) un volante de diseño completamente original, similar al de una moto (es decir una varilla con dos manijas) delante del cual había un almohadón que protegía el pecho del conductor.
- d) cinturones de seguridad para todos los pasajeros.
- e) una redistribución de los asientos de manera de ubicar al conductor en el centro del vehículo, a uno de los acompañantes inmediatamente detrás, pero ubicado con la espalda hacia delante, tres asientos traseros y dos asientos adicionales, uno a cada lado del conductor, con la capacidad de desplazarse sobre rieles para modificar su posición y permitir el acceso al automóvil (de esta manera se generaba un espacio interior lo suficientemente amplio para asegurar que en caso de accidente los ocupantes no golpearan ninguna parte del vehículo ni al resto de los ocupantes).
- f) una estructura interior reforzada, con barras antivuelco incorporadas en el habitáculo, y puertas plegables (como las de una cabina telefónica) para que pudieran permanecer en su lugar en caso de accidente aumentando la resistencia estructural del espacio que rodea a los ocupantes.
- g) formas redondeadas en el exterior y ausencia de todo borde para disminuir los daños potenciales a los peatones en caso de impacto.

En definitiva, muchas de las innovaciones del Survival Car I surgieron de la aplicación de algunas de las bases de la seguridad en accidentes que se analizaron al principio del capítulo 6. Varios de los conceptos que se proponen aquí para el habitáculo y la estructura interior estaban ya contemplados en dicho prototipo. Tal vez lo único importante que le faltaba para completar una adecuada protección en caso de impacto era una propuesta para que la estructura exterior permitiera una mejor absorción de la energía cinética para disminuir la magnitud de la desaceleración de los ocupantes, pero se debe recordar que en

¹⁴⁵ "Packaging the passenger", en inglés.

1957 los automóviles circulaban a una velocidad sensiblemente inferior a la que desarrollan hoy en día. A partir de su presentación a fines de la década del '50 el Survival Car I despertó un enorme interés en el público y en los responsables de reducir la cantidad de víctimas de accidentes, pero no logró interesar a la industria automotriz, **que tenía miedo que las modificaciones propuestas afectaran sus ventas**, a pesar de que en la actualidad, cerca de 50 de los 65 dispositivos de seguridad del prototipo se encuentran en los automóviles de serie, incluyendo por supuesto los apoyacabezas y el cinturón de seguridad. Este rechazo de la industria generó el desarrollo de otros prototipos agrupados bajo la denominación Survival Car II. Estos "concept cars" del momento ya no partían de un diseño completamente original para "ir de lo seguro hacia el resto" sino que volvían a más tradicional "de lo que está diseñado hacia lo más seguro que pueda hacerse". Por eso la Liberty Mutual Insurance Company y el Cornell Aeronautical Laboratory tomaron cuatro automóviles de serie de la época¹⁴⁶ e introdujeron en ellos varias mejoras. Las principales fueron el diseño de una columna de dirección capaz de colapsar en caso de accidente; butacas envolventes de enorme resistencia a los impactos; y un sistema de extinción de fuego en el compartimiento del motor que se activaba automáticamente en caso de incendio. Lamentablemente los nuevos prototipos volvieron a despertar el interés de quienes se preocupaban por la seguridad de los automovilistas, pero las mejoras introducidas por los Survival Car II se limitaban a pequeños avances sobre un diseño estructuralmente poco seguro, y si bien la columna de volante retraíble fue adoptada en muchos vehículos, no se puede decir que los dispositivos de seguridad propuestos hayan cambiado por completo la manera de diseñar los automóviles. Haciendo un último salto hacia atrás, hacia el año 1948 se puede observar que un vehículo, cuyo lanzamiento estuvo precedido por enormes polémicas¹⁴⁷, incorporaba en su diseño algunos elementos de seguridad totalmente innovadores. Se trata del famoso Tucker, salido de la mente de un brillante emprendedor que libró una batalla desigual contra las grandes corporaciones automovilísticas para terminar produciendo algo más de cincuenta unidades de un vehículo que no sólo tenía innovaciones en materia de seguridad sino también en otros aspectos del diseño. El Tucker que llegó en cuentagotas al consumidor norteamericano en el primer año donde la economía volvía a la normalidad luego de la Segunda Guerra Mundial, estaba diseñado a contracorriente de los vehículos de la época.

Tenía un motor refrigerado por aire, en posición trasera¹⁴⁸, y por primera vez los ingenieros de la compañía habían realizado ensayos de impacto en algunos prototipos para evaluar la mejor manera de proteger a sus ocupantes. Así se modificó el diseño de los parabrisas que se desprendían en caso de ser golpeados por los ocupantes delanteros, y se aumentó de manera importante el espacio con el que contaban los ocupantes para moverse sin golpear ningún objeto, reduciendo el tablero a su mínima expresión.



El Tucker de 1948 fue diseñado teniendo en cuenta la seguridad de impacto, e incluía la eliminación del peligroso tablero.

Lamentablemente la compañía no pudo continuar con la producción en medio de serias controversias y acusaciones cruzadas con los otros fabricantes de automóviles, y la seguridad de impacto debió esperar muchos años para volver a ser tomada en cuenta, ya no en un prototipo, sino en un automóvil de producción en serie como era el

¹⁴⁶ Por ejemplo un Chevrolet Bel Air de 1961.

¹⁴⁷ Sobre las cuales se basó el argumento de una película.

¹⁴⁸ La misma configuración del exitoso "escarabajo" de Volkswagen.

malogrado Tucker. Finalizado el repaso de los fracasos o éxitos parciales de la historia de la seguridad, es tiempo de pasar a las victorias (que, desafortunadamente no son tantas). Existen dos elementos que lograron ser introducidos en los vehículos modernos y que representan uno de los éxitos comerciales más importantes de los dispositivos que hacen del automóvil un objeto más seguro: los frenos ABS y el airbag.

Ambos elementos fueron introducidos en los automóviles de producción en serie varios años después de haber sido inventados y ensayados. Recién en 1985 (frenos ABS) y en 1987 (airbag) una fábrica apostó a ofrecerlos en un vehículo de su línea estándar, y justamente en el de más alta gama: el Clase S de Mercedes-Benz. Hasta ese momento la introducción de dispositivos de seguridad dependía del grado de presión que los fabricantes recibían desde el Estado.



En 1985 el Mercedes-Benz Clase S ofrecía frenos ABS. Dos años más tarde el mismo vehículo incluía también airbags delanteros

Y si bien Volvo había sido uno de los primeros en ofrecer cinturones de seguridad unas décadas atrás, dicha introducción no hizo que el resto de los fabricantes siguieran su ejemplo. En cambio con Mercedes-Benz y la presentación de los frenos ABS y del airbag ocurrió algo completamente distinto. Al poco tiempo no sólo la mayoría de los fabricantes ofrecían variantes de los frenos ABS y del airbag de Mercedes-Benz, sino que rápidamente los dispositivos comenzaron a ofrecerse en los automóviles de menor valor, para extenderse en menos de quince años a la totalidad de la gama de la mayoría de las marcas del mundo. Lo cual **prueba que la seguridad no siempre perjudica las ventas**. Hoy sería impensable ofrecer un automóvil exitoso que no ofreciera airbag si bien la eficacia de dicho dispositivo es menor de lo que la mayoría puede pensar —como se explicó en el capítulo 6—. Por otra parte tampoco se puede negar el hecho que la situación actual es distinta a la de mediados de la década de los '80, y que todo parece indicar que **el usuario de automóviles está mucho más predispuesto que antes a recibir innovaciones en materia de seguridad**. Lo cual no es lo mismo que las demande. Sólo que es mucho más consciente que antes de la importancia de viajar en un automóvil seguro, y éste parece ser **el momento justo para introducir mejoras que impacten y que generen buenos resultados**, tanto en lo que se refiere a la mejora de la protección de los ocupantes en caso de impacto, como en las ventas y el resultado económico de las empresas automotrices.

Una estrategia posible

Ya se dijo que parece ser muy difícil forzar a los fabricantes de automóviles a introducir cambios radicales en materia de seguridad. Y que al mismo tiempo el desarrollo de prototipos que exploren esta problemática no genera un aumento de la demanda de estos vehículos, que probablemente sean percibidos por el público solamente como rarezas. Es decir que, en definitiva, la única manera de vender exitosamente un automóvil más seguro **es a través de la propuesta seria de parte de los fabricantes (al menos de uno de los más importantes) de cambios en los automóviles de producción, especialmente en aquellos de las gamas más altas**, tal como hizo Mercedes-Benz con el airbag y con los frenos ABS. Esto fue lo que llevó a segmentar la introducción de las mejoras en la evaluación empresarial que se hizo al principio de este mismo capítulo. Para el ejemplo se tomó a la empresa Volkswagen, y se consideró que la introducción de los nuevos dispositivos debía hacerse en los modelos más prestigio-

sos de Volkswagen (Phaeton y Passat) y en casi todos los modelos de Audi. Para afianzar la apuesta se agregó el Volkswagen Golf, que es el modelo insignia del grupo empresario, justamente para indicar de esta manera que la empresa confía en las mejoras propuestas y que quiere extender los beneficios a la mayoría de los futuros usuarios. Para la segunda etapa quedaron los vehículos de las otras marcas del grupo como SEAT o Škoda, y en la tercera los vehículos sobre los cuales las mejoras serían más difíciles de introducir, especialmente los de dimensiones reducidas (Volkswagen Polo) o los deportivos (Audi TT).

Lo importante de esto es que el público perciba los cambios como una mejora, y no como una imposición¹⁴⁹. Un buen ejemplo de esta filosofía de apuesta al cambio la dan tanto el Audi A8 como el Toyota Prius. Ambos vehículos representan el futuro. Son los pioneros, respectivamente, de la utilización del aluminio y los motores eléctricos. Y además son dos vehículos que hace años que mantienen esa filosofía, y con cada nuevo modelo la sostienen.



La estructura de aluminio del Audi A8, que representa la probable evolución de los automóviles en los próximos años.

Esto es distinto a lo que ocurrió con la General Motors Company y su vehículo eléctrico de producción en serie: el EV1. Luego de ofrecerlo durante algunos años en operaciones de "leasing" sin opción de compra¹⁵⁰ la compañía decidió abandonar el proyecto. El problema que surge de esta actitud es que muchos futuros compradores de automóviles eléctricos pueden haber sentido que si la compañía automotriz más poderosa del mundo no conseguía diseñar un vehículo eléctrico exitoso, los automóviles eléctricos eran una utopía, y que se debía esperar varias décadas hasta que el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles obligara a la industria a proveer al mercado de vehículos eléctricos. Sin embargo, existen otros vehículos que se suman al Toyota Prius como el Honda FCX que no sólo no interrumpieron la producción en serie (aunque sean limitadas), sino que apuestan a automóviles cada vez más eficientes, y probablemente queden como los pioneros de la energía eléctrica, posicionando la marca favorablemente. En el caso de la seguridad de impacto la situación es análoga. No parece ser conveniente desarrollar un vehículo "seguro" que sea producido durante un tiempo corto y luego sea discontinuado. **La empresa que lo diseñe debe indicar al público que los automóviles del futuro serán así, y que las modificaciones llegan para quedarse.** Sin embargo, es probable que sea conveniente realizar un escalonamiento de la introducción de las mejoras, similar a las etapas propuestas para el ejemplo que se indicó para Volkswagen. Y esto no tiene que ver únicamente con la dificultad que implica desarrollar un nuevo modelo de automóvil con numerosos cambios, sino a que también se debe dar a los usuarios un cierto período de adaptación a esos cambios. Ésta es una de las razones que llevaron a proponer las mejoras de acuerdo a los distintos conjuntos funcionales del vehículo, pero luego a integrarlos de manera que resultara un vehículo lo más parecido a uno actual, tanto en las dimensiones como en la forma y en su espacio interior. De hecho el habitáculo es el mismo, y la forma final se asemeja bastante a una fusión entre un monovolumen y un vehículo "todo terreno".

¹⁴⁹ El cinturón de seguridad, luego de varios años de ser impuesto por ley en la mayoría de los países y de haber demostrado ser la razón de la disminución de cientos de miles de muertes por año, todavía es percibido por los automovilistas como una molestia en lugar de una mejora, y muchos se niegan a usarlo.

¹⁵⁰ El propietario del automóvil es la empresa automotriz.

En definitiva, y sólo a título de ejemplo, se puede considerar introducir las mejoras de acuerdo a las siguientes tres etapas:

Primera etapa

El objetivo de esta primera etapa es hacer todas las mejoras que desde el punto de vista tecnológico no ofrecen serias dificultades, y todas aquellas que ya están desarrolladas. A esto se suma la posibilidad de modificar el habitáculo, de manera de introducir las innovaciones que no afectan el confort de los automovilistas, presentando desde temprano el concepto de la celda de protección indeformable. En cuanto a la forma exterior, todavía debería mantener la misma de un automóvil moderno. El siguiente cuadro resume, para cada uno de los grupos funcionales, las innovaciones de esta primera etapa:

estructura externa	• aumento de la longitud del frente y de los costados (y disminución de la longitud trasera). <i>Primer paso, limitado a valores pequeños.</i> • establecimiento de áreas con coeficientes de rigidez diferenciados para el frente, los costados y la sección trasera. • multiplicación de las áreas con coeficientes de rigidez diferenciados para mejorar la continuidad de la estructura. • Estructura externa de forma elíptica que rodea el habitáculo.
habitáculo	• eliminación de la posibilidad de accionar los vidrios (incluyendo el techo corredizo) mientras el automóvil se encuentra en movimiento. • habitáculo indeformable en impactos a altas velocidades (materiales más resistentes, estructura más resistente, forma elíptica). • aumento de la resistencia a impactos de las superficies vidriadas (similar a la de los vidrios blindados, pero con una masa contenida). • aseguramiento de la posibilidad de extracción de los ocupantes a través de numerosas opciones, incluyendo no sólo las puertas sino todas las superficies vidriadas que se deben deslizar en el interior del habitáculo indeformable, accionando el mecanismo desde el interior o desde el exterior.
dispositivos de sujeción	• medición de parámetros para la actuación correcta de los dispositivos de sujeción. • eliminación de la posibilidad de circulación sin alguno de los ocupantes del vehículo no tiene colocado el cinturón de seguridad. • aumento progresivo de la tensión del cinturón de seguridad con la velocidad de circulación. • provisión obligatoria de apoyacabezas activos (similares a los de Saab) para todos los ocupantes del vehículo. • provisión de cinturones de seguridad de 4 ó más puntos para todos los ocupantes. • perfeccionamiento del pretensionador y del limitador de carga para que actúen de acuerdo a los parámetros medidos con anterioridad o durante el accidente. • dispositivo inflable del tipo HANS, que actúe sólo en caso de accidente.
estructura interna	• amplio <i>espacio entre los ocupantes y los objetos potencialmente peligrosos ("fail volume")</i>. • airbags laterales en los vidrios (con una función ligeramente distinta, ya que deben cubrir toda la superficie en el menor tiempo posible) • importante aumento de la capacidad de ofrecer superficies blandas en los puntos potenciales superficies de contacto (incluyendo el techo). • eliminación de todo material combustible del interior del vehículo.

tabla 8.9

Segunda etapa

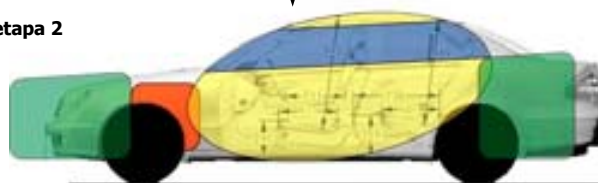
Luego de la primera etapa, y una vez habituado el automovilista a las primeras innovaciones se pueden introducir aquellas cuyo desarrollo tecnológico demanda un mayor tiempo de investigación y ensayo. Por otro lado la forma del automóvil todavía puede permanecer invariable, excepto en lo que hace a una transferencia parcial de longitud del sector trasero al delantero. En definitiva, las reformas de esta segunda etapa son las que siguen:

estructura externa	• aumento de la longitud del frente y de los costados (y disminución de la longitud trasera). <i>Segundo paso, a valores de la mitad de las longitudes propuestas.</i> • variación del coeficiente de rigidez con la masa del vehículo.
estructura interna	• adaptación del interior del automóvil para asegurar la posición del ocupante que ofrezca posición más segura. • mecanismos de accionamiento electromagnéticos (totalmente colapsables, que se alejen de los ocupantes en el choque).
otros	• ajuste de la velocidad de circulación al lugar por donde se transita (a través de un sistema del tipo GPS).

automóvil actual



automóvil al fin de la etapa 2



Tercera etapa

Finalmente, habiendo introducido la mayoría de las innovaciones en los vehículos modernos, logrando posicionar un automóvil seguro como un bien preciado, se puede pasar a la configuración final propuesta. El tiempo que media entre la primera y esta úl-

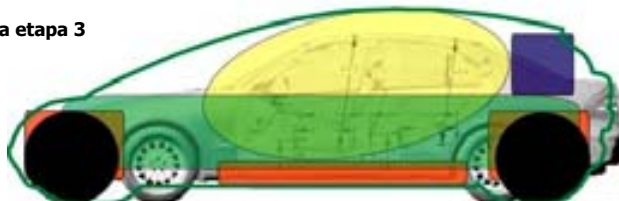
tima etapa es el que permite desarrollar las mejoras que desde el punto de vista tecnológico pueden ser las más complejas, y la forma puede ser similar a la que se propone, o la que corresponda a lo que dicte el diseño en la época de su lanzamiento. El resumen de las últimas innovaciones a introducir se detallan en el siguiente cuadro:

estructura externa	• aumento de la longitud del frente y de los costados (y disminución de la longitud trasera). <i>Tercer y último paso, a valores similares a las longitudes propuestas.</i> • frente de formas redondeadas (monovolumen) para minimizar los riesgos de aplastar a los peatones embestidos. • parabrisas con capacidad de absorber parte de la energía cinética del impacto con el peatón (desplazándose hacia atrás). • comportamiento homogéneo de la zona deformable (y por lo tanto desprovista de elementos mecánicos u objetos externos como el equipaje).
habitáculo	• establecimiento de una barrera de protección contra un incendio del exterior del habitáculo que pueda dañar a los ocupantes. • aseguramiento de una atmósfera respirable en el interior del habitáculo hasta el momento del rescate de las víctimas del accidente.
dispositivos de sujeción	• dispositivo de sujeción de las extremidades.
otros	• generación de potencia y transmisión a través de cuatro motores eléctricos, uno en cada rueda. • fuente de energía debajo del habitáculo (centro de masa más bajo). • ruedas de mayor diámetro (ofrece menor tendencia al vuelco y permite aumentar la altura del centro de masa sin perjudicar la estabilidad).

automóvil al fin de la etapa 2

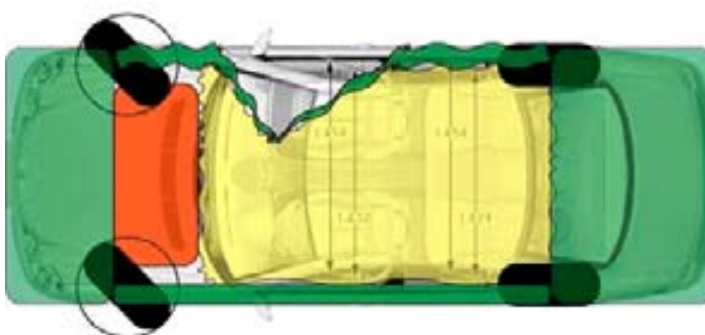


automóvil al fin de la etapa 3

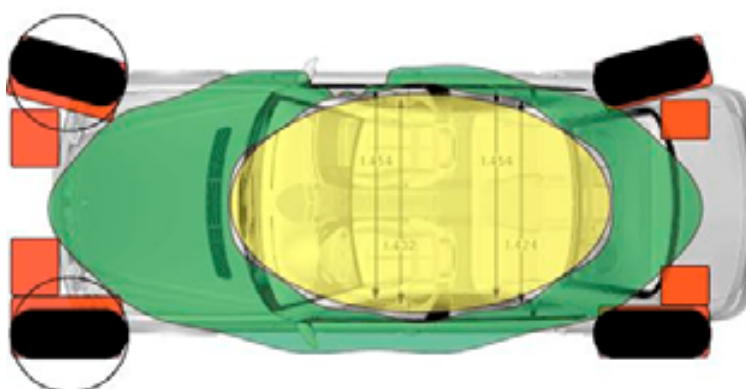


Existen, sin embargo, algunos aspectos más que se pueden tener en cuenta. Sin dudas quien acepte el desafío de lanzar masivamente automóviles más seguros deberá, además de cumplir con las etapas indicadas¹⁵¹, realizar una cuidadosa campaña de marketing que indique claramente todas las ventajas que aportan los nuevos dispositivos de seguridad. Un ejemplo de esto sería realizar una serie de ensayos de impacto en donde se muestre a la prensa especializada las diferencias de comportamiento de los nuevos y los viejos vehículos. Para no despertar sospechas de animosidad se podría inclusive comparar la versión anterior del mismo modelo y marca que se está promocionando. En el capítulo anterior se mostró de manera muy esquemática las diferencias que existen entre la deformación de un vehículo moderno y el propuesto en caso de impacto frontal a alta velocidad. Si la empresa que está lanzando las mejoras pudiera mostrar los distintos comportamientos en distintos tipos de impactos, al hacerlo con los de un choque lateral contra un poste se podría observar algo parecido a lo siguiente:

estructura actual



estructura propuesta



Si la prensa y el público pudieran ver con detalle estas diferencias (o las que se den en el momento el ensayo) la posibilidad de vender un automóvil seguro aumentarían en proporciones geométricas. Y **mientras más violentos (y más cercanos a la realidad) sean los impactos, mayores serán las diferencias, y la probabilidad de que un automovilista se decida por el nuevo diseño.**

¹⁵¹ O con las que surjan de los análisis correspondientes.

Y se pueden introducir dos atractivos adicionales para ofrecer junto con el automóvil seguro, que si bien también podrían incorporarse a los automóviles actuales, darían un valor agregado adicional al nuevo desarrollo. Por un lado existe una necesidad insatisfecha en lo que respecta a los vehículos de grandes series como el Volkswagen Golf, y es que se diseñan exclusivamente para que los compre la mayoría de los usuarios. Con lo cual, un mismo vehículo debe seducir de manera similar a un hombre, a una mujer, y a una franja amplia de edades. Lo que sigue no es ninguna novedad, pero sería conveniente segmentar los mercados de manera mucho más precisa, y diseñar un Volkswagen Golf exclusivamente para mujeres, y otro exclusivamente para hombres. Algo así como el Golf "mujer" y el Golf "hombre" –que inclusive podrían tener nombres diferentes–. A estos dos grandes segmentos se le podrían agregar otros, como un vehículo exclusivamente diseñado para las personas mayores, o para los jóvenes. Y no se trata de versiones de producción limitada como suelen hacer muchas marcas, sino de un diseño que incluya diferencias significativas para cada modelo (por ejemplo el modelo para mujeres debería accesorios en el interior diseñados específicamente para el público femenino). Esta propuesta se parece bastante a otro prototipo de Volvo recientemente lanzado, y pensado por y para mujeres, el YCC.



El primer vehículo diseñado por y pensado para mujeres. Luego de algo más de cien años de historia, el automóvil pasó de ser exclusivamente para hombres, a artículo unisex, para finalmente satisfacer las necesidades de ambos sexos por separado.

Por el otro lado existe una segunda necesidad insatisfecha, esta vez un poco más difícil de satisfacer por un vehículo moderno. A veces sucede que un comprador de automóviles debe aceptar un color de carrocería que no es exactamente el que quiere. O mejor dicho, prefiere comprar un vehículo de un cierto color porque para tener uno como el deseado tiene que esperar una cantidad de tiempo no muy bien determinada. Desde el punto de vista del planeamiento de la producción el hecho de satisfacer exactamente los requerimientos de color de los automovilistas, cumpliendo con un tiempo de entrega acotado, debe ser uno de los aspectos más difíciles y complejos que existen en la industria. Es que es prácticamente imposible adivinar con anticipación el

color que el usuario va a elegir. Es mucho más fácil saber si va a comprar un vehículo de una determinada franja de precios, o si éste va a tener tres o cinco puertas que si finalmente el cliente se va a decidir por el “celestes de los abismos profundos de Madagascar” o el “gris perla de los vientos alisios”. Por lo tanto, lo más conveniente sería producir una cierta cantidad de vehículos de acuerdo a las previsiones de los planes comerciales, y pintarlo recién al final, cuando el cliente eligió el color. De esta manera no se afectaría en nada el lead-time (tiempo de entrega) ni se debería aumentar el stock de vehículos terminados en las concesionarias, dando al mismo tiempo el automóvil deseado al cliente. Aunque, lamentablemente, con la manera actual de producir los vehículos esto sería imposible, ya que precisamente la pintura es uno de los primeros procesos del ensamble y no el último. Pero en el vehículo que se propone, los requerimientos estructurales deberían estar cubiertos por el habitáculo y la estructura exterior, a la cual se podría agregar una especie de “piel” exterior consistente en paneles de plástico que podrían unirse al final (inclusive en la concesionaria) dando al automóvil el color deseado por el cliente luego de conocerse su elección. Estas dos innovaciones que se proponen no tienen que ver para nada con la seguridad, pero es **importante ofrecer una serie de ventajas que no acaben con los nuevos dispositivos que protegen mejor a los ocupantes, para inducir a los automovilistas a cambiar sus vehículos por otros más seguros**, y una vez que los primeros (inevitables) accidentes comiencen a demostrar la eficacia de las innovaciones, lograr aumentar cada vez más las ventas y la penetración en el mercado.

8.4. Conclusión del capítulo

No caben dudas que desde el punto de vista económico el desarrollo de un vehículo más seguro aportaría beneficios de una magnitud considerable. De acuerdo con algunos cálculos preliminares la inversión en un automóvil seguro no debería superar los varios miles de millones de dólares, mientras que las pérdidas económicas que se dejarían de tener superan los cientos de miles de millones de dólares. Por supuesto que a esto se le deben sumar los beneficios sociales que aportaría la disminución de víctimas de accidentes de tránsito, que son de un valor incalculable¹⁵².

La mejor alternativa para dicho desarrollo parece ser aquella en donde los fabricantes reciben el incentivo de fabricar automóviles más seguros a cambio de una reducción de impuestos. Para ello el Estado deberá ensayar todos los vehículos de producción a través de pruebas mucho más exigentes que las actuales, y asignar un puntaje a cada uno, que será la base para la rebaja de impuestos. Así, los fabricantes de automóviles podrían compensar el posible aumento de costos, entregando un vehículo más seguro al mercado por el mismo precio final.

De manera similar, la mejor forma de que los automovilistas opten por vehículos más seguros es también a través de una reducción de impuestos. Si bien de acuerdo a lo planteado anteriormente el usuario no debería pagar de más por un automóvil seguro, es importante incentivarlo a optar por aquél que beneficia a la sociedad en su conjunto, a través de una fuerte reducción del costo operativo del automóvil en lo que respecta a las tasas que se deben pagar anualmente por su posesión.

Sin embargo, todavía queda un aspecto a considerar: ¿por qué ha sido tan difícil introducir mejoras sustanciales en la seguridad de impacto si los beneficios son tan claros? La pregunta es casi obvia. Si cualquier mejora en la seguridad beneficia a la sociedad en su conjunto y, dentro de lo previsible, a las empresas que opten por vender automóviles más seguros, no hay motivo para detener los desarrollos. El ejemplo del cinturón de cuatro puntos representa la dificultad de dicho lanzamiento, ya que se trata de un mejor dispositivo y más seguro que desde hace tiempo permanece en espera de ser introducido en los automóviles de serie.

La respuesta a la incógnita parece ser simple: porque los fabricantes de automóviles temen que las innovaciones en materia de seguridad afecten las ventas. Hay un postulado particularmente útil en el caso las ciencias "duras" (matemática, física, química) que dice que de todas las explicaciones posibles la más sencilla tiende a ser la correcta. Cualquier aspecto que interfiera con la sensación de libertad, individualidad y prosperidad que brinda el gran Dios Auto es considerado con terror por parte de quienes deben tomar las decisiones de incorporar mejoras de seguridad a sus exitosos modelos.

Por eso se debe prestar mucha atención a la manera de vender los nuevos desarrollos. No caben dudas que el sólo hecho de tener que admitir que el automóvil puede ser la causa de una muerte horrible, a menos que se incorporen ciertas mejoras que a veces pueden resultar molestas, requiere de una gran valentía de parte de los fabricantes de autos que consideren introducir esas mejoras. Y también requiere correr ciertos riesgos que deben ser minimizados a través de una correcta estrategia.

¹⁵² Ver capítulo 2.

Una estrategia posible, basada en el análisis de experiencias pasadas, indica que las mejoras en la seguridad de impacto se deben introducir en los automóviles de producción en serie, particularmente los de mayor prestigio, para que sean percibidos como un valor agregado y no como una imposición perjudicial. La historia demuestra que los grandes cambios en el diseño sólo son aceptados por los consumidores si se introducen en los vehículos de alto valor, como sucedió con los frenos ABS y, simultáneamente, con el airbag. También es probable que ayude ir introduciendo las mejoras de manera paulatina, haciendo que cada innovación sea un paso más de una evolución natural que lleve hacia un vehículo cada vez más seguro que respete los tres preceptos fundamentales: libertad, individualidad y prosperidad.

Reflexión

En la actualidad circula un chiste que dice que Bill Gates estaba cenando con el presidente de la General Motors Company y se jactaba del avance de las computadoras en las últimas décadas, diciéndole además que si los automóviles hubiesen tenido una evolución parecida hoy en día deberían circular a velocidades de 500.000 km/h consumiendo un litro de combustible cada millón de kilómetros, con un mínimo de gastos de mantenimiento. A lo que la respuesta del presidente de la compañía automotriz consistió en decir que sí, que era probable, pero que entonces los automóviles deberían ser cambiados cada dos años porque el modelo viejo ya no sirve para nada, y detenerse sin razón aparente en el medio de una autopista, exponiendo al resto de los automovilistas a un riesgo serio.

Sin dudas **la evolución de los objetos de consumo responde claramente a las necesidades de los consumidores de esos productos.** Si las computadoras son mil veces más veloces que lo que eran hace unos diez años esto significa que sus usuarios necesitan de esa mayor capacidad de cálculo para realizar las operaciones cada vez más complejas que requiere la gestión de la información que hacen dichos artefactos. A pesar de la notable evolución de las computadoras, quienes las usan todavía necesitan mayor capacidad y velocidad de cálculo. En términos de la historia del automóvil, las computadoras parecerían estar todavía en los primeros años de evolución, como los prototipos de fin del siglo XIX, que distaban bastante en prestaciones de lo que fueron cuarenta años después, cuando el automóvil adquirió su forma definitiva. En cambio para un automovilista la necesidad de velocidad fue satisfecha hace décadas, ya que en los años '30 un vehículo podía desarrollar velocidades mayores a las que se permite por ley en la actualidad. Y al mismo tiempo, a lo largo de sus cien años de historia, el automóvil pudo satisfacer casi todas las necesidades que demandaban sus consumidores, excepto dos: el respeto por el medio ambiente, y la seguridad. Si hay un campo fértil para grandes avances del automóvil es en lo que respecta al desarrollo de una fuente de potencia no contaminante y de un diseño que proteja eficientemente a los automovilistas. Dichos avances no van a ser tan espectaculares como los evidenciados por las computadoras en las últimas décadas, pero que sin dudas serán mucho más importantes que los que sucedieron desde la aparición de los primeros cinturones de seguridad, hace varias décadas.

El único aspecto que se debe tener en cuenta al respecto es que el automovilista no es del todo consciente de las necesidades no satisfechas recién nombradas. Como se ha visto, esa falta de consciencia ha evitado (y lo sigue haciendo) desarrollos verdaderamente innovadores en esos campos. Pero aunque parezca que el

usuario no lo demanda, lo cierto es que en lo más profundo de su cerebro, el ser humano es capaz de entender la tragedia que generan los accidentes de tránsito, y que **en lo profundo de su consciencia el automóvil "seguro" y "ecológico" forma parte de sus anhelos**. Es decir, dos de las asignaturas pendientes de la humanidad dependen de algo relativamente sencillo: despertar esa demanda de autos a pruebas de choques, y de esa manera eliminar paulatinamente las víctimas de accidentes de tránsito, reduciendo al mismo tiempo el daño al medio ambiente. Y de aquí la utilidad de esta Tesis, ya que las innovaciones propuestas introducidas de acuerdo a las estrategias propuestas pueden ser de utilidad para despertar esa demanda, siendo **sólo una pequeña chispa para poner en movimiento la maquinaria del cambio**.

Algún día seremos capaces de evitar todos los accidentes de tránsito.

Mientras tanto, es mejor estar bien protegido.

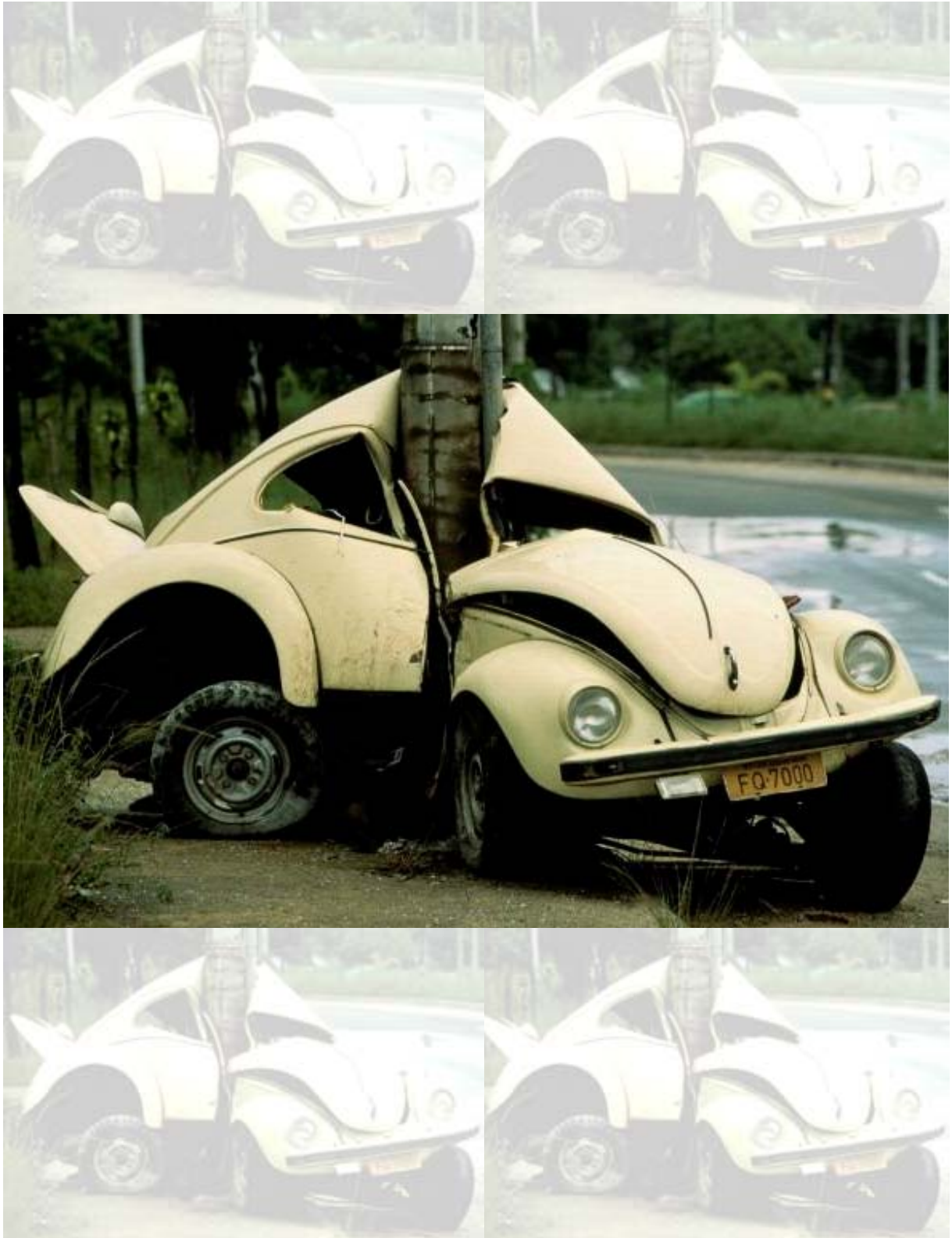


El nuevo Cigno está diseñado para ofrecer la mejor seguridad de impacto. Los ensayos confirman la eficacia de su protección en accidentes de hasta 130 km/h.



8.5. Referencias del capítulo

- 1) *Evaluación de proyectos de inversión*. Jahn L. (Centro de Estudiantes de Ingeniería – Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires – 1993)
- 2) *Miles de millones: pensamientos de vida y muerte en la antesala del milenio*. Sagan C. (SineQuaNon – 1998)



9. Conclusión final

*"Casi, casi nada
me resulta pasajero,
todo prende de mis sueños
y se acopla en mi espalda
y así subo, muy tranquilo
la colina de la vida".*

León Gieco, *La colina de la vida* (1980)

-
- **Una victoria pírrica**

9.1. Una victoria pírrica

En la batalla del desarrollo del ser humano la satisfacción de las necesidades de transporte a través de los automóviles ha sido una victoria pírrica. En el año 280 (antes de Cristo) Roma era una de las superpotencias militares que luchaban por dominar el mundo. Todavía era una época donde los ejércitos del Imperio estaban dirigidos por sus ciudadanos más capaces, y muy pocas civilizaciones osaban atacarla. Algo más tarde los cartagineses comprobarían el poderío romano, al punto que en la actualidad es muy poco lo que se sabe de la cultura cartaginesa, debido a que Roma se preocupó por borrar sistemáticamente cualquier señal de que Cartago hubiera siquiera existido. Pero volviendo al año anteriormente citado, un rey guerrero del Epiro decidió desembarcar sus ejércitos en los alrededores de Eraclea y desafiar al Imperio. Pirro, de él se trata, confiaba en derrotar a los poderosos romanos con un arma secreta: sus soldados combatían con el apoyo de decenas de elefantes. Los generales del Imperio desconocían la existencia de tales animales, que les impidieron actuar de acuerdo a las estrategias habituales. Así es que Pirro pudo triunfar en la batalla de Eraclea, pero a un costo enorme. La mayor parte de su ejército yacía junto a los cadáveres del enemigo romano, quienes habían vendido muy cara su derrota. El guerrero del Epiro había obtenido una sorprendente victoria, pero ésta, lejos de llenarlo de alegría lo sumió en el desasosiego y el espanto. Un año más tarde la historia se repitió en Ascoli Satriano, donde Roma volvió a ser derrotada, no sin antes infligir nuevamente pérdidas terribles al ejército comandado por Pirro, quien a pesar de haber vencido en esta nueva batalla, decidió abandonar la guerra con Roma, retirándose primero al sur de Italia, y luego a Grecia, donde murió luchando. Desde entonces, hace más de dos mil años, el término "victoria pírrica" se aplica a aquellas que se obtienen a costa de grandes sacrificios, y que inclusive se parecen bastante a una derrota. Si se trazara un paralelismo entre Pirro y los automóviles las semejanzas aparecerían enseguida. Sin dudas el desarrollo del automóvil cambió para siempre el destino de la Humanidad, pero al mismo tiempo supuso un daño terrible al medio ambiente, y una pérdida de vidas humanas casi sin precedentes (por lo menos en tiempos de paz) que a su vez devino en altísimos costos económicos y sociales.

Y mientras antes se tome conciencia de ello, antes se va a poder corregir y mejorar la situación. Existen dos aspectos sobre los cuales probablemente se base la confianza de los automovilistas y de los expertos en cuanto a la infalibilidad automóvil:

- 1) los automóviles modernos reciben muchas estrellas en los ensayos de impacto, ergo son muy seguros.
- 2) la cantidad de muertes por kilómetro recorrido desciende año tras año, ergo la tragedia de los accidentes de tránsito está pronta a acabarse.

Sin embargo, se ha demostrado que ambos argumentos son completamente falsos, y en consecuencia deberían ser reescritos de la siguiente manera:

- 1) sólo algunos pocos automóviles modernos reciben cinco estrellas en los ensayos de impacto contra objetos fijos a apenas 64 km/h, ergo ni siquiera ellos son muy seguros en el caso de impactos contra otros vehículos a velocidades mayores a los 64 km/h (que representan el más frecuente de los accidentes graves), y en consecuencia presenta una probabilidad importante de generar heridas serias o fatales a sus ocupantes en caso de accidente de tránsito.

- 2) la cantidad de muertes por kilómetro recorrido desciende año tras año, pero la cantidad de kilómetros recorridos aumenta en mayor proporción, ergo la tragedia de los accidentes de tránsito no sólo no está pronta a acabarse sino que de aquí a menos de quince años será la tercer causa de muertes en el mundo.

En este contexto, desde el punto de vista tecnológico, existe la posibilidad de introducir numerosas mejoras que podrían proteger de mejor manera a los automovilistas en caso de accidente, a lo que se suma el hecho de que las pérdidas económicas derivadas de los muertos y heridos por accidente de tránsito justifican cualquier inversión que se deba hacer para desarrollar un vehículo más seguro. En definitiva, la Humanidad se encuentra en la siguientes situación:

- a) los accidentes de tránsito generan cada vez más pérdidas humanas y económicas.
- b) los automóviles actuales no son seguros.
- c) un vehículo más seguro disminuiría la gravedad de los accidentes, generando menor cantidad de víctimas.
- d) se pueden introducir innovaciones que mejoren la protección a los ocupantes.
- e) existen beneficios económicos importantes que justifican el desarrollo de automóviles más seguros.

Entonces se debe volver a la misma pregunta hecha en el capítulo anterior: ¿por qué no se desarrolla un automóvil más seguro?, y a la respuesta que también se indicó: porque se cree que no será consumido por los automovilistas. Entender esto es crucial para lograr modificar la situación. Los fabricantes temen sufrir un fracaso similar al del Edsel¹⁵³, o aún peor al que sufrió Ford con ese modelo. Entonces parece lógico que cualquier novedad sea rechazada aún bajo una leve sospecha de que su introducción perjudicará las ventas. Ese miedo es tan palpable que ha logrado desplazar desde hace décadas a los ingenieros de los tableros de diseño de los automóviles, dejando la responsabilidad de la concepción del vehículo en manos de un diseñador industrial, quien busca condensar en un dibujo los anhelos de los futuros automovilistas. Así, el ingeniero se limita a traducir el sueño de un diseñador industrial en un objeto capaz de ser producido a un costo razonable. De esta manera sucede desde hace décadas, y el fenómeno tiene una razón y un origen.

Ese miedo al fracaso de la introducción de un automóvil seguro tiene como origen, desde el punto de vista del Estado, a la incapacidad de éste de incentivar a los productores y consumidores a desarrollar y demandar, respectivamente, un vehículo acorde a lo propuesto en esta Tesis; y desde el punto de vista de los fabricantes, al miedo al fracaso del nuevo modelo, confiando en consecuencia el desarrollo a los diseñadores industriales, relegando a los ingenieros al rol secundario de concretar esos diseños en un vehículo factible. Para los ingenieros de la industria automotriz existe un antes y un después de Harley Earl. El comienzo de sus actividades en la General Motors Company fue la consecuencia de un memo del presidente de la empresa, quien en la década del '20 indicaba que la ingeniería de los automóviles se había consolidado y estabilizado de una manera considerable, y que la única manera de vender más automóviles era a través del cambio de su aspecto exterior. Así se encomendó al joven Earl, quien tenía experiencia en el diseño de automóviles para las estrellas de Hollywood, que desarrollara un nuevo vehículo para una nueva marca de la corporación.

¹⁵³ Ver capítulo 4.

Estaba por dar a luz un vehículo que dejaría perplejos a los expertos y a los automovilistas: el LaSalle de 1927, el primero de una serie de exitosos diseños de Earl que se extendieron durante casi todo el siglo XX incluyendo uno de los vehículos más amados por los norteamericanos, el Chevrolet Corvette. A fines de la década del '20 los LaSalle causaron sensación, y dieron el puntapié inicial a que otros diseñadores talentosos como Earl tuvieran la oportunidad de crear nuevos autos.



El primer automóvil de producción en serie que no fue diseñado por un ingeniero sino por el estilista Harley Earl: el LaSalle de 1927

Pero esa era apenas la primera batalla perdida de una guerra que vería a los ingenieros relegados por completo de los tableros de diseño. Y, paradójicamente, el golpe definitivo que los alejó para siempre fue la introducción de uno de los mejores diseños de las primeras décadas de vida del automóvil. En 1934 un joven ingeniero de nombre Carl Breer convenció a la Chrysler Corporation de desarrollar un automóvil completamente distinto a lo que se hacía en la época.

Breer propuso usar túneles de viento para analizar modelos a escala 1:1, de manera de lograr una sinergia entre el diseño de aviones y de automóviles. El vehículo terminado tenía una estructura unitaria (a diferencia del tradicional chasis y carrocería); era aerodinámico y por lo tanto de bajo consumo de combustible; era rápido y confortable; y además tenía un precio muy competitivo. Sin dudas, el Chrysler Airflow de 1934 estaba adelantado a su tiempo. Pero tenía un grave defecto: era muy poco atractivo, por no decir feo.



Como el Edsel, el Chrysler Airflow es una prueba de que un buen diseño que no resulta atractivo está condenado al fracaso.

Y lo era a tal punto que resultó un absoluto fracaso de ventas, y hubiese sido el paradigma de las catástrofes comerciales, de haber sido por el Edsel que logró eclipsarlo y sumirlo en un cortés olvido. De ahí en más ningún fabricante volvió a confiar el diseño de un automóvil a los ingenieros que, como dijo, pasaron a ser apenas un complemento que asiste a los diseñadores industriales. Hoy en día los prototipos en donde intervienen activamente los ingenieros se limitan a aquellos donde los cambios conceptuales son grandes, y se deben aplicar otros aspectos que no tienen nada que ver con la curvatura del parabrisas o la forma y cantidad de las luces de freno. Un buen ejemplo de la intervención de la ingeniería en el diseño es el prototipo Hy-wire de la General Motors, que se introdujo anteriormente, y que se basa en un nuevo concepto de automóvil, que rompe con los esquemas existentes hasta el momento.

Todo esto es muy importante cuando se tiene en cuenta que las propuestas de esta Tesis se limitan a las mejoras de la seguridad de impacto para choque contra objetos fijos, y que la disminución de la gravedad de los otros accidentes, los que ocurren entre dos vehículos que circulan en la misma dirección y sentidos opuestos, se debe hacer a través de la intervención activa e intensa de los ingenieros. Quienes deben recordar que, a diferencia de lo que ocurría en los años '20 cuando la ingeniería de los vehículos ya estaba consolidada, el automóvil debe reinventarse a sí mismo una vez más, partiendo de una premisa distinta (la de la mejor

seguridad de impacto), buscando proteger a los ocupantes de la manera más eficaz en la mayor cantidad posible de eventos. Y que en este nuevo escenario su rol es fundamental.

Es que, para mejorar la protección de los ocupantes en impactos entre dos vehículos, uno de los aspectos más importantes que se deben solucionar es la gestión adecuada de la energía cinética, que escapa a las incumbencias de este trabajo y que, de acuerdo a lo analizado, implica el cambio de paradigma en el diseño del automóvil, abandonando una estructura que se comporta como si fuera una masa unidad a un resorte de tipo inelástico. Se debe recordar una vez más que todas las innovaciones propuestas apenas son útiles en el caso de accidentes contra objetos fijos, y que los impactos entre múltiples vehículos implican que por lo menos uno de ellos sufra un choque de tipo elástico, con consecuencias devastadoras para los ocupantes. Ya se dijo uno de los problemas principales de los diseñadores de automóviles consiste en desarrollar un automóvil lo suficientemente rígido como para evitar el aplastamiento de sus ocupantes, pero lo suficientemente deformable como para evitar que sean sometidos a aceleraciones peligrosas. El hecho que en cien años de historia no se haya logrado un diseño que lo logre es una prueba de que es uno de los problemas principales. Ante esta situación lo que se propuso en este trabajo fue diferenciar claramente las funciones, y dar al habitáculo la característica de rigidez e impenetrabilidad, y a la estructura exterior la capacidad de absorber la energía cinética del impacto, sin afectar en absoluto el espacio vital de los ocupantes. Pero lo cierto es que no es la única manera de resolver el problema de la gestión de la energía cinética del ocupante. Lamentablemente, el hecho de fijar al automovilista a la carrocería para que no se produzcan impactos peligrosos también lo condena a sufrir las mismas variaciones de velocidad que aquella. Si el automóvil está expuesto a un choque de tipo inelástico, los ocupantes van a sufrir una cierta variación de velocidad a lo largo de un período de tiempo determinado. En cambio si el vehículo participa de un choque de tipo elástico, a la variación de velocidad indicada se le va a sumar un peligroso cambio de velocidad instantáneo¹⁵⁴. Por otro lado, de las ecuaciones (10.32) y (10.34) se puede deducir que la variación total de la velocidad de un sistema expuesto a un choque de tipo elástico es el doble que la de otro sistema que sufre un choque inelástico:

- Choque elástico $\Delta(\bar{v}_a + \bar{v}_b) = 2(|v_{ao}| + |v_{bo}|)$
- Choque inelástico $\Delta(\bar{v}_a + \bar{v}_b) = (|v_{ao}| + |v_{bo}|)$

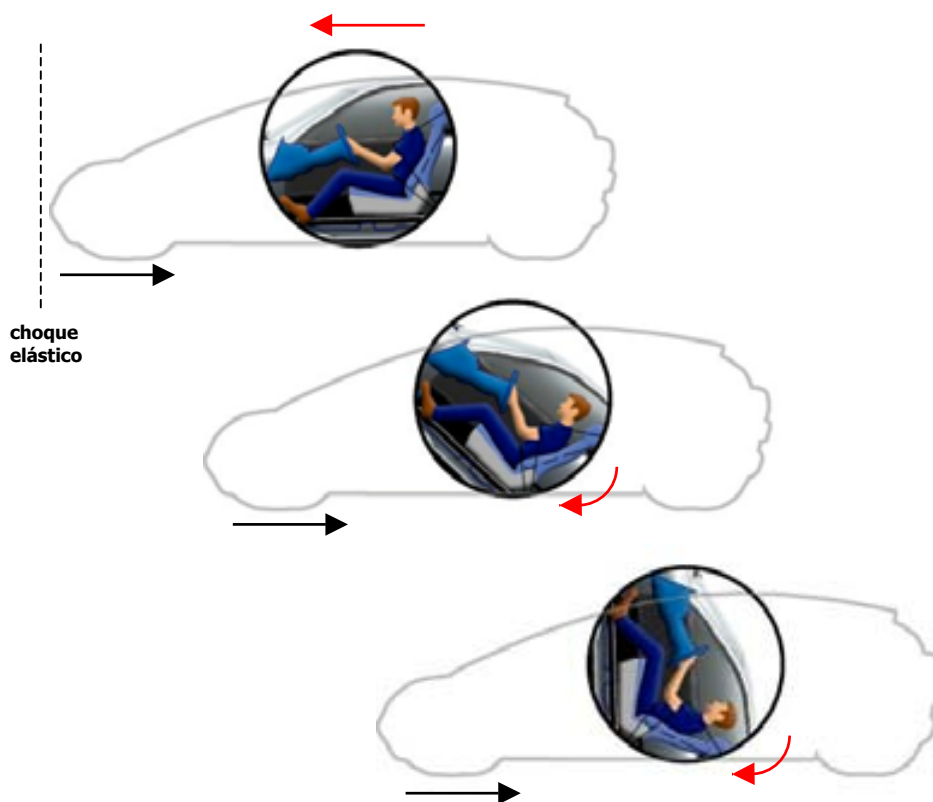
O sea, que en un choque de tipo elástico no sólo se produce una variación de velocidad instantánea, sino que dicha variación es mayor que la de un choque inelástico. En otras palabras, es probable que aún ocurriendo a una velocidad inferior, un choque de tipo elástico sea sensiblemente más peligroso que uno de tipo inelástico¹⁵⁵. Todo parece indicar entonces que es preferible someter a los ocupantes a alta aceleraciones antes que a un cambio instantáneo de velocidad. Y dado que el manejo adecuado de la energía cinética durante el impacto es un aspecto muy delicado y complejo, que se debe analizar a través de modelos de simulación (preferiblemente en tres dimensiones), lo que sigue es **apenas un indicio** de una solución factible

¹⁵⁴ Según lo que ya se ha visto, el cambio de velocidad puede estar provocado por una variación de la dirección o el sentido de la misma, sin que ello implique un cambio de su magnitud.

¹⁵⁵ Esto es de acuerdo a lo que indica el estado actual de la rama de la ciencia médica que se ocupa de este fenómeno, la biodinámica.

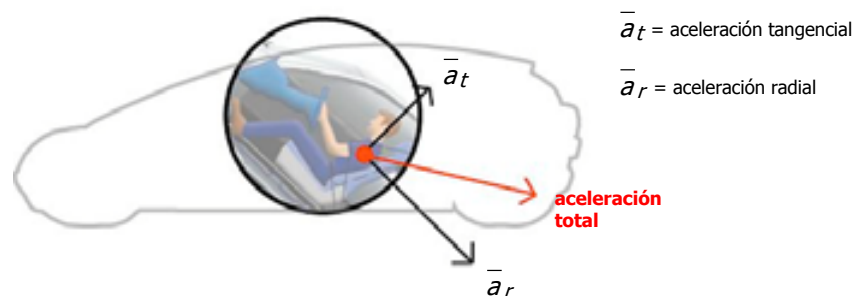
que permitiría evitar que los ocupantes de un vehículo que sufre un impacto sean expuestos a un choque de tipo elástico, en cualquier circunstancia. El objetivo de dicho indicio es introducir el aspecto para que en el futuro se analice con la profundidad y herramientas que merece, y consiste en lo siguiente.

La única manera de lograr esa adecuada gestión de la energía del impacto es a través de independizar el movimiento de los ocupantes del de la carrocería, de forma que si ésta sufre un choque de tipo elástico los ocupantes continúen con el movimiento en un único sentido, sin rebotar junto con la carrocería, y esta afirmación puede considerarse la más importante de toda la Tesis. Puesto en otras palabras, se debe pensar en la manera de reducir la velocidad de los ocupantes hasta detenerlos sin que cambien violentamente de sentido de movimiento, aunque la carrocería lo haya hecho. Esto equivale a pensar en una estructura que permita el movimiento relativo del ocupante con respecto a la carrocería. Un ejemplo de esto consiste en un habitáculo con forma de esfera, con una doble estructura: una esfera exterior indeformable, y otra interior que permita al ocupante girar dentro de la esfera, con un mecanismo de liberación del movimiento relativo en el momento del impacto. De esta manera, lo que suceda en la carrocería no influye en ninguna medida en el movimiento del automovilista, que comienza a dar vueltas dentro de la esfera:



Esta propuesta representa un cambio de paradigma de tipo tan radical que merece la pena detenerse un momento y explicarla un poco más en detalle. Lo que se propone es lo siguiente: si un automovilista se está moviendo en un vehículo que va a chocar, y al hacerlo el auto sufre un choque elástico, la única manera de evitar que el ocupante también sea obligado a sufrir un cambio instantáneo de sentido de movimiento es a través de independizar ambos movimientos. El hecho de colocar al

automovilista dentro de una esfera indeformable por donde se puede mover hace que, cuando el automóvil se detenga y empiece a moverse hacia atrás, aquél siga moviéndose dentro de la esfera, aislado de cualquier cambio de dirección instantáneo. Puesto en otras palabras: cuando el automóvil se detiene, el ocupante sigue moviéndose; cuando el automóvil rebota hacia atrás, el ocupante sigue moviéndose en la misma trayectoria circular; cuando el automóvil vuelca, el ocupante se mueve siempre de la misma manera, sin importar lo que ocurra en el exterior. El problema es que girar en una esfera no es exactamente lo mismo que continuar el movimiento en un único sentido. Por el contrario, el giro obliga a un cambio continuo de movimiento, provocado por el equilibrio entre la aceleración centrífuga del ocupante que tiende a salirse de la esfera y la aceleración centrípeta que genera la reacción de la esfera que hace que dicho ocupante se mantenga en la trayectoria que define la misma. Y ésta es la desventaja de la propuesta de gestión de la energía cinética de los ocupantes durante el impacto: la generación de una alta aceleración. Es que en el momento en que la esfera comience a moverse debe empezar también el proceso de disminución paulatina de la velocidad, a través de una fuerza de rozamiento que frene el movimiento. La aceleración total a la que sea sometido el ocupante será la resultante de la aceleración radial y de la aceleración tangencial que se pueden observar en la figura:



Dicha aceleración deberá ser de una magnitud y duración menores a las que el cuerpo humano puede tolerar con el problema adicional que, como se anticipó en el capítulo 5, dichos límites no se conocen con una certeza satisfactoria. De todas formas el modelo planteado es una representación simplificada en extremo de un vehículo que presenta una serie de restricciones importantes: se deben colocar al menos cuatro pasajeros, y si a cada uno se lo rodea de una esfera, las dimensiones del vehículo pueden exceder las que permite la red vial existente (por lo tanto podría analizarse la posibilidad de colocar dos pasajeros en cada esfera); la aceleración total debe ser de una magnitud y de una duración tales que no superen los límites tolerables por el cuerpo humano (dicha aceleración es función del diámetro de la esfera, de la velocidad inicial del impacto, y de la fuerza de rozamiento que se aplica al mecanismo de giro); el mecanismo de giro debe permitir el ingreso y el egreso de los ocupantes, y no interferir con la visión del conductor; y algunas otras que seguramente van a surgir si la investigación del tema continúa. Sin embargo, no se pueden dejar de destacar las ventajas del tipo de protección propuesta, que son las siguientes:

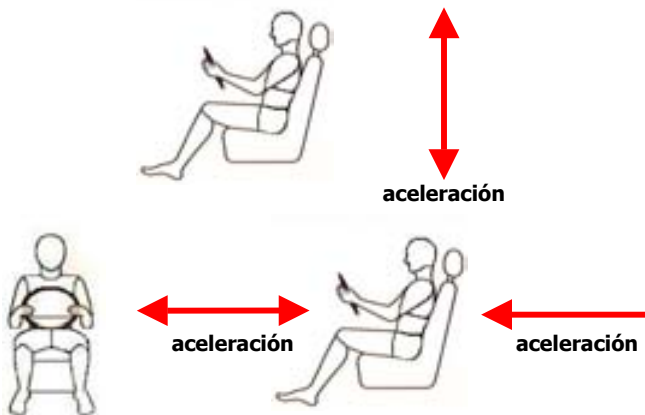
- a) siempre y cuando el ocupante esté correctamente sujeto, durante todo el movimiento posterior al accidente la distancia entre cualquier objeto del interior del vehículo y el ocupante permanece constante, por lo tanto se eliminarían todos los impactos contra objetos potencialmente peligrosos, para todos los

accidentes, sin importar la dirección en que se mueva la carrocería, ni el punto inicial del accidente, ni los cambios de movimiento que puedan provocar sucesos como los vuelcos. Desde el punto de vista del ocupante, un accidente sería solamente un giro a alta velocidad alrededor de una esfera indeformable, sin golpear en ningún momento contra nada que pueda dañarlo.

- b) la aceleración a la que sería sometido el ocupante es de una sola dirección y sentido, y además la que corresponde a la que el cuerpo humano resiste mejor:



Se debe recordar que en un accidente en un vehículo moderno, el ocupante es sometido a los tipos de aceleraciones que más lo perjudican:



- c) la aceleración sería única, en cualquier circunstancia, inclusive cuando el automóvil sufre un choque de tipo elástico, ya que la estructura interior de la esfera se estaría moviendo de manera libre, de manera similar a como un hielo se queda en el lugar cuando el vaso en el que se encuentra gira.
- d) se eliminarían la multiplicidad de factores que inciden sobre el daño al cuerpo humano en caso de una colisión, mejorando considerablemente la posibilidad de encontrar un mecanismo que minimice los daños al cuerpo. La ciencia médica no logra tener un conocimiento adecuado de dichos mecanismos debido en parte a que en cada accidente actúan una multitud de fuerzas, combinando impactos directos, impactos indirectos (como el del fémur astillado contra el interior de la pierna y el abdomen), cortes y aplastamientos. La necesidad de dar

atención médica inmediata al paciente sumada a la otra necesidad, que consiste en retirar el vehículo del camino para liberarlo, genera que gran parte de la información valiosa que serviría para entender mejor los mecanismos de daño se pierda definitivamente. Así, en el caso del nuevo mecanismo de seguridad que se propone, el único factor de peligro que podría generar algún daño al cuerpo es la aceleración que sufre el ocupante. Con que el vehículo tenga la capacidad de registrar la velocidad al momento del impacto, bastaría para poder generar una base enormemente valiosa acerca de los daños que sufren los automovilistas en un impacto, y los factores que inciden sobre ese daño.

- e) el sistema de esfera móvil se adaptaría a todos los tipos de accidentes posibles, desde el accidente de tipo puramente inelástico, hasta el de un vehículo contra un objeto fijo que sufre un choque de tipo elástico, pasando por el de dos vehículos que chocan de frente. En cambio el automóvil que se comporta de acuerdo a un sistema de una masa y un resorte inelástico no puede proteger adecuadamente en los accidentes donde se producen choques de tipo elástico.

Pero más allá de las complicaciones que pueda suponer la búsqueda de una solución eficiente al problema de los impactos entre vehículos, lo cierto es que lo que no se debe perder la esperanza de llegar a un resultado satisfactorio. En la Ciencia existen otros casos en que los investigadores trabajan sobre supuestos, sin saber si en algún momento se va a encontrar la solución. Y esto no implica que asuman que el estado actual de las cosas es el único posible y que la Humanidad deba resignarse a lo que ha obtenido hasta el momento. Inclusive la ciencia más pura, la Matemática, que se ha basado durante milenios en postulados de una solidez irrefutable, ha visto cómo sus estructuras fundamentales temblaban al compás de una sentencia hecha por el matemático Kurt Gödel:

"En cualquier sistema axiomático consistente, que sea lo suficientemente fuerte como para permitir realizar aritmética básica, se puede construir un axioma acerca de los números naturales que no puede ser ni demostrado ni refutado bajo ese sistema".

En otras palabras, esto acabó con la convicción del resto de los matemáticos que creían que toda proposición verdadera era demostrable, y que en la Matemática no existe *ignorabimus*. También significó que muchos investigadores tomaran conciencia de que podían estar dedicando sus vidas a la solución de un teorema que no tiene demostración. El último teorema Fermat¹⁵⁶ fue garabateado en una nota al costado de un ejemplar de *Arithmetica* de Diofanto en 1637 y recién fue demostrado en 1992 (casi tres siglos y medio más tarde). Quienes trabajaron en él se arriesgaron a emprender una tarea sin un final determinado. Hoy en día muchos matemáticos se desvelan por solucionar la conjetura de Christian Goldbach¹⁵⁷ hecha en 1742, que todavía permanece indemostrada a pesar de que los ensayos empíricos hechos hasta ahora así lo demuestran. Y todos ellos trabajan con la convicción de que la solución existe, si bien su misma doctrina les advierte que pueden estar haciéndolo en vano. Y si hay muchos que dedican sus vidas a demostrar un teorema probablemente indemostrable, es de esperar que existan muchos otros que tengan la voluntad de investigar si se puede desarrollar algún automóvil que minimice la tragedia que significan un millón de muertes y decenas de millones de discapacitados permanentes por año.

¹⁵⁶ "Es imposible dividir una tercera potencia en dos terceras potencias, o una cuarta potencia en dos cuartas potencias, o en general cualquier potencia superior a dos en dos potencias similares".

¹⁵⁷ "Todo número entero par mayor que 2 es igual a la suma de dos números primos".

Y si de la búsqueda de cambios se trata, nada mejor que una reflexión de Italo Calvino desde las últimas páginas de su libro "Las ciudades invisibles" para describirla:

"El infierno de los vivos no es algo por venir; hay uno, el que ya existe aquí, el infierno que habitamos todos los días, que formamos estando juntos. Hay dos maneras de no sufrirlo. La primera es fácil para muchos: aceptar el infierno y volverse parte de él hasta el punto de dejar de verlo. La segunda es arriesgada y exige atención y aprendizaje continuos: buscar y saber reconocer quién y qué, en medio del infierno, no es infierno, y hacer que dure, y dejarle espacio".



Una familia que está por emprender un viaje feliz en un automóvil. Una familia que tal vez no haya entendido que una victoria pírrica ha permitido dicho viaje. Una familia que confía en que el gran Dios Auto los protegerá en caso de accidente.

10. Anexos

"El auto quedó fuera de control cuando se precipitó sobre el cantero central de cemento de la autopista Panamericana y chocó contra una columna a la altura del cruce General Belgrano. En el accidente fallecieron dos mujeres y un niño de sólo cuatro años, mientras otro menor, de dos años, resultó ileso y otra persona de sexo femenino resultó gravemente herida, por lo que fue trasladada al hospital de Los Polvorines. El trágico accidente fue de tal dimensión que hasta el momento los investigadores no pudieron determinar en qué dirección circulaba el vehículo, que quedó irreconocible".

Diario La Nación, 29 de junio de 2003.

-
- **Análisis de conceptos físicos relacionados**
 - **Análisis de choques elásticos e inelásticos**
 - **Automóviles no contaminantes**
 - **Organismos de seguridad**
 - **Índice de tablas y gráficos**

10.1. Análisis de conceptos físicos relacionados

Esta sección tiene como función presentar los conceptos básicos que se necesitan para comprender los principales fenómenos físicos que ocurren durante los accidentes de tránsito. Es un complemento que incluye las nociones fundamentales del movimiento, es decir, conceptos como fuerza y energía, o las leyes que rigen el movimiento armónico simple.

Conceptos básicos del movimiento

Desplazamiento

Se define al desplazamiento ($\Delta \vec{r}$) como el cambio de posición de un cuerpo, respecto de un sistema de referencia, en un determinado intervalo de tiempo:

$$\Delta \vec{r} = \left(x \vec{i} + y \vec{j} + z \vec{k} \right) - \left(x_o \vec{i} + y_o \vec{j} + z_o \vec{k} \right)$$

ó

$$\Delta \vec{r} \equiv \vec{r} - \vec{r}_o \quad \text{para} \quad \Delta t \equiv t - t_o \quad [\Delta r, r, r_o] = m \quad [\Delta t, t, t_o] = s$$

Variación de velocidad, velocidad media y velocidad instantánea

La velocidad es la medida de la rapidez del cambio del desplazamiento. La variación de velocidad ($\Delta \vec{v}$) se define como la diferencia de velocidades entre dos instantes de tiempo.

$$\Delta \vec{v} \equiv \vec{v} - \vec{v}_o \quad [\Delta v, v, v_o] = m/s$$

Es muy importante destacar que, al tratarse de vectores, un objeto puede mantener invariable la magnitud escalar de su velocidad y **sufrir una cierta variación de velocidad si se produce un cambio en la dirección o en el sentido de esa velocidad**. Tal es el caso de un objeto que sufre un choque elástico contra una pared, y que rebota hacia atrás a la misma velocidad previa al choque, pero que sufre en el proceso una variación de velocidad de una magnitud equivalente al doble de su velocidad inicial. La velocidad media, por otra parte, se define:

$$\vec{v}_{media} \equiv \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad \text{y la velocidad instantánea:} \quad \vec{v} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Aceleración

El término aceleración se refiere al cambio de la velocidad de un objeto medido en la unidad de tiempo:

$$\bar{a}_{media} \equiv \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t} \quad \text{y la aceleración instantánea:} \quad \bar{a} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t} = \frac{d\bar{v}}{dt} \quad [a] = m/s^2$$

Masa

El conocimiento empírico indica que la magnitud del cambio de movimiento de un cuerpo depende de otra magnitud definida como la masa del mismo. Si un cuerpo cambia de estado de movimiento (o, dicho en otras palabras, acelera) con más facilidad que otro bajo el mismo sistema, se dice que el primero tiene menos masa que el segundo. La masa del cuerpo, que se relaciona con la cantidad de materia presente en el mismo, se puede considerar entonces como una medida de su inercia o, lo que es lo mismo, de la resistencia de ese cuerpo al cambio de movimiento. Aquí es importante diferenciar el concepto de *masa inercial* que describí hasta ahora con el otro fenómeno físico que genera un cuerpo: la atracción gravitatoria. Se puede demostrar que dos cuerpos separados por una cierta distancia se atraen entre sí de manera proporcional a la magnitud de sus masas, y de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Se habla entonces, en este caso, de *masa gravitatoria*. Cada vez que se hable de la masa a lo largo del trabajo, se estará haciendo referencia a la masa inercial, ya que los fenómenos gravitatorios generados por las masas de los objetos en estudio son de una magnitud perfectamente despreciable. Las últimas consideraciones importantes que se pueden hacer acerca de la masa son que se trata de una propiedad intrínseca del cuerpo, que es siempre positiva, y que se trata de una cantidad escalar.

Fuerza

Para modificar el estado de movimiento de un cuerpo inicialmente libre de acciones es necesario que exista cierta interacción entre éste y un sistema. Dicha interacción puede considerarse como una *acción dinámica* que es la responsable del cambio de estado de cuerpo, quien a su vez se opone al movimiento proporcionalmente a su inercia (que es función, como acabo de decir, de la masa del objeto). Al ente representativo de la acción dinámica que se ejerce sobre una masa inercial se lo denomina *fuerza*. Por otro lado se puede indicar la perspectiva de Mach, quien define a la fuerza como “una medida de la intensidad de la interacción entre un sistema y la masa inercial de un cuerpo, capaz de generar un cambio en el estado de movimiento de un cuerpo”.

Cantidad de movimiento

Por definición, la cantidad de movimiento ($\bar{p}$) es:

$$\bar{p} \equiv m \cdot \bar{v} \quad [\bar{p}] = \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

Leyes que rigen el movimiento

Teniendo en cuenta que los accidentes de tránsito ocurren a una velocidad menor al 0,00002% de la velocidad de la luz no es necesario aplicar ninguna consideración relativística adicional como, por ejemplo, las transformadas de Lorentz. Se puede pasar entonces a la enunciación de las leyes citadas:

Primera ley del movimiento

"Una partícula aislada mantiene su cantidad de movimiento constante a menos que actúe sobre ella una fuerza externa".

$$\text{si } \sum \vec{F}_{\text{externas}} = \vec{F}_{\text{neta}} = 0 \Rightarrow \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} = 0$$

Segunda ley del movimiento

"Cuando una partícula libre es sometida a una fuerza externa experimenta una variación de su cantidad de movimiento que es proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada, y la dirección del cambio de la cantidad de movimiento es la de la dirección de la fuerza".

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \text{si } m = \text{cte. y } v \ll c$$

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \cdot \frac{dm}{dt} = m \cdot \vec{a} + 0$$

Entonces:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (10.1) \quad [\vec{F}] = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \equiv \text{N}$$

Tercera ley del movimiento

"Para cada acción de una fuerza existe una reacción de magnitud equivalente y de sentido contrario".

Se pueden considerar dos cuerpos a y b que ejercen fuerzas, el uno sobre el otro, y entonces:

$$\vec{F}_{a \rightarrow b} = -\vec{F}_{b \rightarrow a} \quad (10.2)$$

Un aspecto importante que se desprende de esta tercera ley es el concepto de la *conservación de la cantidad de movimiento*, que se puede demostrar como sigue:

Si se escribe la ecuación (10.1) de la manera $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

y se asume que ambos cuerpos ejercen su fuerza sobre el otro únicamente, se puede entonces establecer que:

$$\bar{F}_{a \rightarrow b} = \frac{d\bar{p}_a}{dt} \text{ y que } \bar{F}_{b \rightarrow a} = \frac{d\bar{p}_b}{dt}$$

sumando ambas ecuaciones se obtiene:

$$\bar{F}_{a \rightarrow b} + \bar{F}_{b \rightarrow a} = \frac{d\bar{p}_a}{dt} + \frac{d\bar{p}_b}{dt}$$

usando la ecuación (10.2):

$$\bar{F}_{a \rightarrow b} - \bar{F}_{a \rightarrow b} = \frac{d(\bar{p}_a + \bar{p}_b)}{dt}$$

$$\text{que equivale a } 0 = \frac{d(\bar{p}_a + \bar{p}_b)}{dt} \quad \text{ó} \quad \Delta \bar{p}_a = \Delta \bar{p}_b \quad (10.3)$$

Con lo cual queda demostrado el principio de conservación de la cantidad de movimiento para dos cuerpos, razonamiento que se puede extender de manera similar a sistemas de más de dos cuerpos.

Otros conceptos

Ecuaciones del movimiento

Las leyes del movimiento permiten describir lo que le ocurre a un cuerpo sometido a fuerzas que le imponen una aceleración constante. Siempre y cuando la masa se mantenga constante, la velocidad y la posición del cuerpo se caracterizan por las siguientes expresiones:

$$\bar{v}(t) = \bar{v}_o + \bar{a}.t \quad (10.4)$$

$$\bar{r}(t) = \bar{r}_o + \bar{v}_o.t + \frac{1}{2}\bar{a}.t^2 \quad (10.5)$$

Trabajo y energía cinética

La noción de energía es uno de los conceptos fundamentales de la Física. La energía asume muchas formas, como por ejemplo la de un cuerpo en movimiento, que es una de las que interesan para esta Tesis. Otro concepto relacionado con el desplazamiento de un cuerpo y la fuerza aplicada sobre él es el trabajo. El trabajo permite indicar una medida de la energía consumida para desplazar un cuerpo a lo largo de una trayectoria. Se define al trabajo (W) como el producto escalar entre el *vector fuerza neta* aplicada sobre un cuerpo y el *vector desplazamiento* de ese cuerpo.

$$W \equiv \vec{F} \cdot \Delta \vec{r} \quad \text{ó} \quad W \equiv \int \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (10.6) \quad [W] = \text{N.m} \equiv \text{joule}$$

Es importante recordar que la palabra trabajo tiene una connotación distinta en la física que en el idioma coloquial, ya que no hay trabajo si no existe desplazamiento (sostener un objeto en un lugar para que no caiga no efectúa trabajo). Por otro lado, si se despeja el tiempo (t) de la ecuación (10.4):

$$t = (\vec{v} - \vec{v}_o) \frac{1}{a}$$

y si se reemplaza la aceleración usando la ecuación (10.1):

$$t = (\vec{v} - \vec{v}_o) \frac{m}{F}$$

reemplazando esta última expresión en la ecuación (10.5) permite obtener:

$$\vec{r}(t) - \vec{r}_o = \vec{v}_o \cdot (\vec{v} - \vec{v}_o) \frac{m}{F} + \frac{1}{2} a \left((\vec{v} - \vec{v}_o) \frac{m}{F} \right)^2$$

multiplicando en ambos miembros de la ecuación por la fuerza:

$$\vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = \frac{1}{2} m \cdot \vec{v}^2 - \frac{1}{2} m \cdot \vec{v}_o^2 \quad (10.7)$$

El término $\frac{1}{2} m \cdot \vec{v}^2$ se considera una medida de la energía de un cuerpo en movimiento, y se define como la energía cinética (Ec) del mismo.

La ecuación (10.7) permite observar que existe una relación entre el trabajo realizado por una fuerza sobre un cuerpo y su energía cinética, ya que:

$$\vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = W \quad \text{y} \quad \Delta Ec \equiv \frac{1}{2} m \cdot \vec{v}^2 - \frac{1}{2} m \cdot \vec{v}_o^2 \quad (10.8)$$

es decir que:

$$W = \Delta Ec \quad (10.9)$$

Puesto en palabras, el *trabajo total* realizado por la *fuerza neta* que actúa sobre un cuerpo es igual a la variación de energía cinética del mismo. Obsérvese, por otro lado, que las unidades del trabajo (joule) son equivalentes a las unidades de la energía cinética.

Fuerzas conservativas y disipativas

Si el trabajo realizado por una fuerza para mover un cuerpo a lo largo de una trayectoria cerrada es nulo, entonces esa fuerza es definida como fuerza conservativa (la fuerza gravitacional por ejemplo). La propiedad conservativa de la fuerza se puede expresar:

$$\text{si } \oint \vec{F} \cdot d\vec{r} = 0 \Rightarrow \vec{F} \text{ es conservativa}$$

Esto se puede asociar intuitivamente con la capacidad intrínseca de la fuerza de conservar la energía del cuerpo o, de no tratarse de una fuerza conservativa, de provocar la pérdida (o disipación para ser físicamente más exactos) de esa energía. Las fuerzas conservativas pueden ser del tipo constantes en el tiempo (como la fuerza de gravedad ya citada) o variables, como la fuerza de un resorte que actúe de acuerdo a la Ley de Hooke. Algunos ejemplos de fuerzas disipativas son la fuerza de deformación, la fuerza de rozamiento, el ruido, el arrastre viscoso, o el calor.

Energía potencial

El trabajo de una fuerza para mover un cuerpo a lo largo de un camino entre dos puntos del espacio se calcula como:

$$W = \int_{r_o}^r \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

Si se llama V a la función primitiva de F :

$$W = \int_{r_o}^r \vec{F} \cdot d\vec{r} = -[V(x; y; z) - V(x_o; y_o; z_o)]$$

La función V se denomina *energía potencial*. Esta última ecuación además indica que, en el caso en que no es necesario conocer la trayectoria de una masa para calcular el trabajo de la fuerza que la mueve (o sea, bajo un campo de fuerzas conservativas), dicho trabajo se puede calcular mediante la siguiente función escalar:

$$W_{f\text{conservativas}} = -\Delta V \quad (10.10)$$

Energía mecánica total y conservación de la energía

Se puede definir a la energía mecánica total de un sistema como la sumatoria de la energía potencial y de la energía cinética del mismo. Así, la variación de energía mecánica total se puede expresar como la variación de energías cinética y potencial de acuerdo a lo siguiente:

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p \quad (10.11)$$

Recordando la ecuación (10.9) y suponiendo que el trabajo total se compone de la sumatoria del trabajo realizado por las fuerzas conservativas y del realizado por las fuerzas no conservativas (disipativas) se puede escribir la siguiente ecuación:

$$W_{f_{conservativas}} + W_{f_{no\ conservativas}} = \Delta E_c$$

sustituyendo desde la ecuación (10.10) la expresión anterior se transforma en:

$$-\Delta E_p + W_{f_{no\ conservativas}} = \Delta E_c \quad \text{ó} \quad W_{f_{no\ conservativas}} = \Delta E_c + \Delta E_p \quad (10.12)$$

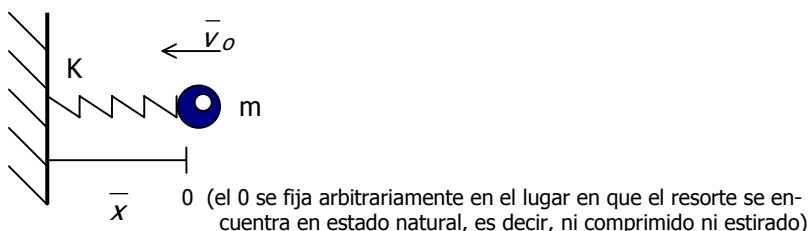
De esta última ecuación y de la ecuación (7.11) se puede concluir que la variación de energía mecánica total del sistema es equivalente al trabajo realizado por las fuerzas no conservativas que actúan sobre él. En el caso particular en que no existen fuerzas disipativas, la energía mecánica total se conserva, o sea:

$$\Delta E_c + \Delta E_p = 0 \quad (10.13)$$

Movimiento armónico simple

El modelo que se usa para analizar el comportamiento de los vehículos modernos en los accidentes incluye sistemas de masas y resortes, y por lo tanto a continuación se describen los fenómenos físicos de los resortes que se comportan de acuerdo a la Ley de Hooke y también los fenómenos del movimiento armónico simple.

Ley de Hooke



La Ley de Hooke establece la relación que existe entre la fuerza elástica ($\overline{F}_e$) que opone un resorte al ser comprimido (o estirado) de manera de volver a su longitud original. La ley dice que mientras la deformación del resorte sea elástica, la fuerza será directamente proporcional a la longitud comprimida o estirada, de acuerdo a la siguiente expresión:

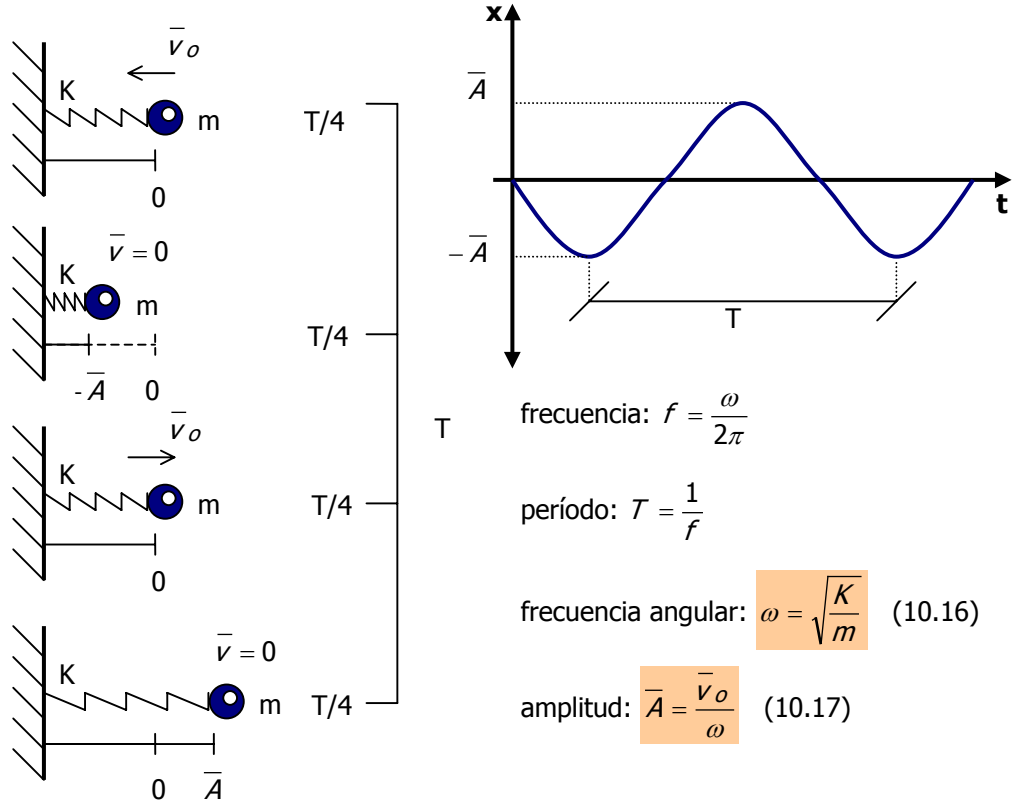
$$\overline{F}_e = -K \cdot \Delta x \quad (10.14)$$

Al tratarse de una fuerza conservativa, como hemos indicado anteriormente, se puede asociar a la fuerza elástica del resorte una energía potencial elástica que la caracteriza, de acuerdo a lo siguiente:

$$E_{pe} = \frac{1}{2} K (\bar{x}^2 - \bar{x}_o^2) \quad (10.15)$$

Movimiento armónico simple

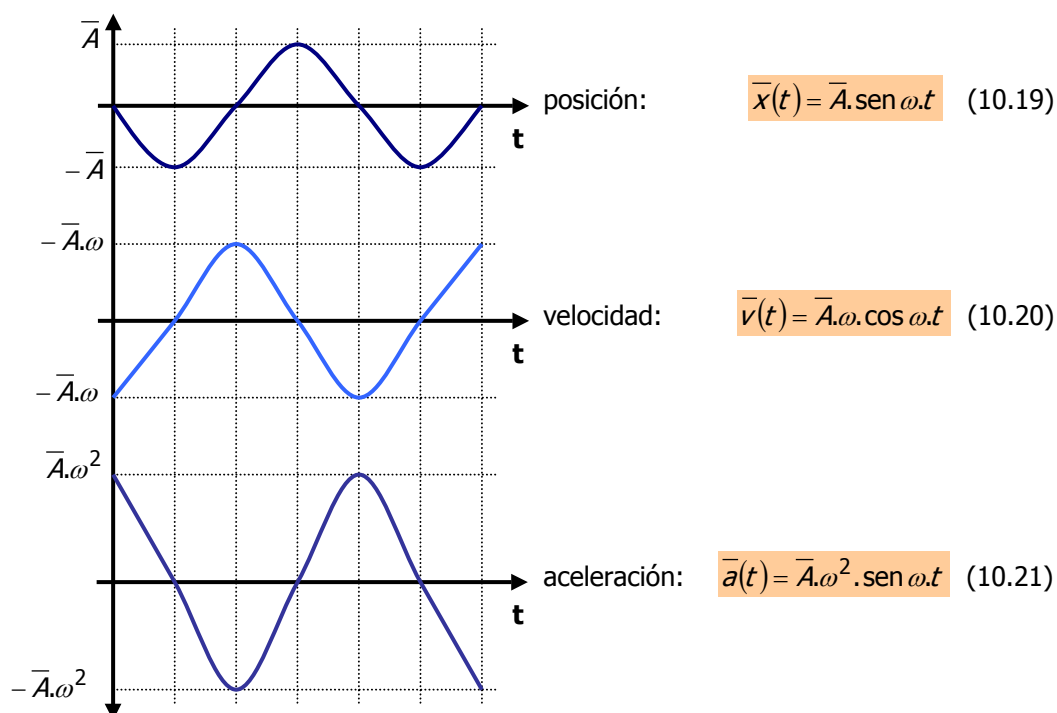
Se denomina movimiento armónico simple al movimiento de un cuerpo que oscila bajo la influencia de una fuerza de tipo conservativa, proporcional al desplazamiento del cuerpo. Si se supone el caso de una masa m , que se mueve unida a un resorte de masa nula y coeficiente de proporcionalidad K , y sin que exista fuerza de rozamiento alguna, se pueden indicar los siguientes parámetros que caracterizan su movimiento:



Es importante detenerse en el concepto de frecuencia angular ya que, siendo una propiedad inherente del resorte y de la masa unida a él, es el parámetro que caracteriza al oscilador armónico. Esto último es de vital importancia en el momento del accidente de un vehículo, ya que siendo la velocidad del choque una variable desconocida, la aceleración a la que será sometido el automóvil sólo se podrá controlar (desde el punto de vista del diseño del automóvil) a través de este parámetro, que relaciona el coeficiente K con la masa del vehículo. Además, es de utilidad expresar la ecuación (10.17) de otra manera, para evidenciar esto último:

$$\bar{A} = \frac{\bar{v}_o}{\omega} = \frac{1}{\sqrt{\frac{K}{m}}} \cdot \bar{v}_o \Rightarrow \bar{A} = \frac{1}{\sqrt{\frac{K}{m}}} \cdot \bar{v}_o \quad (10.18)$$

Por otro lado las ecuaciones que caracterizan el movimiento armónico simple son las que se encuentran a continuación:



Los últimos aspectos que se deben destacar del movimiento armónico simple se relacionan nuevamente con la aceleración. Por un lado, tal como se deduce de la ecuación (10.21), **la aceleración no es constante a lo largo del tiempo**. Por el otro, la aceleración se hace máxima en el instante en que la función seno toma los valores 1 ó -1 (que equivale al instante de máxima compresión o elongación del resorte). Es entonces cuando la aceleración vale:

$$a(t) = A \cdot \omega^2$$

ó, puesto en función de los parámetros que caracterizan a un accidente:

$$a(t) = A \cdot \omega^2 = \frac{v_o}{\omega} \cdot \omega^2 = v_o \cdot \omega = v_o \cdot \sqrt{\frac{K}{m}}$$

es decir que:

$$\text{máx } a = v_o \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (10.22)$$

A lo que se le puede sumar una ecuación adicional que permite calcular la aceleración media, la cual se puede hallar de la siguiente manera:

$$a_{media} = \frac{\int_{t_o}^{t_f} a dt}{\Delta t} = \frac{\int_{t_o}^{t_f} A\omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) dt}{\Delta t} = \frac{A\omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \Big|_{t_o}^{t_f}}{\Delta t} = \frac{A\omega \cdot \cos(\omega \cdot t_f) - A\omega \cdot \cos(\omega \cdot t_o)}{\Delta t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a_{media} = \frac{A\omega \cdot (\cos(\omega \cdot t_f) - 1)}{t_f}$$

Con las siguientes suposiciones: $t_o=0$; $t_f = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\bar{v}_o}{\text{máx } a}$; $\omega = \frac{\text{máx } a}{\bar{v}_o}$; $\bar{A} = \frac{\bar{v}_o^2}{\text{máx } a}$

La ecuación anterior se convierte en:

$$a_{media} = \frac{A\omega \cdot (\cos(\omega \cdot t_f) - 1)}{t_f} = \frac{\frac{\bar{v}_o^2}{\text{máx } a} \cdot \frac{\text{máx } a}{\bar{v}_o} \cdot \left(\cos\left(\frac{\text{máx } a}{\bar{v}_o} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\bar{v}_o}{\text{máx } a}\right) - 1 \right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\bar{v}_o}{\text{máx } a}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a_{media} = \text{máx } a \cdot \frac{2 \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - 1 \right)}{\pi} = -\frac{2}{\pi} \text{máx } a \Rightarrow$$

$$\Rightarrow |a_{media}| = \frac{2}{\pi} \text{máx } a \quad (10.23)$$

El último concepto importante tiene que ver con el tiempo en que actúa esa aceleración media, pero puesto en función de la velocidad inicial y la aceleración máxima alcanzada. Para llegar a esa ecuación se puede empezar escribiendo el tiempo en función de la frecuencia angular:

$$T = \frac{1}{f} \text{ y } f = \frac{\omega}{2\pi} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\text{como } t = \frac{T}{4} \Rightarrow t = \frac{\pi}{2\omega} \quad (10.24)$$

Por otro lado, se puede escribir a la frecuencia angular en función de la aceleración máxima y la velocidad inicial, usando la ecuación (10.17):

$$\bar{A} = \frac{\bar{v}_o}{\omega} \Rightarrow \omega = \frac{\bar{v}_o}{\bar{A}} \quad (10.25)$$

Y al mismo tiempo se puede obtener la siguiente expresión de las ecuaciones (10.17) y (10.22):

$$\text{máx } a = v_o \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} = v_o \cdot \omega \Rightarrow \omega = \frac{\text{máx } a}{v_o} \quad \text{y} \quad \bar{A} = \frac{\bar{v}_o}{\omega} \Rightarrow \bar{A} = \frac{\bar{v}_o}{\frac{\text{máx } a}{v_o}} = \frac{\bar{v}_o^2}{\text{máx } a} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \bar{A} = \frac{\bar{v}_o^2}{\text{máx } a} \quad (10.26)$$

Reemplazando $\bar{A}$ de esta última ecuación en la (10.25) se obtiene:

$$\omega = \frac{\text{máx } a}{\bar{v}_o}$$

Finalmente, reemplazando esto último en la ecuación (10.24) se llega a:

$$t = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2 \cdot \frac{\text{máx } a}{\bar{v}_o}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\bar{v}_o}{\text{máx } a} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\bar{v}_o}{\text{máx } a} \quad (10.27)$$

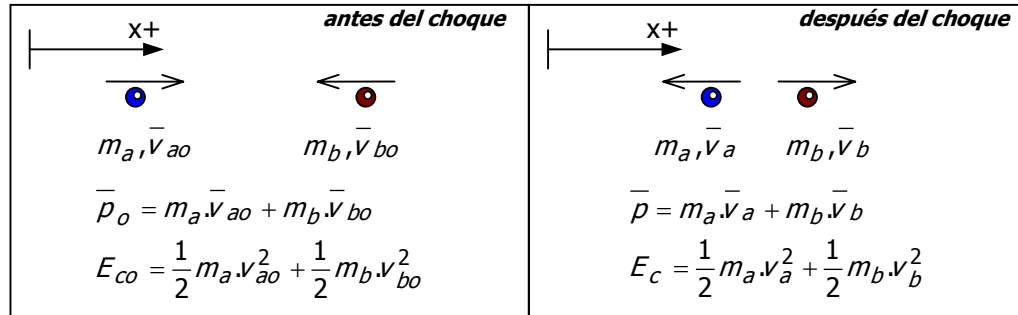
10.2. Análisis de choques elásticos e inelásticos

El modelo de resorte inelástico/masa que se usa para analizar el comportamiento de un automóvil moderno en una colisión resulta en la generación de distintos tipos de choques que están comprendidos, desde el punto de vista físico, entre un choque elástico y uno inelástico. La intención de esta sección es profundizar el estudio de los choques, incluyendo ejemplos numéricos que pueden ayudar a entender mejor los conceptos. Y dada la importancia de evitar un choque de tipo elástico se incluye un análisis del comportamiento del modelo resorte/masa y de la manera de evitar que se produzca un choque elástico entre la masa y, por ejemplo, un objeto fijo. Salvo que indique lo contrario, en todas las deducciones y ejemplos numéricos se suponen ciertas condiciones teóricas ideales como:

- movimiento en una dimensión ($\vec{i}$)
- resortes ideales (sin masa y de comportamiento de acuerdo a la Ley de Hooke)
- objetos puntuales
- ausencia de fuerzas disipativas

Colisiones perfectamente elásticas

El choque perfectamente elástico es aquél en que **dos o más cuerpos entran en contacto mientras están sometidos a fuerzas interiores, del tipo conservativas**. En otras palabras, es un tipo de choque en el que tanto la cantidad de movimiento como la energía cinética previas a la colisión permanecen constantes luego de su ocurrencia.



Si la cantidad de movimiento se mantiene constante:

$$\vec{p}_o = \vec{p} \Rightarrow m_a \cdot \vec{v}_{ao} + m_b \cdot \vec{v}_{bo} = m_a \cdot \vec{v}_a + m_b \cdot \vec{v}_b \quad (10.28)$$

Y si se conserva la energía cinética del sistema:

$$E_{co} = E_c \Rightarrow \frac{1}{2} m_a \cdot v_{ao}^2 + \frac{1}{2} m_b \cdot v_{bo}^2 = \frac{1}{2} m_a \cdot v_a^2 + \frac{1}{2} m_b \cdot v_b^2 \quad (10.29)$$

Se tienen entonces las dos ecuaciones que permiten despejar las incógnitas (las velocidades de cada cuerpo después de la colisión). Ordenando y dividiendo miembro a miembro las ecuaciones (10.28) y (10.29), y suponiendo que la velocidad inicial de cada cuerpo es distinta a la velocidad final se obtiene:

$$\bar{v}_{ao}^2 + \bar{v}_a^2 = \bar{v}_{bo}^2 + \bar{v}_b^2$$

Despejando $\bar{v}_a^2$ de esta última ecuación y reemplazando el resultado en la ecuación (10.24) se llega finalmente a:

$$\bar{v}_a = \frac{2m_b \bar{v}_{bo} + (m_a - m_b) \bar{v}_{ao}}{m_a + m_b} \quad (10.30)$$

De manera análoga se puede obtener la velocidad final del objeto b:

$$\bar{v}_b = \frac{2m_a \bar{v}_{ao} + (m_b - m_a) \bar{v}_{bo}}{m_a + m_b} \quad (10.31)$$

Éstas son las ecuaciones que permiten definir la situación de los cuerpos puntuales luego del accidente, tal como se puede observar en el siguiente ejemplo:

Ejemplo 10.A:

antes del choque

3000 kg., 36,1 m/s 1500 kg., -36,1 m/s

Se toma como ejemplo un sistema de dos cuerpos que se mueven en la misma dirección y sentidos contrarios. Los dos se mueven a 36,1 m/s ($\cong 130$ km/h), pero uno de ellos tiene en doble de masa que el otro. De las ecuaciones (10.30) y (10.31) se pueden hallar las velocidades de cada cuerpo luego del accidente:

$\bar{v}_a = -12,0$ m/s $\bar{v}_b = 60,1$ m/s

Quedando el sistema definido por los siguientes parámetros:

después del choque

3000 kg., -12,0 m/s 1500 kg., 60,1 m/s

El concepto más importante de este ejemplo (y de los que sigan) es la magnitud de la variación de velocidad experimentada por cada cuerpo:

$|\Delta \bar{v}_a| = 48,1$ m/s ($\cong 173$ km/h) $|\Delta \bar{v}_b| = 96,2$ m/s ($\cong 346$ km/h)

Se debe observar que **en ambos casos la magnitud de la variación de velocidad experimentada es mayor a la magnitud de la velocidad inicial de cada cuerpo**. Para reflexionar acerca de esta variación de velocidad se debe recurrir a la ecuación (10.28):

$$m_a \bar{v}_{ao} + m_b \bar{v}_{bo} = m_a \bar{v}_a + m_b \bar{v}_b \Rightarrow m_a \cdot \Delta \bar{v}_a = m_b \cdot \Delta \bar{v}_b \Rightarrow \frac{\Delta \bar{v}_a}{\Delta \bar{v}_b} = \frac{m_b}{m_a}$$

Es decir, que la relación entre las variaciones de velocidad de cada cuerpo es inversamente proporcional a la relación entre las masas de los objetos. Esto sirve para concluir que si el *objeto b* tiene la mitad de la masa del *objeto a*, entonces el primero sufrirá una variación de velocidad del doble de la sufrida por el segundo. Entonces, **en una colisión de tipo elástica entre dos vehículos, el vehículo de mayor masa es el que tiene ventajas sobre el otro, ya que sufre una menor variación de velocidad**. Ahora se puede analizar la influencia de la velocidad de cada objeto sobre las consecuencias que sufrirán cada uno en este tipo de choques. Para eso se puede observar el siguiente ejemplo:

Ejemplo 10.B:

antes del choque

1500 kg., 72,2 m/s 1500 kg., -36,1 m/s

En este segundo ejemplo se vuelve al sistema de dos cuerpos que se mueven en la misma dirección y sentidos contrarios. Esta vez los dos tienen la misma masa, 1500 kg., pero uno de ellos se mueve 36,1 m/s ($\cong 130$ km/h) y el otro al doble de esa velocidad, 72,2 m/s ($\cong 260$ km/h). También se recurre a las ecuaciones (10.30) y (10.31) para hallar las velocidades de cada cuerpo luego del accidente:

$\bar{v}_a = -36,1 \text{ m/s}$

$\bar{v}_b = 72,2 \text{ m/s}$

Quedando el sistema definido por los siguientes parámetros:

después del choque

1500 kg., -36,1 m/s 1500 kg., 72,2 m/s

Esta vez la magnitud de la variación de velocidad experimentada por cada cuerpo fue:

$|\Delta \bar{v}_a| = 108,3 \text{ m/s } (\cong 390 \text{ km/h})$

$|\Delta \bar{v}_b| = 108,3 \text{ m/s } (\cong 390 \text{ km/h})$

Se puede recurrir a la ecuación (10.30) para explicar la influencia de la velocidad de dos objetos que tienen la misma masa y colisionan:

$$\bar{v}_a = \frac{2m_b \bar{v}_{bo} + (m_a - m_b) \bar{v}_{ao}}{m_a + m_b}$$

Si ambas masas son iguales:

$$\bar{v}_a = \frac{2m\bar{v}_{bo} + (m - m)\bar{v}_{ao}}{m + m} = \frac{2m\bar{v}_{bo}}{2m} = \bar{v}_{bo} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \bar{v}_a = \bar{v}_{bo}$$

De manera análoga, utilizando la ecuación (10.31) se obtiene que:

$$\bar{v}_b = \bar{v}_{ao}$$

Es decir, que si ambos objetos tienen la misma masa, existe una transferencia de velocidades de uno a otro, y por lo tanto la variación de velocidad de los objetos es igual para los dos:

$$\Delta \bar{v}_a = \Delta \bar{v}_b$$

Que es lo mismo que decir que sin importar la velocidad de cada objeto en colisión, los dos sufren las mismas consecuencias al evaluar la variación de velocidad que cada uno sufre en el choque. Puesto en otras palabras, **la diferencia de masa entre objetos en colisión beneficia al más pesado en detrimento del más liviano. En cambio la diferencia de velocidades es indiferente, y ninguno de los dos objetos es perjudicado o beneficiado con relación al otro.** Un último aspecto de los choques elásticos que se debe considerar es el que hace a la variación de velocidad total del sistema. Para explicarlo primero se debe observar que en el caso particular de un solo cuerpo que impacta contra una pared (que se puede suponer de masa $\rightarrow \infty$ y velocidad $\rightarrow 0$) la ecuación (10.28) queda reducida a:

$$m_a \bar{v}_{ao} = m_a \bar{v}_a \Rightarrow \bar{v}_{ao} = \bar{v}_a$$

Pero a pesar de que no hay cambio ni de la magnitud de la velocidad ni de la dirección de la misma, sí existe un cambio en su sentido. Es decir que existe variación de la velocidad, ya que:

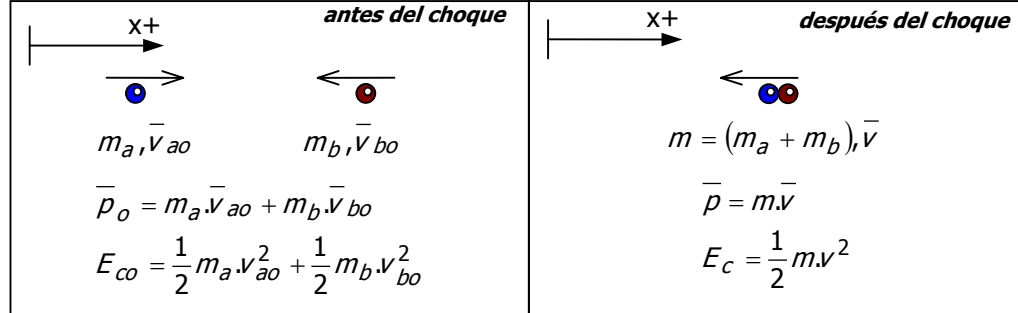
$$v_a = -v_{ao} \Rightarrow |\Delta \bar{v}_a| = 2|v_{ao}|$$

Este mismo concepto se puede extender al caso de la colisión entre dos vehículos. El fenómeno de conservación de la cantidad de movimiento indica que, si no hay variación de masa, la magnitud de la velocidad total original de los dos cuerpos se conserva. Pero como cambia el sentido, se puede demostrar que la variación de velocidad se expresa como:

$$|\Delta(\bar{v}_a + \bar{v}_b)| = 2(|v_{ao}| + |v_{bo}|) \quad (10.32)$$

Colisiones perfectamente inelásticas

El choque perfectamente inelástico es aquél en que **dos o más cuerpos entran en contacto mientras están sometidos a al menos una fuerza del tipo disipativa**. Eso genera que la cantidad de movimiento se conserve, pero la energía cinética no.

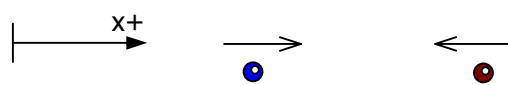


Si la cantidad de movimiento se mantiene constante:

$$\bar{p}_o = \bar{p} \Rightarrow m_a \bar{v}_{ao} + m_b \bar{v}_{bo} = (m_a + m_b) \bar{v} \Rightarrow \bar{v} = \frac{m_a \bar{v}_{ao} + m_b \bar{v}_{bo}}{(m_a + m_b)} \quad (10.33)$$

Se puede comparar la situación con la de los choques elásticos a través de este ejemplo:

Ejemplo 10.C:



antes del choque

3000 kg., 36,1 m/s 1500 kg., -36,1 m/s

Se toma como ejemplo el mismo sistema de dos cuerpos del ejemplo 10.A. De la ecuación (10.33) se puede obtener la velocidad del cuerpo (formado por la "unión" los dos cuerpos originales) luego del accidente:

$$\bar{v} = 12,1 \text{ m/s}$$

Quedando el sistema definido por los siguientes parámetros:



después del choque

4500 kg., 12,1 m/s

En este caso, la magnitud de la variación de velocidad experimentada por cada cuerpo es:

$|\Delta \bar{v}_a| = 24,0 \text{ m/s } (\cong 86 \text{ km/h})$

$|\Delta \bar{v}_b| = 48,0 \text{ m/s } (\cong 172 \text{ km/h})$

Al igual que en el caso de los choques elásticos, el objeto que sufre una mayor variación de velocidad es el más liviano, por las mismas razones anteriores. Esto debería dar una pista acerca de lo que pasa con las diferencias de velocidades iniciales, de acuerdo al siguiente ejemplo:

Ejemplo 10.D:

antes del choque

1500 kg., 72,2 m/s 1500 kg., -36,1 m/s

Ahora corresponde tomar el sistema de cuerpos del ejemplo 10.B. Otra vez, de la ecuación (10.33) se puede obtener la velocidad del objeto único que resulta del impacto:

$$\bar{V} = 18,0 \text{ m/s}$$

Quedando el sistema definido por los siguientes parámetros:

después del choque

3000 kg., 18,0 m/s

En este caso, la magnitud de la variación de velocidad experimentada por cada cuerpo es:

$$\left| \Delta \bar{v}_a \right| = 54,1 \text{ m/s } (\cong 195 \text{ km/h}) \qquad \left| \Delta \bar{v}_b \right| = 54,1 \text{ m/s } (\cong 195 \text{ km/h})$$

Se comprueba, tal como era de esperar, que la variación de velocidad de cada objeto es independiente de la velocidad inicial de cada uno. Es tiempo de analizar lo que sucede con la variación total del sistema. En el caso particular del cuerpo que impacta contra una pared se obtiene de la ecuación (10.33) que queda reducida a $\bar{v} = 0$. Es decir que:

$$\left| \Delta \bar{v}_a \right| = |v_{ao}|$$

Y para el caso de dos objetos:

$$\left| \Delta (\bar{v}_a + \bar{v}_b) \right| = (|v_{ao}| + |v_{bo}|) \quad (10.34)$$

Si se comparan las ecuaciones (10.32) y (10.34) se observa que la variación total de velocidad del sistema en un choque elástico es el doble que en un choque inelástico. La razón de esta diferencia se encuentra en la disipación de la energía cinética original, que en el caso particular de los accidentes de automóviles, se pierde a través de la deformación de los vehículos¹⁵⁸. A título de comentario, la pérdida de energía cinética del ejemplo 10.C se puede calcular con la ecuación (10.8):

¹⁵⁸ También en ruido, calor, rozamiento, etc., pero en lo que a estos ejemplos simplificados se refiere voy a considerar solamente el efecto de la deformación de la carrocería.

$$Ec_o = \frac{1}{2} m_a \cdot v_{ao}^2 + \frac{1}{2} m_b \cdot v_{bo}^2 = \frac{1}{2} 3000 \text{ kg} \cdot (36,1 \text{ m/s})^2 + 1500 \text{ kg} \cdot (-36,1 \text{ m/s})^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Ec_o \cong 2,93 \times 10^6 \text{ joule}$$

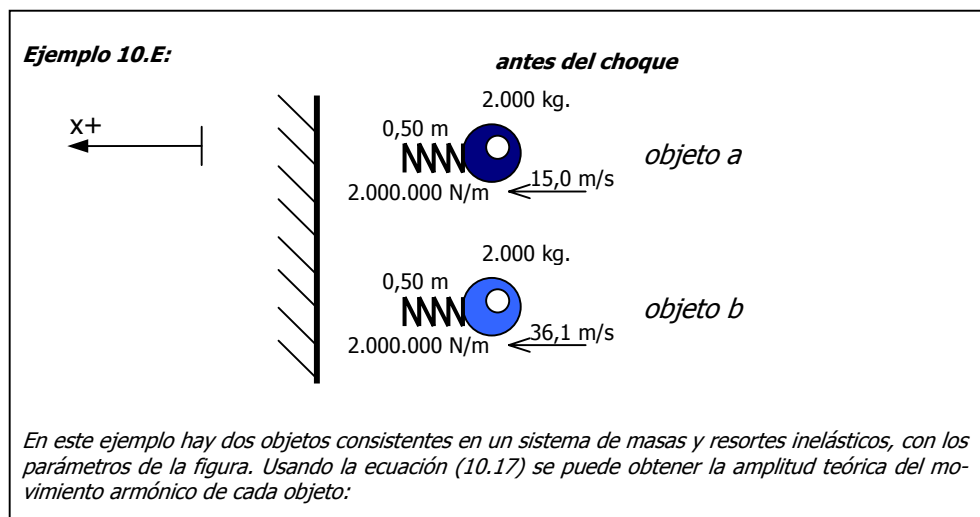
y

$$Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} 4500 \text{ kg} \cdot (12,1 \text{ m/s})^2 \cong 0,33 \times 10^6 \text{ joule}$$

O sea, que se perdió casi el 90% de la energía cinética original, y a pesar de **eso la variación de velocidad que sufrió cada objeto fue considerable**. Repitiendo el cálculo para el ejemplo 10.D se obtienen valores similares. El caso particular en donde se pierde el 100% de la energía cinética en forma de deformación es aquél en donde un solo objeto impacta una pared, o en donde ambos objetos tienen la misma masa y la misma velocidad. Para concluir el análisis de las colisiones inelásticas, en el siguiente resumen se puede hacer una comparación entre éstas y las colisiones elásticas:

- en las colisiones elásticas no hay transformación de energía cinética en energía de deformación.
- al mismo tiempo, la variación de velocidad experimentada por cada objeto es la mayor posible comparada con cualquier otro tipo de colisión.
- en las colisiones inelásticas hay transformación de energía cinética en energía de deformación, pudiendo darse el caso de que se pierda la totalidad de la energía de movimiento.
- en este último caso, donde se pierde la totalidad de la energía cinética es cuando se experimenta la menor variación de velocidad posible.

Todos los accidentes entre automóviles, o entre automóviles y objetos fijos se circunscriben a los límites que imponen estos tipos de colisiones. Además, como ya se ha explicado, el objeto que se deforma (de manera controlada) en los choques de automóviles es el resorte que tiene en su frente. Así es de utilidad analizar algunos aspectos de colisiones que involucran sistemas de masas y resortes, para poder evaluar mejor el comportamiento de un automóvil moderno en una colisión.

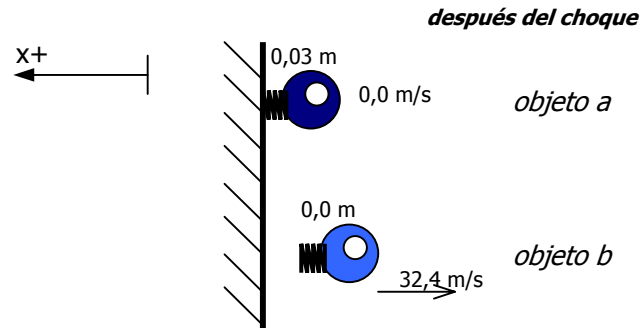


$$\bar{A}_a = 0,47 \text{ m} \quad \bar{A}_b = 1,14 \text{ m}$$

El objeto a, en consecuencia, detiene su marcha antes de impactar contra la pared. Pero el objeto b todavía se mueve a una velocidad que se puede calcular a partir de la ecuación (10.19), despejando el tiempo del desplazamiento de 0,50 m, y usándolo para calcular la velocidad en la ecuación (10.20), tras lo cual se produce un choque de tipo elástico, y el objeto rebota hacia atrás:

$$t = 0,0143 \text{ s} \quad \bar{V}_b = 32,4 \text{ m/s}$$

Quedando el sistema definido por los siguientes parámetros:



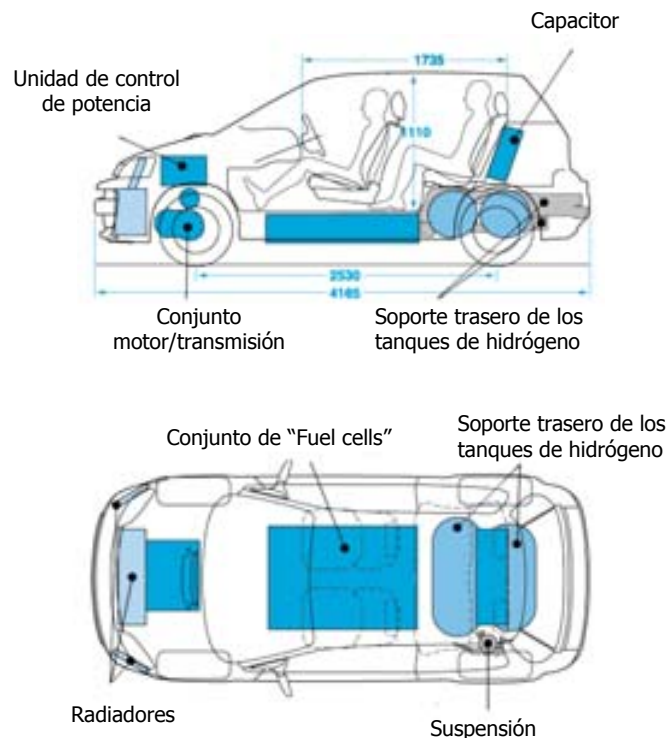
Se debe prestar particular atención al hecho que la velocidad del objeto b después del choque es equivalente al 90% de la velocidad original. En consecuencia, el resorte sólo pudo reducir la velocidad en un 10%, y **el objeto impactó la pared casi como si delante de él no hubiera habido resorte alguno.**

10.3. Automóviles no contaminantes

La decisión de adoptar un motor de tipo eléctrico en el automóvil propuesto en esta Tesis no surge solamente de la necesidad de reducir la contaminación del medio ambiente que generan los motores de combustión interna, sino al estado de desarrollo de fuentes alternativas de potencia, de las cuales las siguientes tipologías son las más destacadas:

Motor eléctrico – batería – “fuel cell”

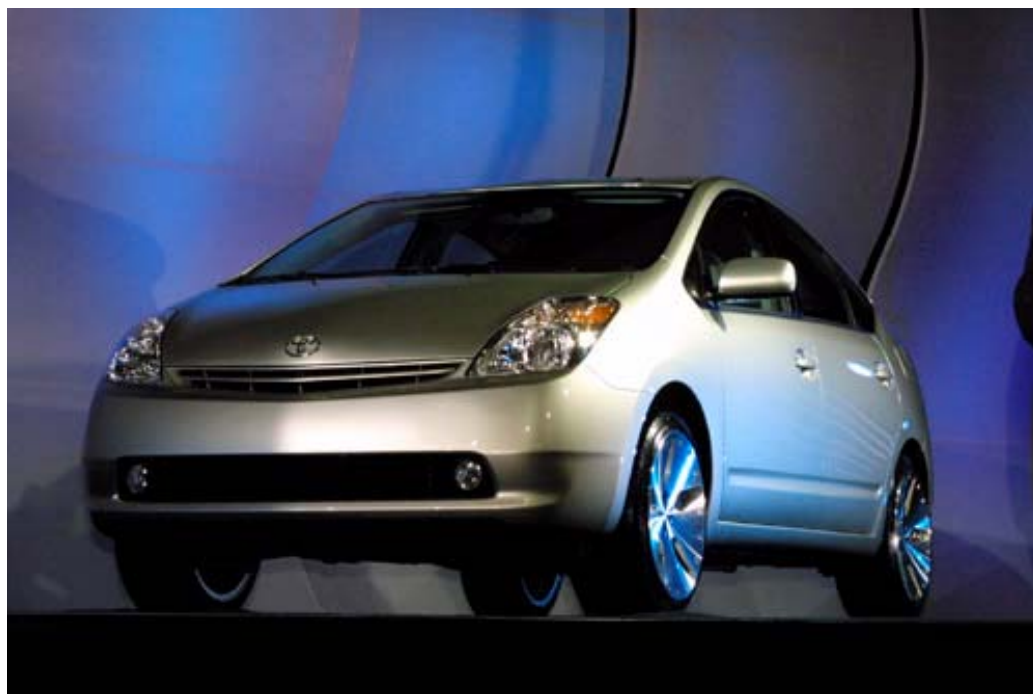
La mayoría de los proyectos se concentran en este tipo de solución, donde la fuente de alimentación de la batería (o del motor, según la condición de marcha) es un generador de electricidad que combina, en un reactor químico, hidrógeno con oxígeno. De esta manera tomando el hidrógeno del tanque (que se puede recargar mucho más rápidamente que la batería desde una fuente externa) y el oxígeno del aire se logra generar la electricidad necesaria de manera más eficaz que la alternativa anterior. El único automóvil de este tipo homologado en la actualidad que circular por las calles del mundo es el Honda FCX, cuyo esquema sigue a continuación:



Motor eléctrico – batería – motor de combustión interna

Esta es una variación de la alternativa anterior, donde quien genera la energía para alimentar al motor eléctrico es otro motor, de combustión interna. El hecho de contar

con dos motores, además brinda la ventaja de poder usarlos en paralelo, o alternadamente, según las condiciones de marcha. Un motor eléctrico es más adecuado para regímenes de rotación constantes, por ejemplo para una conducción a una velocidad estable (como ocurre en una autopista) pero no es capaz de entregar un pico de potencia durante un tiempo limitado como ocurre con un motor de combustión. Existen varios ejemplos de automóviles "híbridos" (palabra con la cual son denominados estos vehículos) entre los que se destaca el Toyota Prius, el primero de su categoría que ha logrado un éxito comercial importante.



El Toyota Prius permite desarrollar una velocidad máxima de casi 170 km/h con un consumo medio de 6,5 litros/100 km. Además su precio de cerca de 25.000 euros se adecua al costo de vehículos de producción en serie de su misma categoría.

El mayor inconveniente de este automóvil es que el motor de combustión interna funciona a nafta, reduciendo la cantidad de gases nocivos liberados en la atmósfera con respecto a un auto convencional, pero sin eliminarlos del todo. Por eso es probable que en el futuro se reemplace dicho combustible por gas, y más tarde por hidrógeno. Para completar la descripción de este tipo de generación de potencia se va a describir las distintas modalidades de funcionamiento de un automóvil híbrido como el Toyota Prius.

- **arranque inicial:** cuando el Prius está detenido, el motor de combustión interna se apaga. Para vencer la inercia al comenzar a marcha, la batería envía una fuerte corriente al motor eléctrico, que eroga el par máximo en cualquier régimen de rotación.



- **conducción normal:** *circulando a velocidad constante, ambos motores colaboran, funcionando en paralelo. Mientras tanto, las baterías no pierden carga ya que el motor eléctrico es alimentado por el generador de electricidad que se mueve con una cuota de la energía del motor de combustión interna.*



- **máxima aceleración:** *existen momentos, como por ejemplo en los sorpasos, donde se necesita una cuota adicional de potencia. La central de control, al recibir una señal del pedal de aceleración, envía una fuerte carga eléctrica desde la batería, que aumenta la potencia entregada por el motor eléctrico.*



- **disminución de velocidad:** *mientras el automóvil frena, el motor eléctrico invierte su marcha, convirtiéndose en un generador eléctrico, cargando la batería.*



- **recarga de la batería:** *cuando se detecta que la carga de la batería es inferior a lo aconsejable, el generador conectado al motor de combustión interna cede parte de la energía a la batería. Esto puede ocurrir mientras el vehículo se encuentra en marcha, o también cuando está detenido.*



Motor de combustión interna (a hidrógeno)

Todas las alternativas anteriores presentan un serio problema al tener en cuenta la potencia que erogaban los motores eléctricos. Por eso las terminales que diseñan automóviles para quienes la potencia y la velocidad son una necesidad básica de importancia están desarrollando la alternativa de motores a combustión interna alimentados con hidrógeno. No existen autos de serie actualmente en comercialización, pero sí algunos prototipos que funcionan como el siguiente BMW Serie 7 reformado:



Según los técnicos de BMW un motor de 3.000 cm³ alimentado a hidrógeno podría desarrollar entre 200 y 400 CV, contra los "modestos" 70/80 CV de un motor eléctrico con "fuel cells", lo cual hace a los primeros más aptos para clientes ávidos de potencia.

10.4. Organismos de seguridad

A continuación se indica una breve lista que resume los organismos más importantes dedicados a la seguridad de impacto. Existen otros organismos de seguridad vial que tienen otros objetivos, como la promoción de los resultados de los ensayos de impacto, y que en general se nutren de la misma información que generan los organismos aquí citados y, por lo tanto, no se listan en este resumen.

New Car Assessment Program

NCAP Australia

www.aaa.asn.au

NCAP Estados Unidos

www.nhtsa.dot.gov

crash.test@nhtsa.dot.gov

NCAP Europa

www.euroncap.com

NCAP Japón

www.nasva.go.jp

admin@nasva.go.jp

Organismos internacionales

European Commission – Directorate-General for Energy and Transport

www.europa.eu.int

tren-rsc-contact@cec.eu.int

FIA Foundation for the Automobile and Society

www.fiafoundation.com

info@fiafoundation.com

Global Road Safety Steering Committee

www.globalroadsafety.org

mmcintyre@taskforce.org

International Research Council on the Biomechanics of Impact (IRCOBI)

www.ircobi.org

charpenne@inrets.fr

International Road Safety Organization (PRI)

www.lapri.org

info@lapri.org

International Consumer Research & Testing (ICRT)

www.international-testing.org

secretariat@international-testing.org

International Traffic Medicine Association

www.trafficmedicine.org

World Health Organization

www.who.int

Organismos de gobierno

Australian Transport Safety Bureau (ATSB)

www.atsb.gov.au

atsbinfo@atsb.gov.au

Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

www.bmvbw.de

Organismos de gobierno (continuación)

Danish Road Directorate (DRD)

www.vd.dk

vd@vd.dk

Danish Transport Research Institute (DTF)

www.dtf.dk

dtf@dtf.dk

Department of Transport United Kingdom

www.dft.gov.uk

road.safety@dft.qsi.gov.uk

Dutch Transport Safety Board

www.rvtv.nl

rvtv@rvtv.nl

Federal Highway Research Institute (BAST)

www.bast.de

ic@bast.de

Finnish Road Administration

www.tieh.fi

www.yllapito@finnra.fi

French National Institute for Transport and Safety Research (INRETS)

www.inrets.fr

webmaster@inrets.fr

Institute for Road Safety Research (SWOV) (Holanda)

www.swov.nl

info@swov.nl

Institute of Transport Economics Norway (TØI)

www.toi.no

toi@toi.no

Institute of Transportation, Traffic, Highway -and Railway- Engineering (IVT)

www.ivt.baum.ethz.ch

webmaster@ivt.baug.ethz.ch

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Japón)

www.mlit.go.jp

Ministry of Transport (Canadá)

www.tc.gc.ca

webfeedback@tc.gc.ca

Secourité Routiere

www.securiteroutiere.gouv.fr

webmestre-internet.DSCR@equipement.gouv.fr

Swedish Accident Investigation Board

www.havkom.se

info@havkom.se

Swedish National Road Administration (SNRA)

www.vv.se

vaqverket@vv.se

Swedish National Road and Transport Institute (VTI)

www.vti.se

vti@vti.se

Technical Reserach Centre of Finland (VTT)

www.vtt.fi

Veli-Pekka.Kallberg@vtt.fi

Organismos independientes

American Automobile Association Foundation for Traffic Safety

www.aaaafoundation.org

info@aaaafoundation.org

Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM)

www.carcrash.org

info@aaam.org

Organismos independientes (continuación)

Auto Motor und Sport

www.motor-presse-online.de

Folksam

www.folksam.se

Insurance Institute for Highway Safety

www.hwysafety.org

Universidades

ATR Institute University of New Mexico

www.unm.edu

atr@unm.edu

Center for Public Safety Northwestern University

www.server.traffic.northwestern.edu

nucps@northwestern.edu

Highway Safety Research Center (University of North Carolina)

www.hsrc.unc.edu

doug_robertson@unc.edu

Institute of Transportation Studies (Berkeley)

www.its.berkeley.edu

its@its

International Motor Vehicle Program at MIT

www.web.mit.edu

imvpmail@mit.edu

Monash University (Australia)

www.monash.edu.au

inquiries@monash.edu.au

Texas Transportation Institute (University of Texas)

www.tti.tamu.edu

webmasters@ttimail.tamu.edu

University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI)

www.umtri.umich.edu

umtri@umich.edu



LLEVALO SIEMPRE ABROCHADO

10.5. Índice de tablas y gráficos

Tablas

Capítulo 2

2.1) Estimación del costo económico anual de los accidentes de tránsito en Argentina y países seleccionados.	22
2.2) Muertes por accidentes de tránsito en el mundo con relación al total de muertes.	24
2.3) Evolución proyectada de las causas más frecuentes de muerte en el mundo.	25
2.4) Evolución de la proporción de accidentes de tránsito fatales en los Estados Unidos (1990-2000).	27
2.5) Evolución de la cantidad de muertos y heridos en por accidentes de tránsito en Argentina (1999-2002).	28
2.6) Indicadores principales de los accidentes de tránsito en Argentina y países seleccionados (2001).	28
2.7) Ranking de áreas de conflicto para la seguridad vial de acuerdo a expertos europeos seleccionados.	34

Capítulo 4

4.1) Comparación de la evolución de las características más importantes del modelo medio del Volkswagen Golf.	76
4.2) Comparación de la evolución de las características más importantes del modelo deportivo del Volkswagen Golf.	77
4.3) Comparación de la evolución de las características más importantes de las distintas versiones del Volkswagen Golf.	77
4.4) Agrupación de los dispositivos de seguridad de un automóvil de acuerdo a su participación en la secuencia de eventos.	78
4.5) Dispositivos de seguridad del prototipo Volvo SCC, agrupados de acuerdo a su participación en la secuencia de eventos.	104

Capítulo 5

5.1) Riesgo relativo de cada sector del cuerpo humano en función de haber recibido un impacto directo severo.	131

Capítulo 6

6.1) Riesgo relativo en un accidente de tránsito para los ocupantes de un vehículo según el tipo de vehículo (EE.UU. – 2000).	150
6.2) Cantidad de vehículos involucrados en accidentes de tránsito según el tipo de vehículo (EE.UU. – 2000)	151
6.3) Cantidad de accidentes según el límite de velocidad del lugar del impacto (EE.UU – 2000).	152
6.4) Riesgo relativo en un accidente de tránsito para los ocupantes de un vehículo según la posición ocupada en el vehículo (EE.UU. – 2000).	153
6.5) Agrupación de los dispositivos de seguridad de un automóvil de acuerdo a su participación en la secuencia de eventos.	156
6.6) Funciones principales de los dispositivos de seguridad de un automóvil de acuerdo a su participación en la secuencia de eventos.	162
6.7) Energía cinética en el momento del impacto entre dos vehículos Saab 9-3.	173

Capítulo 6 (continuación)

6.8) Porcentaje de heridos y muertos en función de la utilización del cinturón de seguridad (EE.UU. – 2000). _____	190
6.9) Porcentaje de conductores de automóviles y camionetas involucrados en accidentes de tránsito que utilizaban el cinturón de seguridad (EE.UU. – 2000). _____	192
6.10) Muertes potenciales por accidentes de tránsito (EE.UU. – 2000). _____	193
6.11) Resultados de los distintos programas de ensayos de impacto de vehículos. _____	196
6.12) Cantidad de ocupantes de un automóvil involucrados y muertos en función de la distancia entre ejes del automóvil (EE.UU. – 2000). _____	196
6.13) Riesgo de sufrir heridas serias o fatales en función de la calificación obtenida por el vehículo en el programa de ensayo EuroNCAP. _____	197
6.14) Evolución de la cantidad de vehículos ensayados y su calificación promedio en el programa de ensayo EuroNCAP (1996-2003). _____	198

Capítulo 7

7.1) Agrupación de los dispositivos de seguridad de un automóvil de acuerdo a su participación en cada sector del vehículo. _____	209
7.2) Velocidad máxima de cada tipo de accidente antes de que ocurran choques de tipo elástico de acuerdo a la estructura actual de un automóvil. _____	214
7.3) Largo teórico para cada sector del vehículo para evitar que ocurran choques de tipo elástico manteniendo el coeficiente de rigidez actual. _____	215
7.4) Coeficiente teórico para cada sector del vehículo para evitar que ocurran choques de tipo elástico manteniendo el largo actual de cada sector. _____	216
7.5) Aceleración media y tiempo de acción para un vehículo con las dimensiones actuales y coeficientes de rigidez teóricos. _____	217
7.6) Largo y coeficientes teóricos para cada sector del vehículo para evitar que ocurran choques de tipo elástico variando el largo y el coeficiente de seguridad actuales. _____	219
7.7) Aceleración media y tiempo de acción para un vehículo con dimensiones y coeficientes de rigidez teóricos. _____	219
7.8) Variación del coeficiente de rigidez teórica de cada sector del vehículo en función de su variación de masa en condición de marcha. _____	223
7.9) Innovaciones en los dispositivos de seguridad de la estructura exterior de un automóvil de acuerdo a su participación en la secuencia de eventos. _____	224
7.10) Innovaciones en los dispositivos de seguridad del habitáculo de un automóvil de acuerdo a su participación en la secuencia de eventos. _____	235
7.11) Innovaciones en los dispositivos de sujeción de un automóvil de acuerdo a su participación en la secuencia de eventos. _____	241
7.12) Innovaciones en los dispositivos de seguridad de la estructura interior de un automóvil de acuerdo a su participación en la secuencia de eventos. _____	248

Capítulo 8

8.1) Estimación del beneficio esperado por disminución de víctimas de accidentes de tránsito en los Estados Unidos. _____	272
8.2) Posible calificación a la seguridad de impacto ofrecida por un automóvil en función de la probabilidad de sufrir heridas serias o fatales. _____	276
8.3) Ejemplo de matriz de calificación a la seguridad de impacto ofrecida por un automóvil en función de la probabilidad de sufrir heridas serias o fatales. _____	276
8.4) Total mundial de ventas de automóviles y participación de cada uno de los grupos industriales de fabricantes. _____	277
8.5) Indicadores de importancia del Estado de Resultados de la empresa Volkswagen para el año 2003. _____	278

Capítulo 8 (continuación)

8.6) Contribución promedio por vehículo de la empresa Volkswagen para el año 2003. _____	278
8.7) Ventas por modelo de la empresa Volkswagen para el año 2003. _____	279
8.8) Ejemplo del aumento de ventas de vehículos "seguros" de la empresa Volkswagen para los nueve años posteriores al desarrollo del nuevo automóvil. _____	280
8.9) Resumen de innovaciones a introducir en la primera etapa de modificación del automóvil actual a uno más seguro. _____	290
8.10) Resumen de innovaciones a introducir en la segunda etapa de modificación del automóvil actual a uno más seguro. _____	291
8.11) Resumen de innovaciones a introducir en la tercera etapa de modificación del automóvil actual a uno más seguro. _____	292

Gráficos

Capítulo 2

2.1) Frecuencia relativa de muertos y heridos cada cien mil habitantes en los Estados Unidos, de acuerdo a la edad (2000). _____	23
2.2) Evolución de la cantidad de accidentes totales cada 100 millones de kilómetros recorridos en los Estados Unidos (1990-2000). _____	26
2.3) Evolución de la cantidad de accidentes fatales cada 100 millones de kilómetros recorridos en los Estados Unidos (1990-2000). _____	26
2.4) Evolución del índice de muertos y heridos cada 100 millones de kilómetros recorridos en los Estados Unidos (1990-2000). _____	27
2.5) Evolución de la cantidad total de accidentes en los Estados Unidos (1988-2000). _____	29
2.6) Extrapolación lineal de la cantidad total de accidentes en los Estados Unidos. _____	29
2.7) Extrapolación logarítmica de la tasa de cantidad de accidentes cada 100 millones de kilómetros recorridos en los Estados Unidos. _____	30
2.8) Evolución de la cantidad de kilómetros recorridos anualmente por habitante en los Estados Unidos (1990-2000). _____	31
2.9) Extrapolación lineal de la cantidad de kilómetros recorridos anualmente en los Estados Unidos. _____	31
2.10) Evolución de la tasa de cantidad de muertos cada 100 millones de kilómetros recorridos en los Estados Unidos (1966-2000). _____	37

Capítulo 4

4.1) Cantidad de versiones para cada modelo Volkswagen en Italia (diciembre 2002). _____	74
4.2) Franja de precios para cada modelo Volkswagen en Italia (diciembre 2002). _____	74
4.3) Comparación de la distancia de frenado en función de la velocidad inicial entre un Lamborghini Murciélagos y un Opel Corsa. _____	84

Capítulo 5

5.1) Deformación del vehículo en función de la velocidad inicial del impacto, para un modelo de un resorte inelástico y otro de dos resortes inelásticos. _____	118
5.2) Ejemplo de tipo deformación observada en un Ford Escort (años 1981/1985) y en una Isuzu Rodeo (años 1993/1995). _____	119
5.3) Ejemplo de deformación del vehículo en función de la velocidad inicial del impacto, para un modelo de columna delgada. _____	120

Capítulo 5 (continuación)

5.4) Frecuencia de conductores muertos con relación a los involucrados en los Estados Unidos, de acuerdo a la edad y al sexo (2000). _____	130
5.5) Tiempo máximo tolerable de exposición a la aceleración para el cuerpo humano (estimación preliminar). _____	134
5.6) Tiempo máximo tolerable de exposición a la aceleración para el cuerpo humano (estimación modificada). _____	135
5.7) Tiempo máximo tolerable de exposición a la aceleración para el cuerpo humano (detalle de estimación modificada). _____	135
5.8) Tiempo máximo tolerable de exposición a la aceleración para el cuerpo humano (detalle de estimación a considerar). _____	136
5.9) Tiempo máximo tolerable de exposición a la aceleración para el cuerpo humano (detalle de estimación definitiva a considerar). _____	139

Capítulo 6

6.1) Tipos de automóviles involucrados en el total de accidentes en los Estados Unidos (2000). _____	149
6.2) Tipos de automóviles involucrados en accidentes fatales en los Estados Unidos (2000). _____	149
6.3) Porcentaje de muertos con relación al total de muertos y heridos en accidentes graves en los Estados Unidos (2000), según el tipo de vehículo ocupado. _____	150
6.4) Porcentaje de heridos graves con relación al total de muertos y heridos en accidentes graves en los Estados Unidos (2000), según el tipo de vehículo ocupado. _____	150
6.5) Porcentaje de accidentes con un solo vehículo involucrado con relación al total de accidentes en los Estados Unidos (2000), según el tipo de vehículo. _____	151
6.6) Porcentaje de accidentes totales que ocurren en lugares donde el límite de velocidad es mayor a 64 km/h con relación al total de accidentes en los Estados Unidos (2000). _____	152
6.7) Porcentaje de accidentes fatales que ocurren en lugares donde el límite de velocidad es mayor a 64 km/h con relación al total de accidentes en los Estados Unidos (2000). _____	152
6.8) Participación relativa de cada sector del automóvil que sufre el primer impacto en el total de accidentes en los Estados Unidos (2000). _____	153
6.9) Participación relativa de cada sector del automóvil que sufre el primer impacto en accidentes fatales en los Estados Unidos (2000). _____	153
6.10) Porcentaje de muertos con relación al total de muertos y heridos en accidentes graves en los Estados Unidos (2000), según el lugar ocupado en el vehículo. _____	154
6.11) Proporción de ocupantes expulsados de vehículos (sin incluir motocicletas) en el total de muertos en relación en accidentes en los Estados Unidos (2000). _____	154
6.12) Proporción de accidentes con vuelcos en el total de accidentes en los Estados Unidos (2000). _____	155
6.13) Proporción de accidentes con vuelcos en accidentes fatales en los Estados Unidos (2000). _____	155
6.14) Proporción de accidentes con incendios en el total de accidentes en los Estados Unidos (2000). _____	155
6.15) Proporción de accidentes con incendios en accidentes fatales en los Estados Unidos (2000). _____	155
6.16) Movimiento de un resorte elástico (desplazamiento en función del tiempo). _____	166
6.17) Movimiento de un resorte inelástico (desplazamiento en función del tiempo). _____	166
6.18) Movimiento de una masa sujeta a un resorte inelástico de longitud mayor a la amplitud del movimiento armónico simple. _____	167

Capítulo 6 (continuación)

6.19) Movimiento de una masa sujeta a un resorte inelástico de longitud menor a la amplitud del movimiento armónico simple. _____	167
6.20) Ejemplo de impacto entre dos vehículos de igual masa que no sufren un choque de tipo elástico, con distintas velocidades iniciales de impacto. _____	175
6.21) Ejemplo de comparación de la longitud del resorte inelástico en relación con la amplitud del movimiento armónico simple para un modelo de Saab 9-3. _____	176
6.22) Ejemplo de posición del volante del modelo de automóvil Saab 9-3. _____	180
6.23) Ejemplo de posición del volante y del conductor no sujeto del modelo de Saab 9-3. _____	181
6.24) Ejemplo de posición del anclaje y del conductor sujeto para un accidente a 64 km/h del modelo de Saab 9-3. _____	184
6.25) Ejemplo de velocidad del anclaje y del conductor sujeto para un accidente a 64 km/h del modelo de Saab 9-3. _____	184
6.26) Ejemplo de aceleración del anclaje y del conductor sujeto para un accidente a 64 km/h del modelo de Saab 9-3. _____	185
6.27) Ejemplo de aceleración media y tiempo de acción para un accidente a 64 km/h del modelo de Saab 9-3 con relación a la tolerancia estimada. _____	185
6.28) Ejemplo de posición del anclaje y del conductor sujeto para un accidente a 130 km/h del modelo de Saab 9-3. _____	186
6.29) Comparación de aceleración media y tiempo de acción para un accidente a 64 km/h del modelo de Saab 9-3 con relación a la tolerancia estimada, con y sin pretensionador. _____	189
6.30) Muertes potenciales evitadas por el cinturón de seguridad y el airbag para ocupantes de automóviles y camionetas en los Estados Unidos (2000). _____	193
6.31) Evolución de la calificación promedio otorgada a los automóviles ensayados en el programa EuroNCAP (1996-2003). _____	198
6.32) Extrapolación potencial de la evolución de la calificación promedio otorgada a los automóviles ensayados en el programa EuroNCAP. _____	200

Capítulo 7

7.1) Estimación de aceleración media y tiempo de acción para accidentes en un vehículo con las dimensiones actuales y los coeficientes de rigidez modificados. _____	217
7.2) Estimación de aceleración media y tiempo de acción para accidentes en un vehículo con la nueva estructura exterior propuesta. _____	220

Capítulo 8

8.1) Total mundial de ventas de automóviles y participación de cada uno de los grupos industriales de fabricantes. _____	278
8.2) Ejemplo de ingresos anuales adicionales por la venta de automóviles más seguros para el grupo Volkswagen (primeros nueve años). _____	281