



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

*Título:*

**Análisis del Delta-V como parámetro para evaluar  
lesiones cervicales en impactos de baja energía**

*Title:*

**Suitability of Delta-V based analysis to evaluate  
cervical spine injuries in low-energy impacts**

*Autor:*

**Daniel García Peiró**

*Director:*

**Juan José Alba López**

Grado en Ingeniería Mecánica  
Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

20 de Junio de 2016





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. DANIEL GARCÍA PEIRÓ,

con nº de DNI 73003272F en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Grado, (Título del Trabajo)

Análisis del Delta-V como parámetro para evaluar lesiones cervicales en impactos de baja energía

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de Junio de 2016



Fdo: Daniel García Peiró



## RESUMEN

Dentro del ámbito de la accidentología de vehículos existen diferentes parámetros que sirven para caracterizar la magnitud de una colisión. Uno de ellos es el Delta-V ( $\Delta V$ ), cuyo objetivo reside en analizar la variación de velocidad que experimenta un vehículo durante un accidente.

A partir de ahí, ¿puede el Delta-V ser una magnitud capaz de proponer umbrales de daño para los ocupantes?, ¿es suficiente dicho parámetro para definir los múltiples factores que intervienen en un accidente de tráfico?

El presente documento estudiará dicho parámetro con el fin de esclarecer su validez y alcance dando respuesta a preguntas como: ¿por qué dos accidentes con un mismo Delta-V pueden tener consecuencias totalmente distintas para los ocupantes?

Asimismo, se analizarán tanto los aspectos que intervienen en el mecanismo de lesión cervical y su relación con el Delta-V como el marco legal aplicable que ampara dichas lesiones.



# TABLAS DE CONTENIDO

## Índice General

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. SECCIONES.....	11
2.1. DELTA-V.....	11
2.1.1. Conceptos previos.....	11
2.1.1.1. Física relacionada con la determinación del Delta-V .....	11
2.1.1.1.1. Visión general.....	11
2.1.1.1.2. Momento lineal y Delta-V .....	12
2.1.1.1.3. Energía cinética, energía de choque y Delta-V.....	13
2.1.1.1.4. Delta-V y Velocidad Equivalente de Barrera.....	14
2.1.1.2. Efectos del coeficiente de restitución en Delta-V .....	14
2.1.2. Importancia del Delta-V .....	17
2.1.2.1. Gravedad del choque y Delta-V .....	17
2.1.2.2. Relación entre el trabajo y la energía de choque con Delta-V.....	19
2.1.3. Umbral del Delta-V .....	22
2.1.3.1. Historia del método de obtención del umbral del Delta-V .....	22
2.1.3.2. Conjunto cabeza/cuello .....	23
2.1.3.3. Delta-V y fuerza G .....	25
2.1.3.4. Cálculo del Delta-V en lesiones de la columna cervical.....	26
2.1.3.5. Dinámica de la colisión.....	27
2.1.4. Relación entre el Delta-V y la lesión .....	33
2.1.4.1. Fractura cervical y Delta-V .....	33
2.1.4.2. Efecto de la edad y del género en la lesión.....	34
2.1.5. Análisis de deformaciones. Método de McHenry .....	34
2.1.5.1. Desarrollo del método .....	35
2.1.5.2. Cálculo de la energía absorbida .....	37

2.1.5.2.1. Energía absorbida mediante dos medidas de deformación .....	38
2.1.5.3. Hipótesis para la aplicación del método .....	40
2.1.6. Cálculo del Delta-V a partir de energías de deformación .....	41
2.2. WHIPLASH .....	45
2.2.1. Colisión a baja velocidad.....	45
2.2.1.1. Factores desencadenantes del mecanismo de lesión .....	45
2.2.1.2. Movimientos del ocupante.....	46
2.2.2. Factores humanos.....	46
2.2.2.1. Fuente de datos .....	47
2.2.2.2. Resultados de los factores humanos en relación con el latigazo cervical .....	49
2.2.2.2.1. Género de los ocupantes lesionados .....	49
2.2.2.2.2. Edad de los ocupantes lesionados.....	51
2.2.2.2.3. Altura de los ocupantes lesionados .....	52
2.2.2.2.4. Peso de los ocupantes lesionados .....	53
2.2.3. Investigaciones relacionadas con el Delta-V.....	54
2.2.3.1. Diseño del vehículo.....	54
2.2.3.2. Umbrales del Delta-V para producir lesión cervical .....	55
2.2.3.3. Otros estudios relacionados con lesiones cervicales .....	57
2.3. EJEMPLOS PRÁCTICOS.....	59
2.3.1. Ejemplos de colisiones ideales .....	59
2.3.1.1. Ejemplos de colisiones frontales.....	59
2.3.1.2. Ejemplo de colisión contra una barrera rígida.....	61
2.3.1.3. Ejemplo de colisión trasera .....	62
2.3.2. Ejemplos de colisiones mediante análisis de deformaciones .....	63
2.3.2.1. Ejemplo de colisión frontal.....	65
2.3.2.2. Ejemplo de colisión trasera .....	67
2.3.2.3. Ejemplos de colisiones contra un vehículo infinitamente rígido .....	68
2.3.2.3.1. Colisión frontal contra un vehículo infinitamente rígido .....	69
2.3.2.3.2. Colisión trasera de vehículo infinitamente rígido .....	70

2.4. MARCO LEGAL VIGENTE.....	73
2.4.1. Lesiones por traumatismo cervical menor.....	73
2.4.2. Indemnizaciones por traumatismo cervical menor.....	74
3. CONCLUSIONES .....	77
4. BIBLIOGRAFÍA.....	79

## Índice de Figuras

Figura 1. Colisión trasera .....	15
Figura 2. Relación entre el coeficiente de restitución y la velocidad de impacto .....	16
Figura 3. Relación entre la distancia de frenado y la deceleración G.....	18
Figura 4. Cinemática de un choque .....	19
Figura 5. Choque contra un poste fijo .....	19
Figura 6. Diagrama de energía del vehículo durante la colisión contra un poste rígido.....	20
Figura 7. Choque contra un poste deformable .....	20
Figura 8. Diagrama de energía en la colisión bajo dos hipótesis .....	21
Figura 9. Diagrama de energía en la colisión bajo varias hipótesis .....	21
Figura 10. Corredor de carga para la flexión del cuello .....	23
Figura 11. Corredor de carga para la extensión del cuello.....	24
Figura 12. Respuesta de flexión lateral .....	25
Figura 13. Movimientos de cuello y cabeza .....	28
Figura 14. Hiperextensión del cuello en ausencia de reposacabezas .....	29
Figura 15. Hiperextensión del cuello como consecuencia del rebote diferencial.....	29
Figura 16. Mecanismo de colisión durante un impacto trasero .....	30
Figura 17. Delta-V en vehículo delantero con parachoques elástico .....	32
Figura 18. Relación entre fractura cervical y Delta-V.....	34
Figura 19. Relación entre la edad y Delta-V en lesiones con AIS $\geq 3$ .....	34
Figura 20. Deformación residual frente a fuerza durante el impacto.....	35
Figura 21. Energía de deformación elástica .....	36
Figura 22. Dos medidas sobre un perfil de deformación .....	38
Figura 23. Hiperextensión e hiperflexión del cuello .....	45
Figura 24. Movimientos del latigazo cervical.....	46
Figura 25. Riesgo de lesión en diferentes partes del cuerpo.....	47
Figura 26. Riesgo de lesión según el tipo de colisión.....	48
Figura 27. Ratio del riesgo de lesión mujer/hombre (AIS $\geq 1$ ).....	50
Figura 28. Distribución de frecuencias de ocupantes lesionados en función de la edad .....	51
Figura 29. Riesgo de lesión de ocupantes en función de la edad .....	51
Figura 30. Distribución de frecuencias de ocupantes lesionados en función de la altura.....	52
Figura 31. Riesgo de lesión de ocupantes en función de la altura .....	53
Figura 32. Distribución de frecuencias de ocupantes lesionados en función del peso.....	53
Figura 33. Riesgo de lesión de ocupantes en función del peso.....	54
Figura 34. Colisión ideal frontal 1 .....	59

Figura 35. Colisión ideal frontal 2 .....	60
Figura 36. Colisión ideal frontal 3 .....	61
Figura 37. Seat Ibiza y Audi A4 .....	64
Figura 38. Deformación ( $D_i$ ) en cada una de las hipótesis de colisión .....	65
Figura 39. Ejemplo colisión frontal .....	65
Figura 40. Ejemplo colisión trasera .....	67
Figura 41. Ejemplo colisión frontal errónea .....	69
Figura 42. Delta-V en colisión frontal real y errónea .....	70
Figura 43. Ejemplo colisión trasera errónea .....	70
Figura 44. Delta-V en colisión trasera real y errónea .....	72
Figura 45. Error Delta-V .....	72

# Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Relación del Delta-V y las masas de los vehículos .....	12
Ecuación 2. Energía de aplastamiento .....	13
Ecuación 3. Relaciones Delta-V.....	13
Ecuación 4. Velocidad de impacto .....	14
Ecuación 5. Velocidad Equivalente de Barrera .....	14
Ecuación 6. Coeficiente de restitución .....	15
Ecuación 7. Ejemplo del coeficiente de restitución .....	15
Ecuación 8. Ejemplo Delta-V .....	16
Ecuación 9. Velocidad .....	17
Ecuación 10. Período natural.....	26
Ecuación 11. Constante cabeza/cuello .....	26
Ecuación 12. Energía cinética.....	27
Ecuación 13. Energía cinética en colisión trasera.....	30
Ecuación 14. Ecuación de momento lineal.....	31
Ecuación 15. Resolución ecuaciones 13 y 14 .....	31
Ecuación 16. Energía cinética en parachoques elásticos .....	31
Ecuación 17. Ecuación de momentos en parachoques elásticos.....	31
Ecuación 18. Resolución ecuaciones 16 y 17 .....	31
Ecuación 19. Fuerza McHenry.....	35
Ecuación 20. Energía absorbida (Ec.1) .....	37
Ecuación 21. Energía absorbida (Ec.2) .....	38
Ecuación 22. Energía absorbida (Ec.3) .....	38
Ecuación 23. Energía absorbida (Ec.4) .....	38
Ecuación 24. Perfil de deformación simplificado .....	39
Ecuación 25. Energía de deformación con dos medidas de deformación (Ec.1).....	39
Ecuación 26. Desarrollo integral $I_2$ .....	39
Ecuación 27. Desarrollo integral $I_1$ .....	40
Ecuación 28. Energía de deformación con dos medidas de deformación (Ec.2).....	40
Ecuación 29. Energía de deformación con dos medidas de deformación (Ec.3).....	40
Ecuación 30. Principio de Conservación de la Energía (Ec.1).....	41
Ecuación 31. Principio de Conservación de la Energía (Ec.2).....	41
Ecuación 32. Principio de Conservación de la Cantidad de Momento Lineal (Ec.1).....	42
Ecuación 33. Principio de Conservación de la Energía (Ec.2).....	42
Ecuación 34. Velocidad inicial del vehículo 2 .....	42

Ecuación 35. Desarrollo Principios de Conservación (Ec.1).....	43
Ecuación 36. Velocidad inicial del vehículo 1 .....	43
Ecuación 37. Desarrollo Principios de Conservación (Ec.2).....	43
Ecuación 38. Expresión analítica cálculo Delta-V.....	44
Ecuación 39. Aceleración.....	55
Ecuación 40. Energía absorbida ejemplo colisión ideal frontal .....	61
Ecuación 41. Velocidad ejemplo colisión ideal frontal.....	61
Ecuación 42. Ejemplo colisión ideal trasera.....	62
Ecuación 43. Delta-V ejemplo colisión trasera ideal (Ec.1).....	62
Ecuación 44. Delta-V ejemplo colisión trasera ideal (Ec.2).....	63
Ecuación 45. Energía absorbida. McHenry .....	64
Ecuación 46. Cálculo Delta-V .....	65
Ecuación 47. Error Delta-V .....	68

## Índice de Tablas

Tabla 1. Ejemplo Delta-V y coeficiente de restitución.....	16
Tabla 2. Período natural del cuello/cabeza .....	26
Tabla 3. Delta-V y lesión cervical .....	27
Tabla 4. Coeficientes de rigidez A y B para seis categorías de vehículos .....	37
Tabla 5. Cifras de lesiones en distintos tipos de accidentes .....	48
Tabla 6. Número de ocupantes lesionados en colisiones traseras en función del género .....	49
Tabla 7. Número de ocupantes y lesionados.....	49
Tabla 8. Parámetros de Schmidt.....	56
Tabla 9. Características vehículos.....	63
Tabla 10. Deformaciones.....	64
Tabla 11. Coeficientes de rigidez frontal .....	65
Tabla 12. Energías absorbidas en colisión frontal real .....	66
Tabla 13. Delta-V y EBS en colisión frontal real.....	66
Tabla 14. Coeficiente de rigidez trasero Audi A4 .....	67
Tabla 15. Energías absorbidas en colisión trasera real .....	67
Tabla 16. Delta-V y EBS en colisión trasera real.....	68
Tabla 17. Energías absorbidas en colisión frontal inf. rígida .....	69
Tabla 18. Delta-V en colisión frontal inf. rígida.....	69
Tabla 19. Error Delta-V colisión frontal inf. rígida .....	69
Tabla 20. Energías absorbidas en colisión trasera inf. rígida.....	71
Tabla 21. Delta-V en colisión trasera inf. rígida .....	71
Tabla 22. Error Delta-V colisión trasera inf. rígida.....	71
Tabla 23. Competencias Algiografía.....	74
Tabla 24. Descripción de las secuelas .....	75
Tabla 25. Indemnizaciones .....	76

# 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido una gran cantidad de casos de fraude a las compañías de seguros en las lesiones causadas como consecuencia de un accidente de tráfico siendo, las más frecuentes, las lesiones cervicales. Según los datos recogidos por el servicio de estadísticas y estudios del sector de seguros en España, se trata de más de 150.000 casos, lo que supone pérdidas millonarias para dichas aseguradoras.

Como consecuencia de ello, las compañías de seguros han puesto en el punto de mira los esguinces cervicales causados por los accidentes de tráfico y, más en concreto, los que tienen su origen en accidentes a baja velocidad.

Cuando se produce un accidente y se solicita realizar una valoración de las posibles lesiones que pudieron sufrir sus ocupantes es necesario realizar un análisis de todos los fenómenos físicos que pudieron estar presentes en dicho accidente. Uno de los objetivos clásicos de este tipo de análisis es poder evaluar el Delta-V (estimación del cambio en la velocidad de un vehículo durante un impacto) ya que ha sido aceptado como una base para evaluar la potencial gravedad de daños y lesiones.

Para ello se ha estandarizado el uso de informes de biomecánica con la finalidad de poder determinar si el accidente ha podido provocar las lesiones reclamadas por el ocupante. La base de estos informes consiste en no solo determinar el valor del Delta-V, sino establecer un umbral a partir del cual un impacto puede causar lesiones producidas por un latigazo cervical ya que el diagnóstico y tratamiento de dichas lesiones persisten como un enigma médico.

El presente documento pretende, por tanto, concienciar de la importancia de la correcta determinación de este parámetro así como ilustrar globalmente la problemática existente entre poder asociar un umbral de Delta-V a la existencia o no de una lesión cervical producida por el conocido mecanismo whiplash (E. CROWE, 1928) o latigazo cervical. Para ello, se ha estructurado en las cuatro secciones que a continuación se detallan.

La primera de ellas tiene como finalidad la descripción de los conceptos asociados al Delta-V a partir de la aplicación de los Teoremas de Conservación de la Energía y de Conservación del Momento lineal, Velocidad Equivalente de Barrera y análisis que relacionan deformaciones de los vehículos con energías absorbidas en los impactos, concretamente el método de McHENRY.

En la segunda sección se describe el fenómeno de whiplash en colisiones a baja velocidad así como los factores desencadenantes de dicho mecanismo lesivo. Además, se realiza una revisión de las investigaciones realizadas en este ámbito con el fin de determinar el umbral de lesión del Delta-V.

En tercer lugar, se establecen diversos ejemplos prácticos con la finalidad de ilustrar la variabilidad de accidentes que, pese a conllevar un mismo valor de Delta-V, suponen un potencial lesivo para el ocupante distinto. Asimismo, se realiza la determinación de este parámetro a partir de las deformaciones en los vehículos como consecuencia de la energía absorbida por estos.

Por último, en la cuarta sección, se expone el marco legal aplicable en concepto de indemnizaciones como consecuencia de lesiones cervicales producidas en accidentes de tráfico. Concretamente, se analizarán los traumatismos cervicales menores de la Ley 35/2015 de reforma del sistema para la valoración de los daños y perjuicios causados a las personas en accidentes de circulación.

## 2. SECCIONES

### 2.1. DELTA-V

#### 2.1.1. Conceptos previos

Se define Delta-V ( $\Delta V$ ) como el incremento de velocidad que experimenta un vehículo durante un accidente de tráfico y depende, básicamente, de la velocidad de impacto y de la relación existente entre las masas y rigideces de ambos vehículos. Este parámetro, entre muchos otros, se precisa para la reconstrucción de un accidente y la predicción biomecánica del Potencial Lesivo del Ocupante (PLO).

Desde la perspectiva de la accidentología, el verdadero interés reside en conocer cómo se proyecta dicho Delta-V sobre el ocupante, es decir, la variación de velocidad del ocupante dentro del vehículo ya que siempre será superior a la de este. Por ejemplo, para una velocidad de impacto de 8 mph (12 km/h) en una colisión trasera, la aceleración del ocupante es de 2.5 veces la del vehículo (THOMSON, 1985).

Además de todo ello, hay que considerar que los ocupantes del vehículo impactado experimentan una cantidad de fuerza sobre la columna cervical aproximadamente tres veces mayor a la experimentada por los integrantes del vehículo que realiza el impacto. (The Spine Research Institute of San Diego (SRISD)).

Cabe destacar que la producción de daños estructurales en los vehículos, en especial en colisiones a baja velocidad, no depende exclusivamente de la velocidad. Tanto es así que la velocidad de impacto no es proporcional a la gravedad de las lesiones ocupantes, ni a los daños sufridos en los vehículos. Otros factores que han de ser considerados son: el diseño y la geometría del vehículo, las propiedades elástico-plásticas y fatiga de los materiales, el vector de impacto, entre otros.

##### 2.1.1.1. Física relacionada con la determinación del Delta-V

###### 2.1.1.1.1. Visión general

Los métodos comúnmente utilizados para determinar Delta-V emplean la conservación del momento lineal, un análisis de absorción de energía o la aplicación de CRASH3, EDCRASH u otros programas informáticos. En estos programas, el Delta-V se calcula mediante el uso de uno o ambos métodos de análisis, uno basado en mediciones del daño y rigideces por aplastamiento y el otro basado en el momento lineal/angular.

Generalmente se pueden clasificar los tipos de impacto en colineales y oblicuos. Un impacto se considera colineal cuando existe un ángulo inferior a 10º entre los vectores de velocidad antes de

impacto, mientras que se consideran oblicuos aquellos en los que se superan los 10º entre los mencionados vectores de velocidad.

En impactos oblicuos, el Delta-V se puede calcular mediante la aplicación de los principios de la física, como la conservación del momento lineal y angular y el uso de parámetros y las masas de los vehículos. Por otro lado, para los impactos colineales, el Delta-V se determina empleando el daño medido en los vehículos así como a partir de la masa de estos. Por último, los daños derivados del Delta-V se calculan según los resultados de rigidez del vehículo tras ser sometidos a pruebas de choque.

Cabe destacar que otras clasificaciones distinguen los impactos en centrales y no centrales. En los primeros, la línea principal de fuerza atraviesa el centro de masas de ambos vehículos, mientras que ocurre lo contrario en impactos cuya tipología coincide con el segundo caso.

#### 2.1.1.1.2. Momento lineal y Delta-V

Un principio importante en el análisis del Delta-V es la tercera Ley de Newton que, aplicándola al impacto entre dos vehículos, concluye que las fuerzas que actúan sobre cada uno de ellos son de igual magnitud pero de sentido opuesto. Por lo tanto, dado que las fuerzas que actúan sobre cada vehículo lo hacen durante el mismo tiempo, sobre cada vehículo estará actuando el mismo impulso. Matemáticamente puede expresarse de acuerdo a la *Ecuación 1*.

$$\bar{I} = \bar{F}\Delta t = m_1\Delta\bar{v}_1 = m_2\Delta\bar{v}_2$$

$$m_1\Delta v_1 = m_2\Delta v_2$$

$$\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

*Ecuación 1. Relación del Delta-V y las masas de los vehículos*

Esta relación se realiza bajo la hipótesis de que ningún vehículo está fijo al suelo y que no existen otras fuerzas que no sean las fuerzas del impacto. Cuando las fuerzas externas, por ejemplo arrastres de neumáticos, son grandes en proporción a las fuerzas de impacto, dicha ecuación puede sufrir variaciones. Además de ello, la *Ecuación 1* es válida para cualquier tipo de colisión, incluyendo frotamientos laterales donde no se alcanza un punto de velocidad común. En cuanto a la rigidez relativa de ambos vehículos cabe destacar que pese a que no afecta a la relación del Delta-V, tal y como se describe más adelante, sí afecta a la magnitud de los daños del vehículo.

Los errores más comunes de la aplicación de la tercera Ley de Newton incluyen la falsa suposición de que la energía absorbida por ambos vehículos será igual porque las fuerzas son iguales, y la suposición errónea de que la relación inversa entre Delta-V y la masa no se aplica a menos que se consiga una velocidad común.

#### 2.1.1.1.3. Energía cinética, energía de choque y Delta-V

El método de análisis de la energía de aplastamiento asociada con un perfil de daño se originó con la observación de EMORI acerca de la relación lineal entre la deformación de aplastamiento y la velocidad de impacto. CAMPBELL combinó esta relación lineal para incluir la deformación de aplastamiento y fuerza de impacto por la anchura de la zona de aplastamiento con la fuerza requerida para iniciar dicho aplastamiento. McHENRY extendió dichas investigaciones acerca de la energía de cinética y de aplastamiento dando lugar al algoritmo empleado en el cálculo de la energía de aplastamiento (CRASH) cuya aplicación se realiza en programas como CRASH3 o EDCRASH. Dicho análisis de obtención de la energía de deformación se detalla en el apartado 2.1.5. *Análisis de deformaciones. Método de McHenry* a partir de dos medidas de deformación.

En general, el procedimiento considera el exterior del vehículo como una serie de resortes lineales que resisten el aplastamiento o deformación. El área dañada de un vehículo se divide en secciones y la energía de aplastamiento para cada sección se define de acuerdo con el algoritmo de CRASH. La suma de todas ellas constituye la energía total de aplastamiento mostrada en la *Ecuación 2*.

$$E = \int \left(\frac{B}{2}\right) \left(\frac{A}{B} + C\right)^2 dw$$

*Ecuación 2. Energía de aplastamiento*

Tal y como se ha comentado, un concepto importante basado en el cálculo del Delta-V consiste en la existencia de un punto de velocidad común, relativa al suelo, entre los vehículos que intervienen en el impacto en el momento de la separación. Por lo tanto, las energías asociadas con el daño se relacionan con el cambio de las velocidades en lugar de con las velocidades totales relativas al suelo. Esta relación aproximada permite calcular de forma directa el Delta-V a partir de los principios de Conservación de la Cantidad de Momento Lineal y Conservación de la Energía. La forma general de las relaciones del Delta-V utilizadas en un análisis basado en el daño se expone en la *Ecuación 3* cuya determinación analítica se realiza en el apartado 2.1.6. *Cálculo del Delta-V a partir de energías de deformación* del presente documento.

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{2E_a m_2}{m_1(m_1 + m_2)}}$$
$$E_a = E_1 + E_2$$
$$\Delta v_2 = \sqrt{\frac{2E_a m_1}{m_2(m_1 + m_2)}}$$

*Ecuación 3. Relaciones Delta-V*

Donde  $E_a$  es la energía total absorbida por ambos vehículos.

Un error común que se ha encontrado en diversas reconstrucciones reside en casos en los que se alegue ser capaz de determinar la velocidad del impacto mediante el examen de la gravedad de los daños de un solo vehículo. Este hecho solo podría ser posible en el caso de un impacto con un objeto fijo rígido. En caso de una colisión con otro vehículo, se deben considerar otros parámetros como masa y rigideces de ambos para realizar un análisis riguroso.

El valor del Delta-V obtenido de la *Ecuación 3* es un escalar que necesitará, por tanto, una dirección para convertirse en un vector. Cuando este se combina vectorialmente con la velocidad de separación se obtiene la velocidad de impacto a partir de la suma vectorial de estos dos vectores tal y como muestra la *Ecuación 4*.

$$\bar{v}_{impacto} = \bar{v}_{separación} + \Delta\bar{v}$$

*Ecuación 4. Velocidad de impacto*

#### 2.1.1.1.4. Delta-V y Velocidad Equivalente de Barrera

La Velocidad Equivalente de Barrera denotada por EBS (Equivalent Barrier Speed) o BEV (Barrier Equivalent Velocity) es la velocidad a la que debería colisionar un vehículo contra una barrera fija y rígida para obtener el mismo nivel de daños sufrido por el vehículo que se está analizando en un caso real. Dicho parámetro se determina bajo la suposición de que dicha barrera no se mueve, no se deforma y su masa es infinita en comparación con la del vehículo.

Cabe destacar que la EBS no tiene por qué coincidir con el Delta-V ya que la EBS es una comparación de severidades de daño por analogía de energías absorbidas y, por tanto, no representa el cambio de velocidad que siente un ocupante en un vehículo.

La Velocidad Equivalente de Barrera puede ser calculada de forma independiente para cada vehículo estableciendo una igualdad entre la energía de deformación absorbida por el vehículo y su equivalente en energía cinética en el mismo vehículo. Dicha relación se muestra en la *Ecuación 5*.

$$E_c = E_a$$
$$\frac{1}{2}m(EBS)^2 = E_a$$
$$EBS = \sqrt{\frac{2E_a}{m}}$$

*Ecuación 5. Velocidad Equivalente de Barrera*

#### 2.1.1.2. Efectos del coeficiente de restitución en Delta-V

Durante la deformación inicial de un impacto, los vehículos se someten a una interacción de tal manera que en la deformación máxima ambos vehículos alcanzan un punto de velocidad igual o común. Sin embargo, la variación total de velocidad es el resultado del cambio de velocidad durante la fase de

impacto hasta el máximo de aplastamiento más el cambio que se produce durante la fase de separación. La diferencia de estos valores está relacionada por el coeficiente de restitución, que se define como la relación entre las diferencias de las velocidades de rebote e impacto tal y como muestra la *Ecuación 6*.

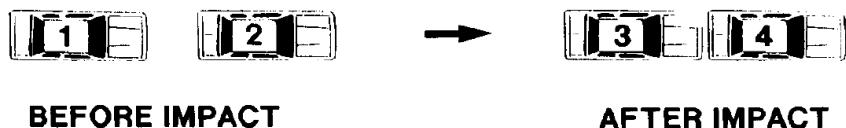
$$e = -\frac{v_{1,f} - v_{2,f}}{v_{1,i} - v_{2,i}}$$

*Ecuación 6. Coeficiente de restitución*

En los impactos con una variación de velocidad moderada o alta en los que existe una importante deformación permanente de la estructura del vehículo y, por tanto, el efecto rebote elástico es prácticamente insignificante, se considera la aproximación de impacto de tipo plástico. Además, en este tipo de colisiones, las velocidades de separación se aproximan mucho a la velocidad común citada anteriormente.

Por otro lado, en impactos en los que hay poca o ninguna deformación permanente, ya sea impactos completamente elásticos o impactos en los que existe alguna deformación plástica seguida de una restauración parcial hacia la forma original, las velocidades de separación difieren más de la velocidad común. Relacionando estos casos con el coeficiente de restitución, este se aproximará a uno en el primero de los casos y tenderá a cero en situaciones similares al segundo ejemplo.

A continuación, se muestra la *Figura 1* para ilustrar cómo el coeficiente de restitución puede influir en la magnitud del Delta-V de acuerdo a la *Ecuación 7* y a la *Ecuación 8*.



*Figura 1. Colisión trasera*

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_3 + m_2 v_4$$

$$e = \frac{v_4 - v_3}{v_1 - v_2}$$

*Ecuación 7. Ejemplo del coeficiente de restitución*

A partir de la ecuación anterior, se puede determinar el Delta-V de cada uno de los vehículos en función del coeficiente de restitución. Como simplificación, se toma una colisión trasera a baja velocidad en la que el vehículo que recibe el impacto se encuentra parado en el instante de la colisión ( $v_2=0$ ).

De acuerdo a este ejemplo, el Delta-V quedará definido por la *Ecuación 8* que será empleada posteriormente en el apartado 2.3.1.3. *Ejemplo de colisión trasera*.

$$\Delta v_1 = v_3 - v_1 \rightarrow v_3 = \left( \frac{m_1 - m_2 e}{m_1 + m_2} \right) v_1$$

$$\Delta v_2 = v_4 - v_2 = v_4 \rightarrow v_4 = \left( \frac{m_1 (1 + e)}{m_1 + m_2} \right) v_1$$

Ecuación 8. Ejemplo Delta-V

Con objeto ilustrativo, la colisión será evaluada para una velocidad de impacto trasero de 5 mph y para un coeficiente de restitución que tomará valores de 0, 0.1, 0.2, y 0.3 y unas masas iguales a  $m_1 = 2000$  lb (907,18 kg) y  $m_2 = 3000$  lb (1360,78 kg). La *Tabla 1* muestra dichos resultados:

<b>v<sub>1</sub></b>	<b>v<sub>2</sub></b>	<b>e</b>	<b>v<sub>3</sub></b>	<b>v<sub>4</sub></b>	<b>Delta-V<sub>1</sub></b>	<b>Delta-V<sub>2</sub></b>	<b>Δv<sub>1</sub> / Δv<sub>2</sub></b>	<b>m<sub>1</sub>/m<sub>2</sub></b>
<b>5</b>	0	0.0	2.0	2.0	-3.0	2.0	1.5	1.5
<b>5</b>	0	0.1	1.7	2.2	-3.3	2.2	1.5	1.5
<b>5</b>	0	0.2	1.4	2.4	-3.6	2.4	1.5	1.5
<b>5</b>	0	0.3	1.1	2.6	-3.9	2.6	1.5	1.5

Tabla 1. Ejemplo Delta-V y coeficiente de restitución

De acuerdo a la tabla anterior, a medida que el coeficiente de restitución aumenta también lo hace el Delta-V de cada uno de los vehículos. Puede destacarse también que el cociente entre dichas variaciones de velocidad y la proporción inversa entre las masas permanece constante. A partir de estas conclusiones se puede afirmar que para una familia de accidentes en los cuales Delta-V es muy pequeño, los efectos de restitución pueden tener un efecto notable. Sin embargo, para los accidentes en los que no existe un valor bajo de Delta-V, los efectos de restitución son, normalmente, menos significativos. Como prueba de ello se adjunta la *Figura 2*, en la que se puede observar el efecto de dicho coeficiente de restitución en función de la velocidad de impacto según las investigaciones de varios autores.

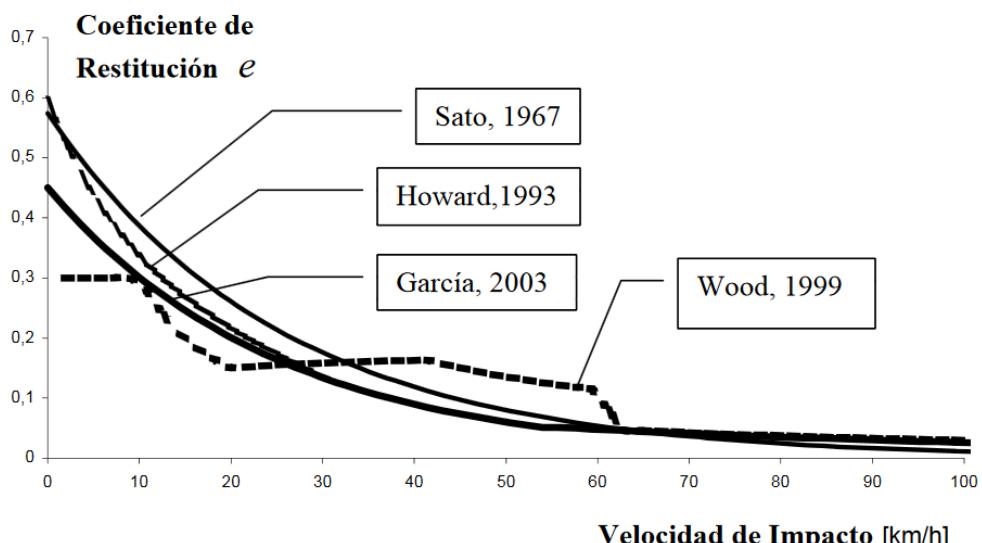


Figura 2. Relación entre el coeficiente de restitución y la velocidad de impacto

## 2.1.2. Importancia del Delta-V

### 2.1.2.1. Gravedad del choque y Delta-V

En el campo de la reconstrucción de accidentes, el término Delta-V ha adquirido el carácter de una unidad de medida que en ocasiones ha resultado incuestionable. Esta aceptación es desafortunada cuando surgen casos en los cuales se intenta cuantificar la gravedad de un accidente así como las lesiones asociadas a este, utilizando únicamente un valor genérico del Delta-V sin los apropiados fundamentos matemáticos y físicos que relacionan dicho cambio de velocidad con las variables biomecánicas que se utilizan para predecir la probabilidad de lesiones.

Por supuesto, existen diversos parámetros que se consideran claves para describir y relacionar adecuadamente el Delta-V con la probabilidad de lesiones en el ocupante, entre ellas cabe destacar: los niveles medios de aceleración y aceleración pico, la duración del impulso de choque, la distancia de frenado, entre otros.

Dentro de la mortalidad y lesiones de gravedad que presentan los accidentes de tráfico cabe destacar que los impactos frontales representan el 50-60 % de los casos con dichas consecuencias. Es por ello que se van a analizar diversos ejemplos sencillos que revisan y relacionan los principios básicos de análisis de colisiones. Entre ellos, una de las tipologías más frecuentes consiste en el choque de vehículos contra objetos estrechos como pueden ser árboles o postes. Estos ejemplos son ideales para discutir la relación con el Delta-V y los métodos de energía de coche como la EBS.

La *Figura 3* ilustra los principios físicos fundamentales que demuestran la definición cinemática del Delta-V utilizando la *Ecuación 9*:

$$v_f^2 = 2 \cdot a \cdot d$$

*Ecuación 9. Velocidad*

Donde:

v<sub>f</sub>: velocidad final

a: aceleración

d: distancia

Dicha *Figura 3* describe el Delta-V de una manera simplificada pero útil ya que se muestra el ejemplo de un automóvil que viaja a una velocidad inicial y finalmente se detiene debido diferentes formas de choque/frenado experimentando en cualquiera de ellos un Delta-V de 35 mph. En ella se puede observar como existen infinitas combinaciones de distancias de frenado y, por tanto, niveles de deceleración G asociados a la severidad de dicha frenada/choque.

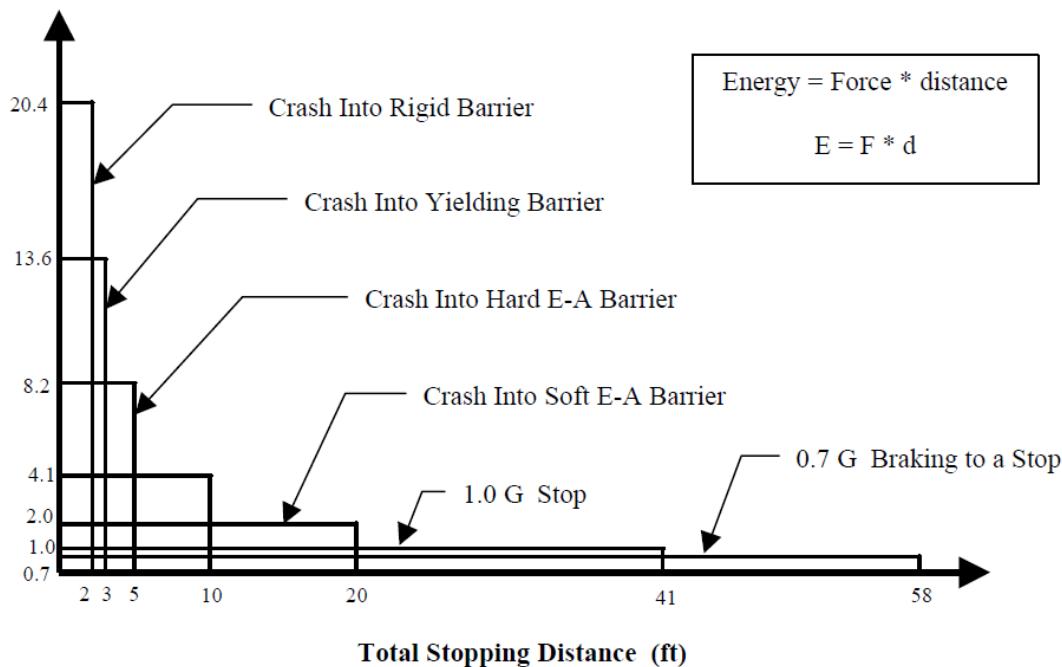


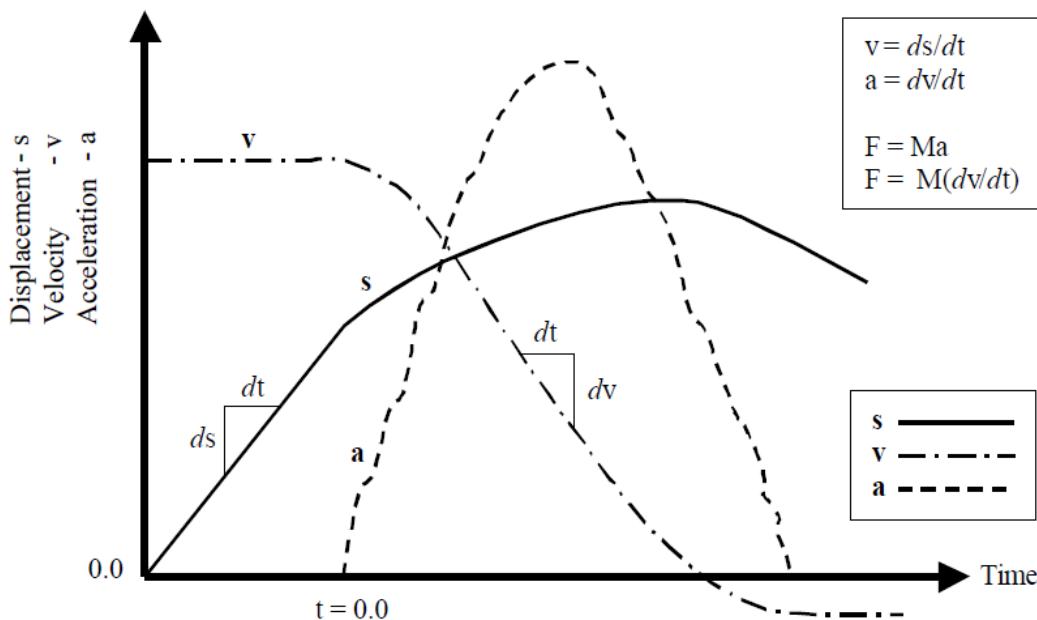
Figura 3. Relación entre la distancia de frenado y la deceleración G

A partir de este ejemplo se puede deducir que, a pesar de que todos los casos tienen un Delta-V de 35 mph, la desaceleración, las fuerzas de choque y la gravedad de las consecuencias para el ocupante diferirán cuantiosamente en un caso respecto a otro pese a que la energía total disipada en todos ellos es la misma.

¿Qué hace que un Delta-V de un impacto frontal contra una barrera rígida tenga graves consecuencias mientras que el mismo Delta-V en el caso del frenado del vehículo hasta su detención no sea perjudicial? El factor determinante que desencadena estas dos situaciones reside en la distancia de frenado siendo esta uno de los indicadores de la gravedad del choque. De hecho, la absorción de energía de las barreras biondas y diversos elementos de seguridad de carreteras utilizan estos mismos principios para reducir las desaceleraciones en los vehículos, disminuyendo por tanto la gravedad del accidente.

Otros factores que condicionan la distancia final hasta la detención del vehículo son la duración de impulso de choque, la aceleración máxima y promedio y la forma del impulso del choque, parámetros que, en una reconstrucción real de accidentes, no siempre están disponibles.

La Figura 4 muestra una versión generalizada de la cinemática de un accidente de coche en la que, de acuerdo con la segunda Ley de Newton, la aceleración máxima en el vehículo durante el accidente es igual al producto entre la fuerza pico y la masa del vehículo. El pico de aceleración es también equivalente a la pendiente más pronunciada ( $dv/dt$ ) de la curva de cambio de velocidad. Cabe destacar que esta figura incluye el posible efecto rebote del vehículo.



Utilizando de manera análoga el ejemplo citado en la *Figura 3*, para un mismo Delta-V de 35 mph de velocidad existe un número infinito de tipologías de accidentes y por tanto de gravedades asociadas a estos.

#### 2.1.2.2. Relación entre el trabajo y la energía de choque con Delta-V

En el estudio de diversos casos de reconstrucción de accidentes de choques de vehículos contra árboles, postes u otros tipos de barreras, han surgido diversas confusiones provocadas por el movimiento de estas durante el impacto. Este tipo de movimiento reduce, para un mismo Delta-V, el daño producido en el vehículo en comparación con el que hubiera tenido lugar si el objeto fijo no hubiera cedido.

La *Figura 5* y la *Figura 7* muestran un ejemplo de este tipo de accidentes en el que, para ambos, el Delta-V es equivalente e igual a 35 mph. En la *Figura 5*, se produce el impacto de un automóvil contra un poste fijo en el cual no se produce deflexión en el mismo.

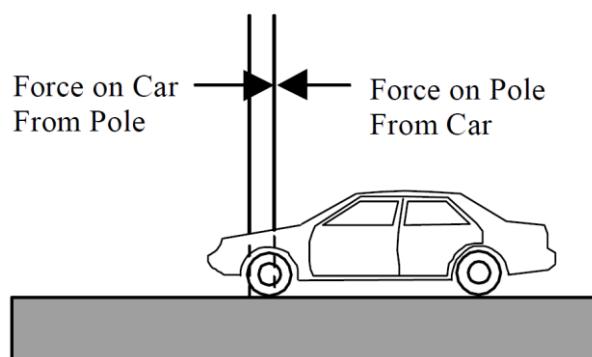
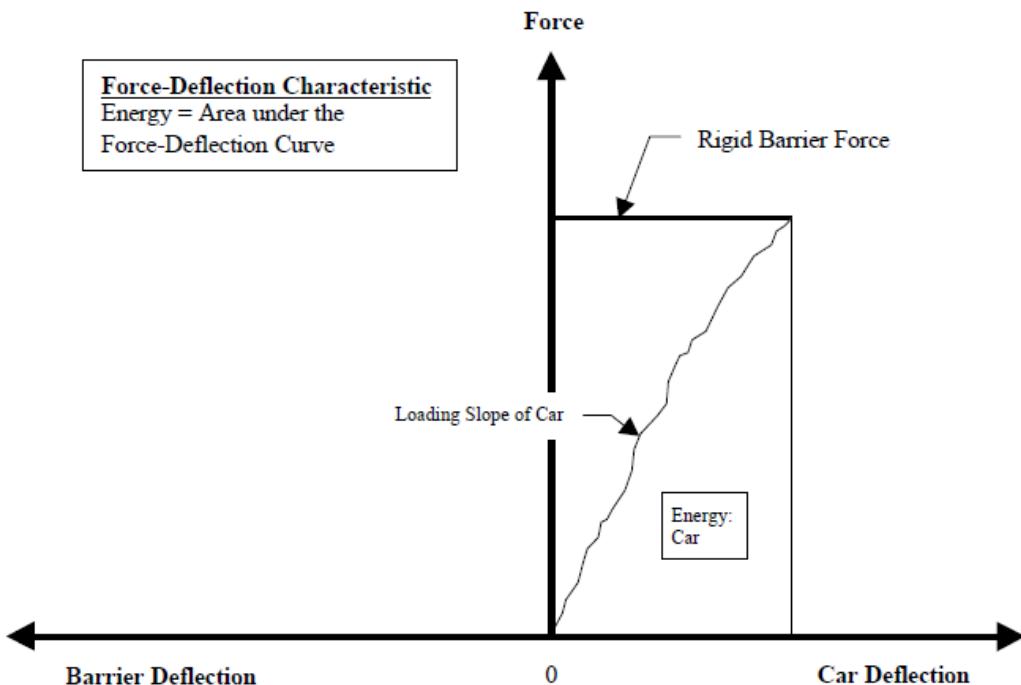


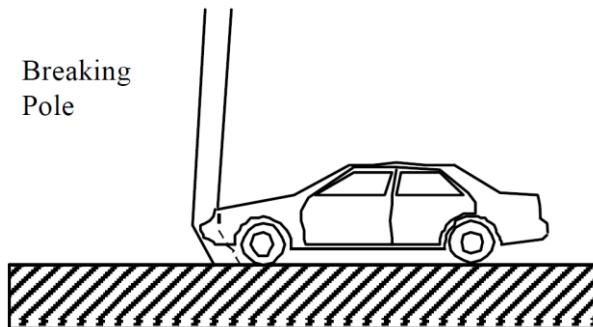
Figura 5. Choque contra un poste fijo

De acuerdo a la *Figura 6*, toda la energía cinética se disipa en energía/trabajo de aplastamiento de la parte delantera del vehículo.



*Figura 6. Diagrama de energía del vehículo durante la colisión contra un poste rígido*

Por otro lado, la *Figura 7* muestra este mismo ejemplo pero, en este caso, a consecuencia del impacto, se produce la rotura y deflexión del poste sin producirse la separación con su base.



*Figura 7. Choque contra un poste deformable*

Asimismo, la *Figura 8* muestra los principios de conservación de la energía aplicados al ejemplo del poste con deflexión anterior en comparación con el ilustrado en la *Figura 6* para el caso del poste rígido.

Tal y como puede observarse en dicha *Figura 8*, la diferencia fundamental respecto al caso de colisión contra un poste rígido reside en la fuerza máxima ya que, en este último caso, la deflexión producida en el poste conlleva la reducción de esta magnitud.

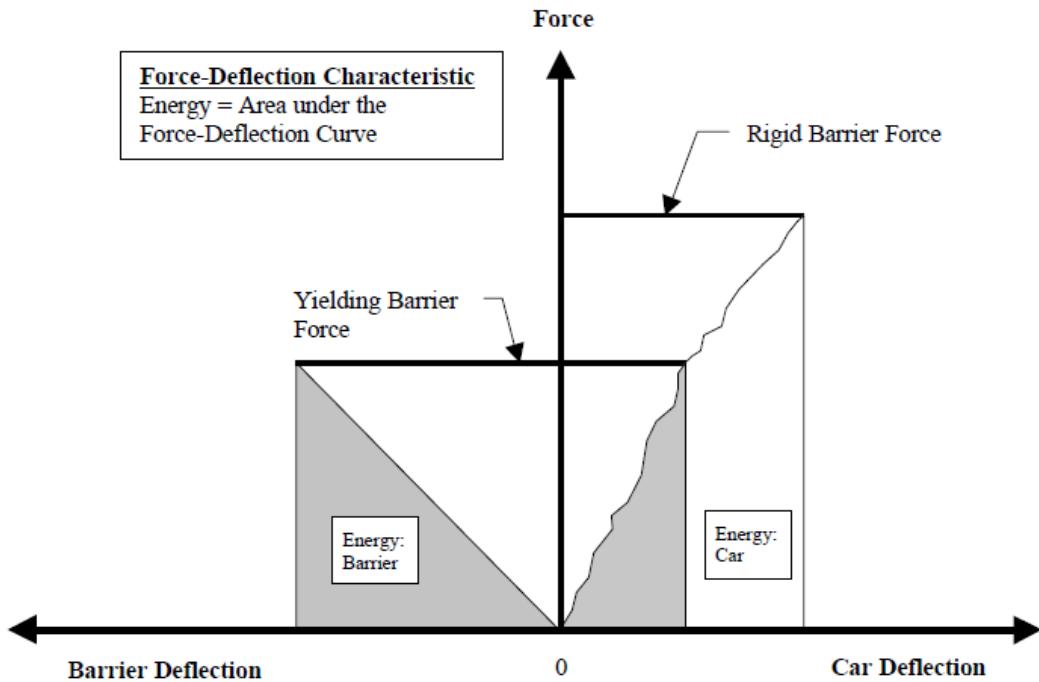


Figura 8. Diagrama de energía en la colisión bajo dos hipótesis

La Figura 9 generaliza estos principios en la colisión de un vehículo que impacta, por un lado, contra una barrera rígida y que, por otro lado, realiza el impacto contra barreras con diferente grado de deformación.

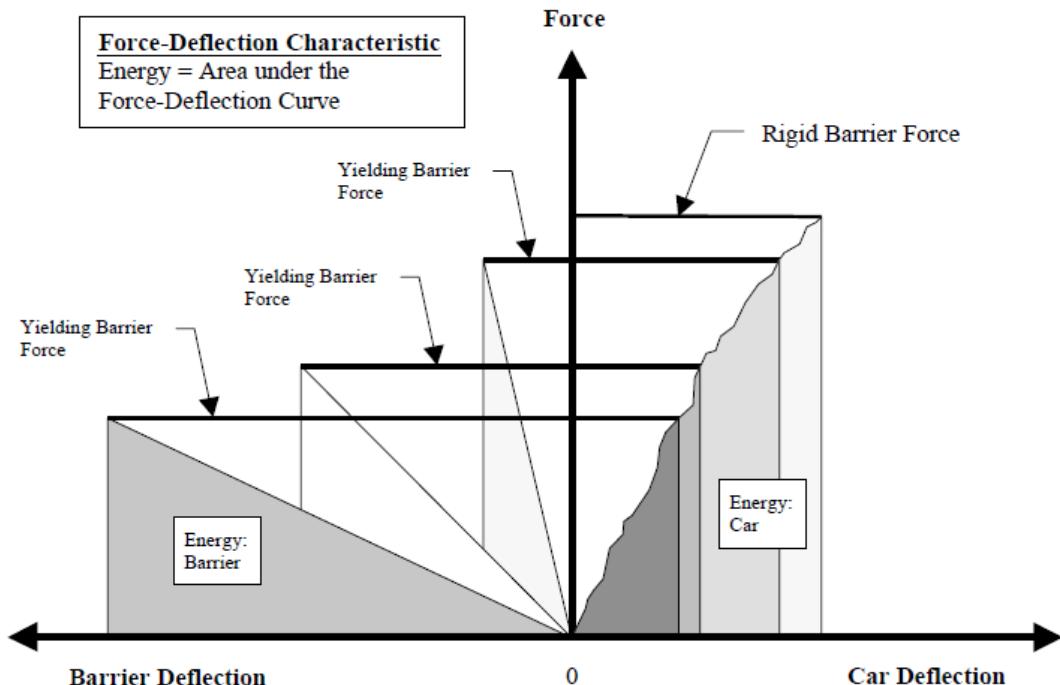


Figura 9. Diagrama de energía en la colisión bajo varias hipótesis

De acuerdo a la segunda Ley de Newton y a principios básicos, cuanto más se deforme la barrera, para un determinado Delta-V, menores serán los picos de fuerza y desaceleraciones y menos

probabilidad de lesiones habrá. Es por ello por lo que se concluye que no se puede predecir la gravedad del accidente empleando únicamente el valor del Delta-V.

### 2.1.3. Umbral del Delta-V

La variación de velocidad que un vehículo sufre durante un accidente es un parámetro necesario para reconstruir y poder estimar el Delta-V que el ocupante del vehículo experimenta durante dicha colisión. El objetivo de este apartado reside, por tanto, en convertir los valores del Delta-V que producen daños en la columna cervical en valores de momentos y ángulos de rotación sobre la cabeza del ocupante. El umbral estimado para el percentil 50 de los hombres es de 16 km/h pero varía en función del tamaño, la edad y el género.

Para ello se van a analizar colisiones traseras en las que intervienen vehículos con parachoques que permiten la absorción de energía. Cabe destacar que se pueden producir lesiones por latigazo cervical en casos en los que existe poco o ningún daño en cualquiera de los vehículos implicados en el accidente.

#### 2.1.3.1. Historia del método de obtención del umbral del Delta-V

Convencionalmente, se usa un método que permite relacionar las lesiones con las causas que la producen basado en dos fases. En una primera etapa, se realiza el cálculo de la deflexión dinámica en aquella parte del cuerpo del ocupante como respuesta a las fuerzas o aceleraciones aplicadas sobre el mismo (entradas). Posteriormente, en una segunda etapa, el nivel de lesión se determina mediante la comparación de esta respuesta mecánica del cuerpo del ocupante con una base de datos de lesiones de la misma índole. La exactitud en la predicción de este método depende de diversos factores. Entre otros, se destacan, el conocimiento de los parámetros de entrada (normalmente determinados por especialistas en reconstrucción de accidentes), la correcta metodología de cálculo entrada/respuesta, la precisión de la caracterización de las propiedades mecánicas de las partes del cuerpo del individuo que experimenta el accidente y, finalmente, la adecuación de la base de datos de lesiones en comparación con los niveles de respuesta.

Frente a este método expuesto anteriormente, existe un método alternativo basado en el uso del Delta-V como único parámetro de entrada. Este método tiene la ventaja de evitar el cálculo de respuesta correlacionando directamente el daño con una base de datos de Delta-V.

Tanto el método de entrada/respuesta mecánica/lesión como el método basado en la evaluación de lesiones a partir del Delta-V tienen limitado el nivel de exactitud en la predicción. Sin embargo, el uso del segundo de ellos es más conveniente ya que también realiza predicciones biomecánicas. Se extrae, por tanto, la necesidad de poseer una precisa base de datos lesión/Delta-V para el latigazo cervical o lesiones cervicales en el ámbito de la accidentología del automóvil.

### 2.1.3.2. Conjunto cabeza/cuello

MERTZ y PATRICK y otros autores llevaron a cabo una amplia investigación sobre el conjunto cabeza/cuello de diversos voluntarios humanos y cadáveres. Los datos de prueba fueron presentados de forma idealizada en forma de corredores de carga o parcelas de momento flector alrededor de la unión cabeza/cuello frente al ángulo de rotación de la cabeza con respecto al torso. Las zonas de carga se presentan en las *Figuras 10, 11 y 12* basadas en un informe de revisión de MELVIN y WEBER.

Se han añadido varios niveles de entrada del momento aplicado así como del ángulo de rotación a las versiones originales de dichas figuras a efectos de indicar los niveles de daño gráficamente.

Respecto a la flexión del cuello hacia delante de la *Figura 10*, no había ligamentos o discos óseos dañados incluso para momento aplicado de hasta 190 Nm. Sin embargo, los autores indican la posibilidad de lesiones musculares graves por encima de aproximadamente 88 Nm. De este modo, el umbral de lesión para la flexión del cuello se ha fijado en el percentil 50 del correspondiente a 120 Nm.

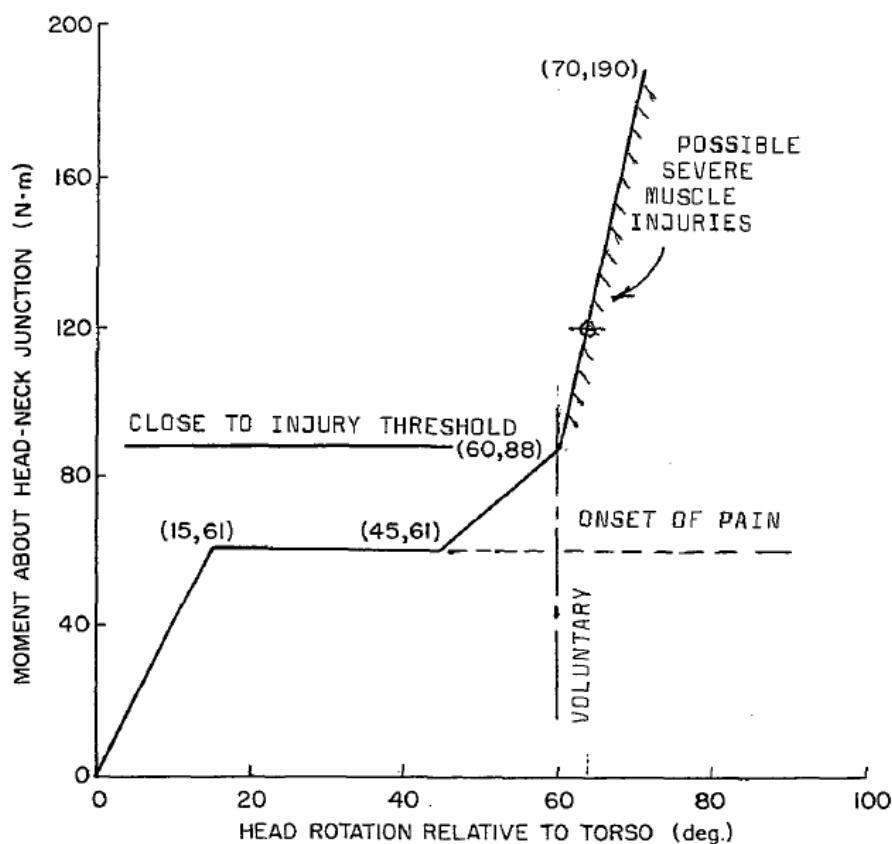
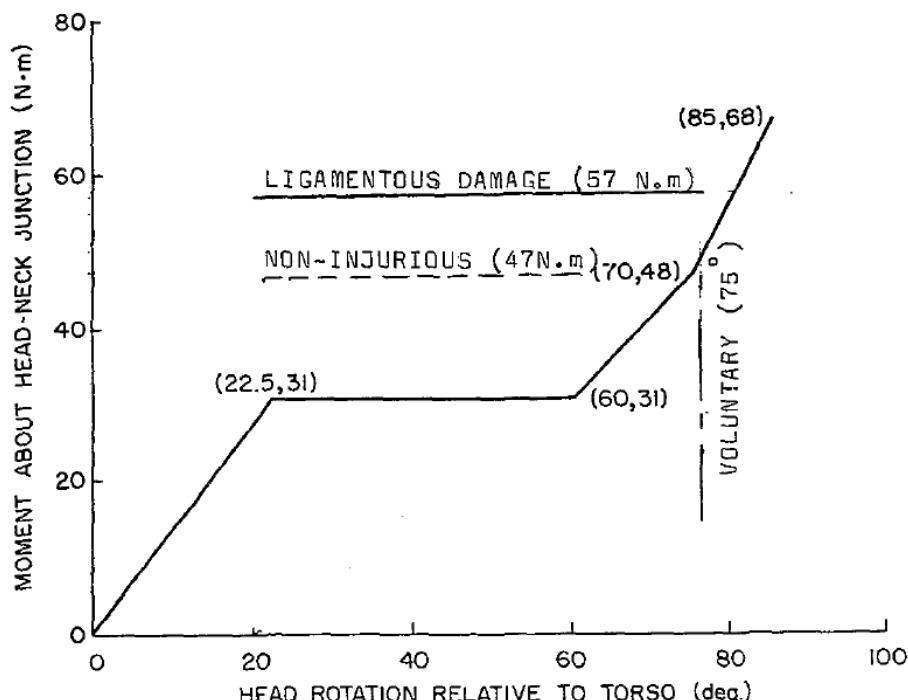


Figura 10. Corredor de carga para la flexión del cuello

En el modo de extensión de la flexión hacia atrás, conocido como el mecanismo de whiplash o latigazo cervical, el umbral de daño ha sido establecido en 57 Nm de acuerdo a la *Figura 11*. En la flexión lateral, mostrada en la *Figura 12*, pese a poseer una mayor escasez de datos, hay resultados de las pruebas que indican que los voluntarios toleran un máximo de 40 grados de rotación lateral con respecto al torso. Por consiguiente, en la ausencia de datos adicionales, el umbral de daño se toma en 54 Nm ya que es donde el ángulo de 40 grados se cruza con la curva de flexión de la carga lateral.



*Figura 11. Corredor de carga para la extensión del cuello*

Como es de suponer, los umbrales de daño citados anteriormente se ven afectados por diversos factores como el peso, el sexo y la edad, entre otros. Así pues, en lo que se refiere a los resultados de movimiento de la cabeza en relación con el torso, MERTZ y PATRICK resumen los datos disponibles para las mujeres y los hombres en diferentes grupos de edad.

De acuerdo a esta agrupación de datos, se concluye que las mujeres son aproximadamente un 10% más flexibles que los hombres en extensión (flexión trasera) y, aproximadamente un 4% más flexible en la flexión.

Respecto a la rotación total, tanto para hombres como para mujeres disminuye desde aproximadamente 139 grados en el grupo de 15 a 24 años de edad, a aproximadamente 116 grados en el grupo de 55-64 años de edad lo que conlleva una disminución aproximada del 16%.

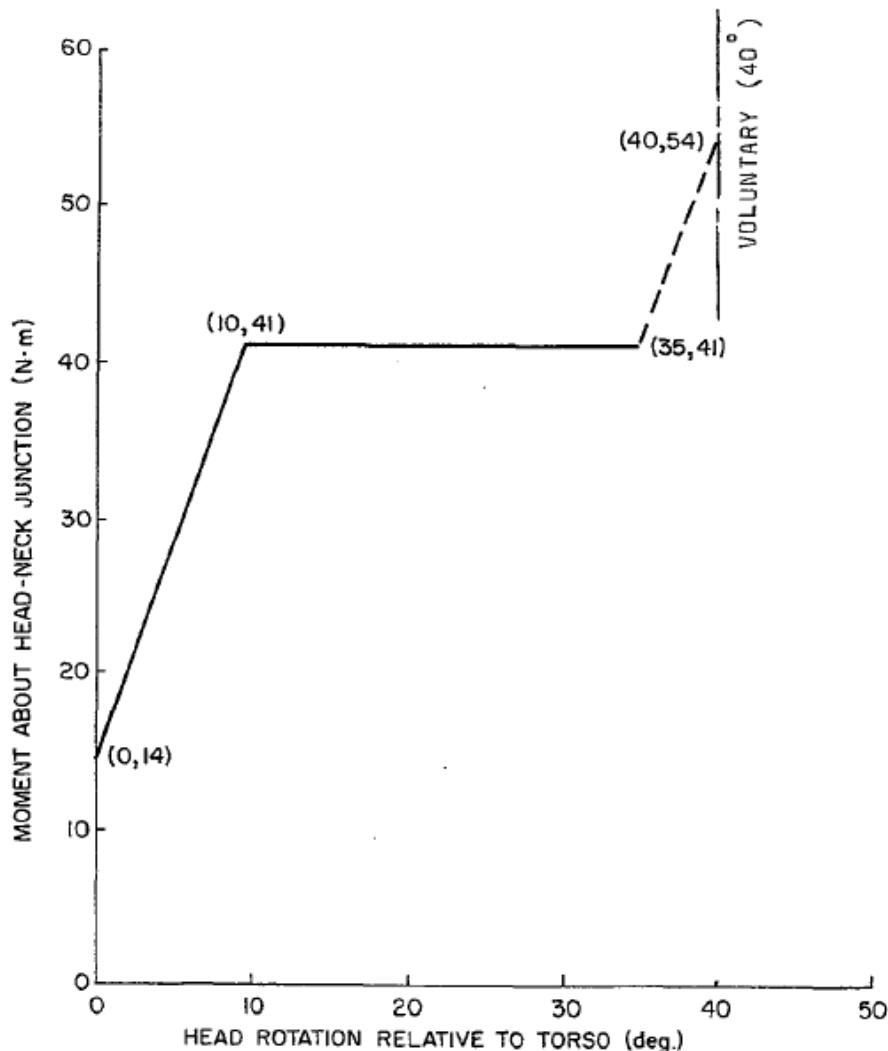


Figura 12. Respuesta de flexión lateral

#### 2.1.3.3. Delta-V y fuerza G

El concepto básico de caracterización del Delta-V de fuerza estructural, a diferencia de la caracterización de fuerza G convencional estática, ha sido desarrollado por KORNHAUSER. Sin entrar en las complejidades de ese desarrollo, se puede simplificar el concepto general al considerar la respuesta de cualquier estructura particular en dos casos extremos: la corta duración o el régimen de carga impulsiva, y la larga duración o régimen de carga estática. En el primero de ellos demuestra que el Delta-V es el parámetro que mejor caracteriza la resistencia estructural. Por otro lado, la fuerza G es el parámetro que mejor define el régimen estático.

Cabe destacar que la corta o larga duración de la carga está relacionada con el período natural de vibración de la estructura, en este caso del cuello/cabeza. Como regla general, existe corta duración de carga cuando la duración de esta es una cuarta parte o menos del período natural. Es por ello por lo que se ha planteado la suposición de que el período natural del cuello/cabeza es al menos cuatro veces más largo que la duración de la carga de entrada. Las Figuras 10, 11 y 12 proporcionan los datos empíricos necesarios para validar esta hipótesis.

La Ecuación 10 muestra la fórmula que permite calcular el período natural de un sistema masa-resorte:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}}$$

Ecuación 10. Período natural

Donde m es la masa y K es la constante del resorte.

En el caso particular de movimiento angular de ángulo  $\theta$ , con un momento o par de torsión T, con la masa m en movimiento a través de un radio R (tomado como 150 mm ya que es la distancia entre los cóndilos occipitales al centro de gravedad de la cabeza), la fórmula que define la constante K de aplicación al conjunto cabeza/cuello se muestra en la Ecuación 11.

$$K = \frac{T}{R^2 \theta}$$

Ecuación 11. Constante cabeza/cuello

Las Figuras 10, 11 y 12 ilustran la pendiente de la curva T- $\theta$ , pero son las pendientes medias, medidas hasta el punto de la lesión, las apropiadas para el cálculo de un período medio de respuesta de acuerdo a la Ecuación 10. Dichos períodos medios se muestran en la Tabla 2.

Modo de deflexión	Pendiente de la curva T- $\theta$ (N·m/ $^{\circ}$ )	Período mseg
Flexión lateral	1.00	274
Extensión	0.71	325
Flexión	1.85	202

Tabla 2. Período natural del cuello/cabeza

Cabe destacar que períodos de carga del orden de 50-80 milisegundos o menos se calificarán como impulsivo, mientras que las entradas de mayor duración tenderán a hacer que el Delta-V sea un parámetro que describa la situación de una forma menos rigurosa. Dado que durante las colisiones entre automóviles los tiempos de carga son esencialmente impulsivos, el Delta-V es un buen método de caracterización.

#### 2.1.3.4. Cálculo del Delta-V en lesiones de la columna cervical

El cálculo de las respuestas dinámicas de una estructura definida por viga en voladizo con una masa final concentrada puede ser tratado como un sistema con un único grado de libertad. Esta simplificación consistiría en una masa final concentrada y equivalente a la de la estructura así como una masa adicional correspondiente a 0.23 veces la masa de la misma.

Asemejar el conjunto cuello/cabeza a esta idealización conlleva a concentrar en la cabeza una masa de 4.54 kg más 0.23 veces los 1.45 kg de masa correspondiente al cuello. Es por ello que la masa

total que experimentará el Delta-V en relación al torso será de 4.87 kg y su energía cinética se equiparará con el área bajo la curva de los momentos/ángulo de carga de acuerdo a la *Ecuación 12*.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \int Td\theta$$

*Ecuación 12. Energía cinética.*

Donde m es la masa total definida anteriormente, T es par o momento aplicado y  $\theta$  es el ángulo de rotación angular de la cabeza.

La *Tabla 3* contiene los resultados de la aplicación de la *Ecuación 12* para los datos en las *Figuras 10, 11 y 12*.

Modo de carga	Umbral de lesión (N·m)	Área (N·m <sup>-2</sup> )	v(mph)	v(km/h)
Flexión	120	3.412	11.1	17.8
Extensión	57	2.169	8.83	14.2
Flexión lateral	54	1.135	7.42	11.9

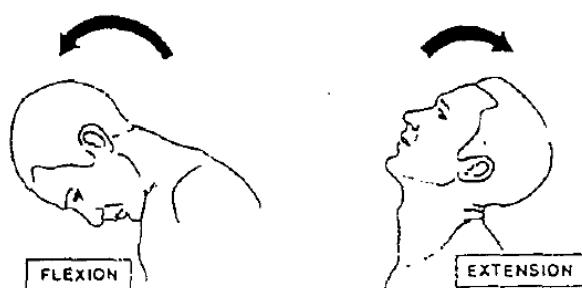
*Tabla 3. Delta-V y lesión cervical*

La *Ecuación 12* indica que el Delta-V varía como la raíz cuadrada del momento límite que produce lesión, que a su vez depende de la fuerza muscular y la fuerza vertebral. Por lo tanto, una reducción en la resistencia vertebral al 50 % dará lugar a una reducción de Delta-V hasta el 70,7 %, y una reducción en la fuerza isométrica hasta 36,8 % conllevará una disminución del Delta-V hasta un 60,6 %.

Por consiguiente, la caracterización del Delta-V acerca de los umbrales de lesión es mucho menos sensible a las variaciones individuales del ocupante en cuanto a fuerza y masa. Es por ello que este parámetro es, generalmente, más útil para el reconstructor que intenta demostrar, a partir del potencial de un accidente entre vehículos, la capacidad de producirse lesiones en el ocupante.

#### 2.1.3.5. Dinámica de la colisión

En un impacto frontal, el cinturón de seguridad retiene tanto el torso como la parte inferior del tronco al asiento, siendo la fuerza de inercia la que tiende a doblar la cabeza en el modo de flexión que se muestra en la *Figura 13*.



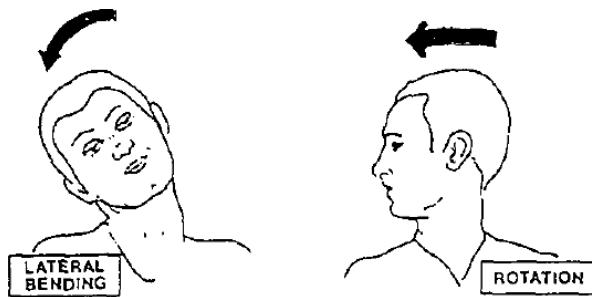


Figura 13. Movimientos de cuello y cabeza

En el caso de un impacto contra una barrera sin considerar la absorción de energía por el paragolpes delantero, el Delta-V es igual a la velocidad inicial del vehículo, mientras que para el caso de un choque múltiple entre vehículos, es el reconstructor de accidentes quien debe analizar la dinámica de dicho choque haciendo uso de los principales principios de intercambio de momentos lineales y conservación de la energía aplicados a las pruebas disponibles en forma de marcas de neumáticos, deformaciones de los vehículos, entre otros.

Por otro lado, los impactos laterales presentan un problema adicional. Además de los movimientos de inercia con respecto al asiento de forma análoga al caso de una colisión frontal, otra fuente de complejidad pueden ser las aceleraciones rotacionales casadas por impactos con gran excentricidad con respecto al centro de gravedad del vehículo impactado. En este tipo de impacto, la primera respuesta del conjunto cuello/cabeza del conductor puede consistir en el modo de flexión lateral de la *Figura 13*.

No es el propósito principal de este trabajo discutir acerca de las técnicas de reconstrucción de accidentes. Sin embargo, la introducción de topes de absorción de energía en el parachoques puede dar lugar a situaciones que confundan a la hora de reconstruir el accidente en términos de posible lesión para el ocupante. Esta situación se produce en algunos casos de colisiones traseras en las que los individuos del vehículo impactado experimentan lesiones en la columna cervical como consecuencia del mecanismo whiplash o latigazo cervical incluso cuando no se produzca ningún tipo de daño externo en el vehículo.

Por tanto, es importante analizar la dinámica de colisiones traseras para poder comprobar si la lesión en el modo de extensión, de acuerdo a la *Figura 13*, es compatible con los 14.2 km/h de umbral de velocidad para Delta-V calculados en la *Tabla 3*.

La *Figura 14* muestra el desplazamiento de la cabeza de un conductor que ha sufrido una colisión por alcance. En ella se produce la lesión por el movimiento de la cabeza en relación al tronco. Cabe destacar que este ejemplo carece de reposacabezas en la parte superior del asiento del vehículo.

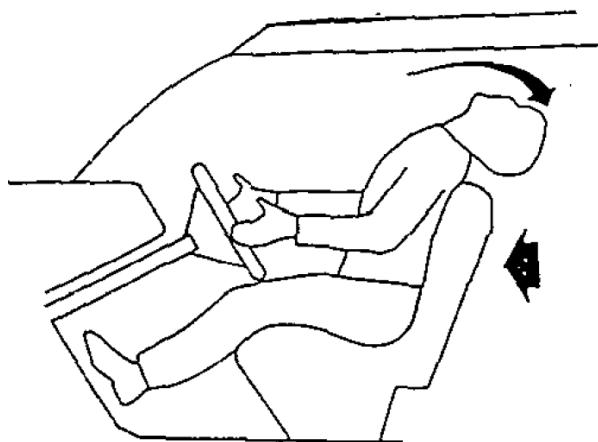


Figura 14. Hiperextensión del cuello en ausencia de reposacabezas

Incluso en el caso de disponer de un reposacabezas, el latigazo cervical puede ser producido por la flexión de la columna cervical como consecuencia de múltiples factores. Uno de ellos reside en el hecho de que la mayoría de los conductores no permanecen en la postura perfectamente erecta que sería idónea para colocar la parte posterior de la cabeza contra el reposacabezas a una distancia máxima de 4 cm. Asimismo, la observación de la postura de varios conductores muestra brechas desde los 18 cm hasta 25 cm, en casos extremos, entre la parte posterior de la cabeza y la parte delantera del reposacabezas.

En una colisión trasera, tras la proyección del asiento hacia adelante, la inercia de la cabeza tiende a empujar a esta produciendo la inclinación hacia atrás de la columna vertebral. Además de todo ello, de acuerdo a la Figura 15, puede existir un rebote diferencial contra el reposacabezas y el respaldo del asiento provocando todavía mayor probabilidad de lesión cervical para el ocupante.

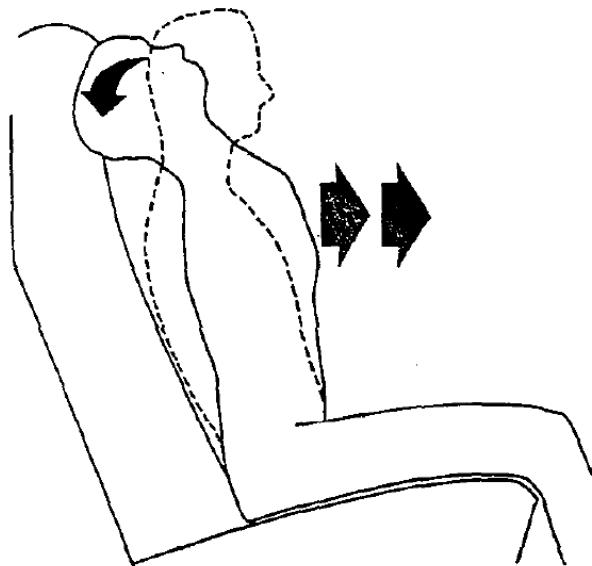


Figura 15. Hiperextensión del cuello como consecuencia del rebote diferencial

A continuación, se va a analizar una colisión trasera en la que, para simplificar el análisis, se supone que los vehículos implicados en dicha colisión poseen paragolpes capaces de protegerlos tanto para 2.5 mph como para 5 mph. Se supone además que las estructuras de los vehículos son rígidas y que, por tanto, no disponen de ningún elemento de absorción de energía más allá de los citados paragolpes.

La Figura 16 muestra los dos vehículos en las tres fases que acontecen a la colisión por alcance. En primer lugar, antes de la colisión, posteriormente, en el momento en el que los paragolpes elásticos están totalmente comprimidos a sus valores nominales y, por último, instantes después de la colisión donde los paragolpes han restaurado su energía.

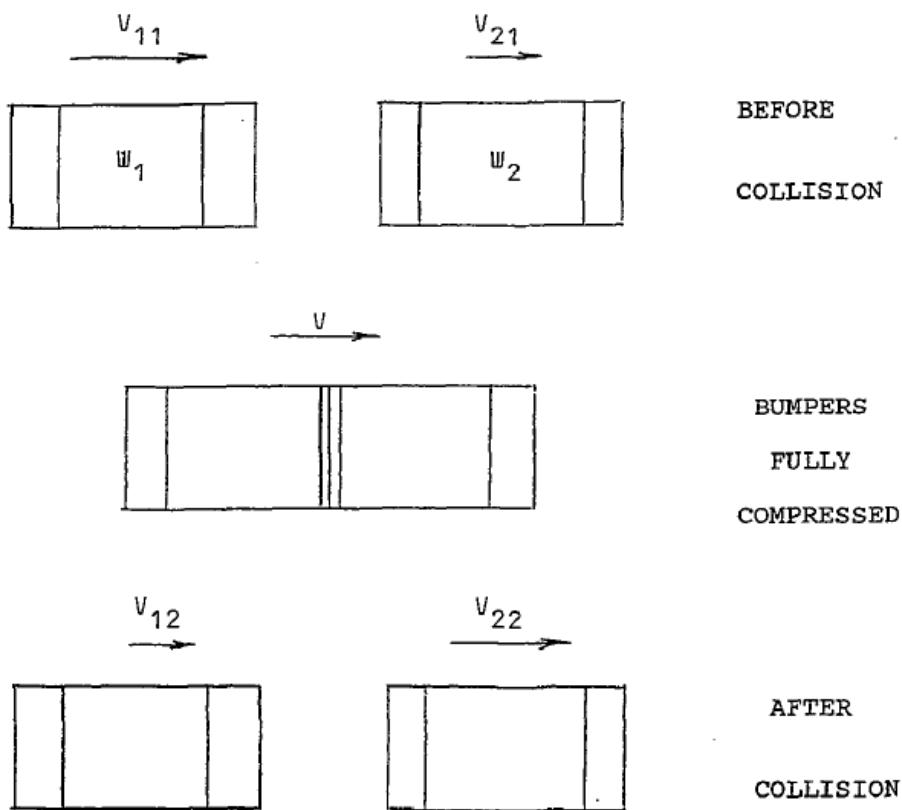


Figura 16. Mecanismo de colisión durante un impacto trasero

Cuando el parachoques del vehículo que impacta está totalmente comprimido, ha absorbido la energía cinética del vehículo como si el vehículo hubiera golpeado una barrera siendo esta igual a  $\frac{1}{2}m_1v_{R1}^2$ . Del mismo modo, el parachoques del vehículo alcanzado habrá absorbido una energía igual a  $\frac{1}{2}m_1v_{R2}^2$  y equivalente a la anterior. La Ecuación 13 muestra el intercambio de energía cinética.

$$m_1v_{11}^2 + m_2v_{21}^2 = m_1v_{R1}^2 + m_2v_{R2}^2 + (m_1 + m_2)v^2$$

Ecuación 13. Energía cinética en colisión trasera

En dicha ecuación, los subíndices 11 y 12 se refieren al vehículo que impacta antes y después de la colisión, 21 y 22 hacen referencia al vehículo impactado antes y después de la colisión y ,por último, R1 y R2 representan los parachoques de los vehículos 1 y 2 respectivamente.

La ecuación de momento lineal, cuando los dos paragolpes están totalmente comprimidos, se muestra en la *Ecuación 14*:

$$m_1 v_{11} + m_2 v_{21} = (m_1 + m_2) v$$

*Ecuación 14. Ecuación de momento lineal*

Resolviendo la *Ecuación 13* y la *Ecuación 14* simultáneamente, resulta la *Ecuación 15*:

$$\left(\frac{v_{R1}}{v_{11}}\right)^2 \left[ \left(\frac{m_1}{m_2} + 1\right) + \left(\frac{m_2}{m_1^2 + 1}\right) \left(\frac{v_{R2}}{v_{R1}}\right)^2 \right] = \left(1 - \frac{v_{21}}{v_{11}}\right)^2$$

*Ecuación 15. Resolución ecuaciones 13 y 14*

La *Ecuación 15* está resuelta para la velocidad de impacto admisible que produce la compresión total de los dos parachoques, pero no conlleva daños en ningún vehículo ( $V_{11}$ ). Debe tenerse en cuenta que esta condición solo existirá si los dos parachoques están diseñados para desarrollar aproximadamente la misma fuerza cuando están completamente comprimidos.

Para los parachoques que son totalmente elásticos, es decir, que devuelven toda la energía tras la compresión, la ecuación de la energía cinética después de la colisión se muestra en la *Ecuación 16*:

$$m_1 v_{11}^2 + m_2 v_{21}^2 = m_1 v_{12}^2 + m_2 v_{22}^2$$

*Ecuación 16. Energía cinética en parachoques elásticos*

La ecuación de momento lineal, antes y después de la colisión en dicha hipótesis sería la mostrada en la *Ecuación 17*:

$$m_1 v_{11} + m_2 v_{21} = m_1 v_{12} + m_2 v_{22}$$

*Ecuación 17. Ecuación de momentos en parachoques elásticos*

Las *Ecuación 16* y la *Ecuación 17* pueden ser resueltas para la variación de velocidad del vehículo delantero de acuerdo a la *Ecuación 18*:

$$\frac{v_{22} - v_{21}}{v_{11}} = 2 \frac{\frac{1 - v_{21}}{v_{11}}}{\frac{m_2}{m_1 + 1}}$$

*Ecuación 18. Resolución ecuaciones 16 y 17*

Debe tenerse en cuenta que este cambio de velocidad es independiente a la velocidad inicial del coche delantero, es decir, no importa si se encuentra inicialmente en movimiento o en reposo. La

Figura 17 contiene gráficos acerca de la variación de velocidad Delta-V en el caso de parachoques totalmente elásticos.

Tal y como se detallará más adelante, el Delta-V depende de la relación de masas de los dos vehículos y de la absorción de energía por parte de los parachoques. Además, el uso de parachoques que absorben toda la energía de colisión y no devuelven dicha energía de compresión al vehículo puede llegar a reducir el valor del Delta-V en un factor igual a dos.

En el caso de parachoques completamente elásticos, la Figura 17 indica que las colisiones traseras que no provocan daños entre vehículos con la misma masa pueden provocar en el vehículo impactado por la parte trasera valores del Delta-V comprendidos entre 5-10 mph u 8-16.1 km/h. Cabe destacar que esta ausencia de daños en el vehículo no tiene por qué conllevar ausencia de lesiones en los ocupantes.

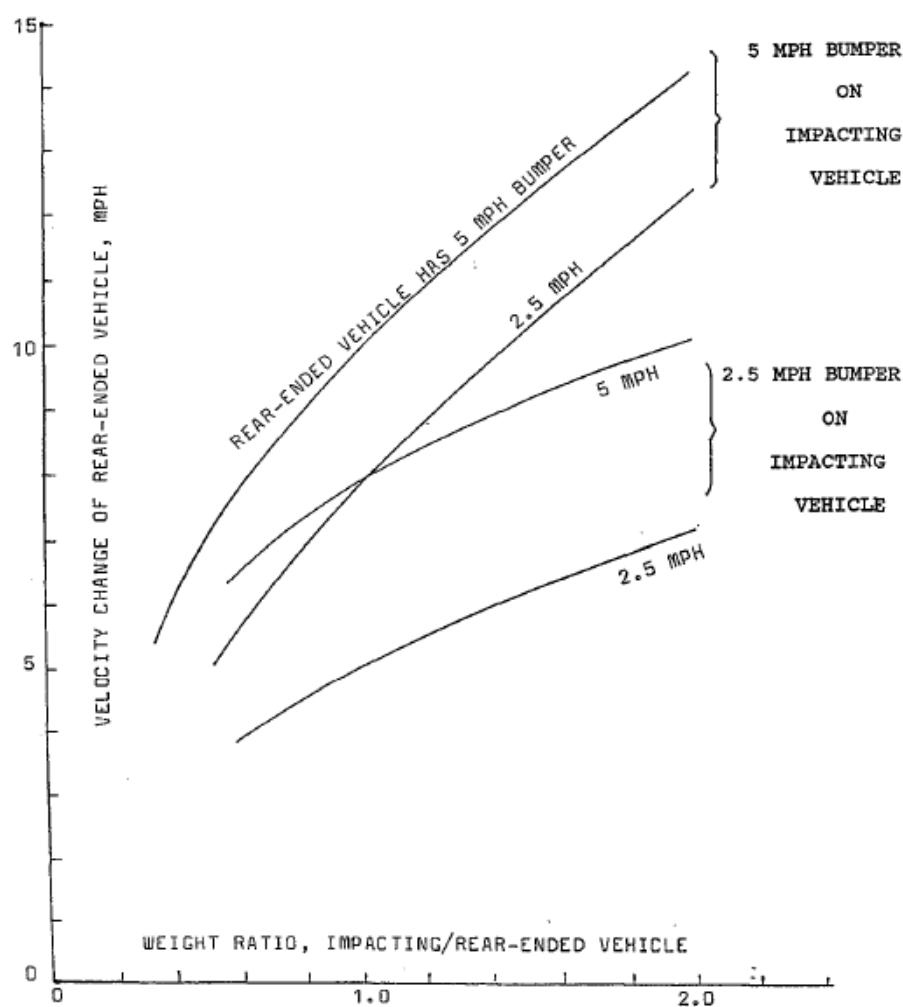


Figura 17. Delta-V en vehículo delantero con parachoques elástico

Existen casos en los que los ocupantes del vehículo impactado experimentan en todo su cuerpo un Delta-V igual al del vehículo en que viajan. Sin embargo, de acuerdo a las respuestas de las Figuras

10, 11 y 12, existen diferencias transitorias entre el Delta-V del cuello y de la cabeza que variarán la dinámica de todo el cuerpo del ocupante que está sufriendo dicha variación de velocidad.

Si se considera, por ejemplo, la línea discontinua de la *Figura 15* y en concordancia con dicho esquema, el respaldo del asiento del vehículo es proyectado hacia delante con un valor de Delta-V igual al que sufre el vehículo que recibe el impacto. Sin embargo, la cabeza y el torso del ocupante todavía están viajando a la velocidad inicial del vehículo previa al impacto. La proyección hacia delante del ocupante se inicia, de acuerdo a la línea continua de dicha figura, por el contacto del torso con el asiento con una velocidad igual al Delta-V del asiento más la velocidad de rebote causada por el coeficiente de restitución del material de composición del respaldo del asiento.

En el caso extremo, si el respaldo del asiento tuviera un 100% de rebote, el torso podría avanzar al doble del Delta-V. Al mismo tiempo, a causa de la separación inicial entre la parte posterior de la cabeza del ocupante y el reposacabezas, la cabeza no experimentará el Delta-V hasta que impacte contra dicho reposacabezas. Por lo tanto, es concebible que el límite superior del Delta-V entre la cabeza y el torso pueda ser el doble del Delta-V del vehículo impactado.

Para un impacto con un Delta-V de 10 mph o 16.1 km/h entre dos vehículos de igual masa en el que no se produce daños externos en los vehículos y en el cual cada uno de los parachoques absorbe un Delta-V de 5mph, de acuerdo a lo expuesto anteriormente, el Delta-V del torso en relación al de la cabeza podría alcanzar un valor de 32.2 km/h en el caso de un 100% de rebote. Este valor duplica el umbral de daño de 14.2 km/h citado para el modo de hiperextensión del conjunto cabeza/cuello por lo que cabría esperar que se produjera lesión.

#### 2.1.4. Relación entre el Delta-V y la lesión

En este apartado se ha utilizado un subconjunto de datos recopilados por el National Accident Sampling Study (NASS) y el National Crash Severity Study (NCSS) que provienen del análisis de más de 20.000 casos provenientes de accidentes entre 1977 y 1991. Tanto los estudios de NCSS y NASS han generado una base de los datos para realizar un análisis de la relación entre el Delta-V y las lesiones de los ocupantes expresadas en Abbreviated Injury Scale (AIS) cuyos valores, comprendidos entre 0 y 6, otorgan a las lesiones graves no vitales una gravedad igual a 3.

##### 2.1.4.1. Fractura cervical y Delta-V

En la *Figura 18* se muestra el porcentaje acumulado de las fracturas y dislocaciones de la columna cervical producida en ocupantes en el caso de colisiones frontales. De acuerdo a esta figura, el percentil 50 para esta lesión reside en un Delta-V de 40.3 km/h.

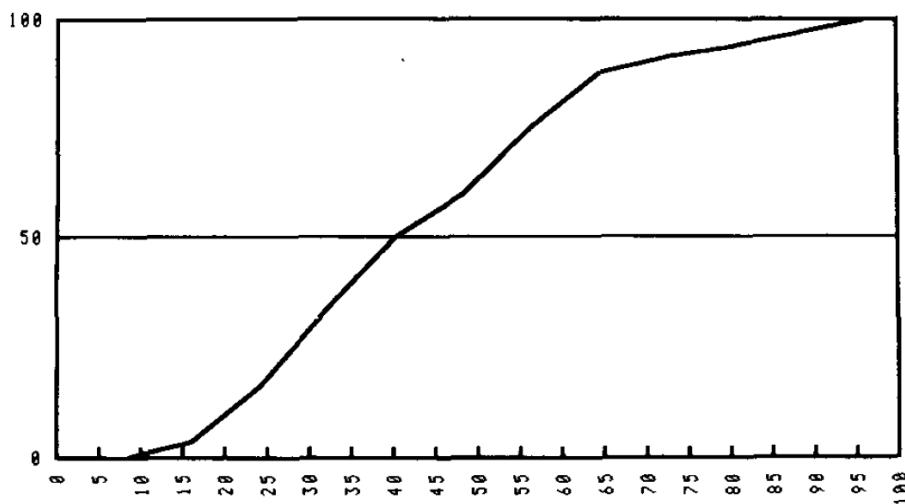


Figura 18. Relación entre fractura cervical y Delta-V

#### 2.1.4.2. Efecto de la edad y del género en la lesión

Con el fin de examinar el papel de la edad sobre el proceso de lesión se han dividido en 3 grupos aquellos accidentes que poseen una lesión de nivel AIS 3 o superior. Estos grupos están conformados por ocupantes con ocupantes hasta los 25 años, entre 26 y 50 años y entre 51 y 80 años. Los resultados de dicha subdivisión se muestran en la Figura 19.

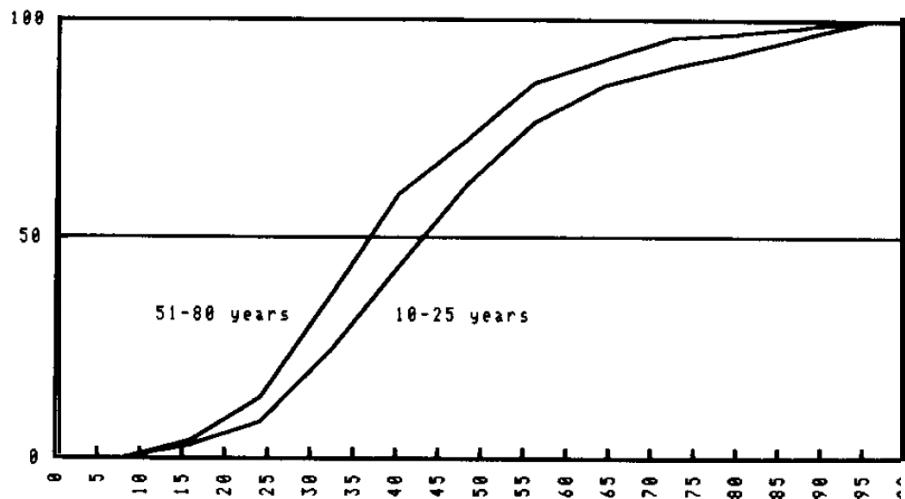


Figura 19. Relación entre la edad y Delta-V en lesiones con AIS $\geq 3$

En este caso el nivel de percentil 50 de Delta-V es de 37 km/h para el grupo de mayor edad y aumenta en un 16% hasta los 43 km/h para el grupo más joven.

#### 2.1.5. Análisis de deformaciones. Método de McHenry

Existen diversos métodos de obtención de la velocidad de colisión a partir del análisis de las deformaciones experimentadas. Dentro de ellos, el presente apartado va a exponer el desarrollo realizado por RAYMOND R. McHENRY tomando como base los trabajos previos de K. L. CAMPBELL.

Cabe destacar que dicho método servirá como base de cálculo en el apartado 3.3.2. *Ejemplos de colisiones mediante análisis de deformaciones.*

#### 2.1.5.1. Desarrollo del método

El método propuesto consiste en el modelado del vehículo implicado en una colisión como un sistema compuesto por una masa y un muelle en el que, este último, es el encargado de absorber la energía cinética al deformarse durante la colisión. McHENRY utiliza una relación proporcional entre la fuerza desarrollada durante el impacto y la deformación, en lugar de la propuesta por Campbell, que relaciona velocidad de impacto y deformación. Esta relación proporcional se representa en la *Figura 20.*



Figura 20. Deformación residual frente a fuerza durante el impacto

De acuerdo a la figura anterior, se puede observar que existe un valor de la fuerza para el que no hay deformación permanente, existiendo, únicamente, deformación elástica. Esto es equivalente a lo que ocurría con la velocidad en el caso del método de CAMPBELL, es decir, hay una velocidad máxima a partir de la que se comienzan a producir deformaciones permanentes. Una vez que se supera ese valor de la fuerza la dependencia es lineal entre la fuerza y la deformación.

Para modelar este comportamiento de los vehículos, como el de un muelle lineal disipativo, se plantea la *Ecuación 19*:

$$F = A + B \cdot D$$

Ecuación 19. Fuerza McHenry

Donde:

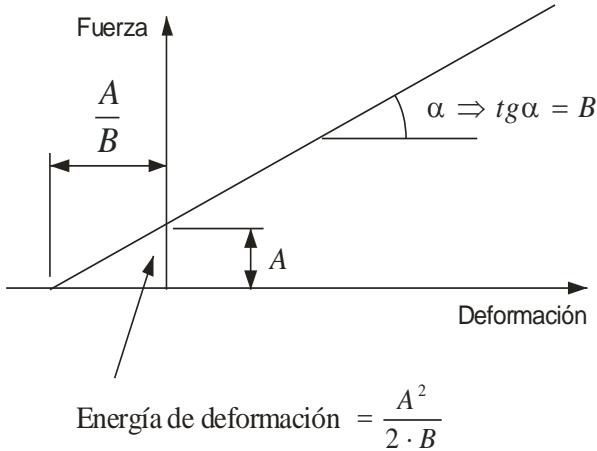
F= Fuerza durante el impacto (N/m)

D= Deformación del vehículo (m)

A= Coeficiente de rigidez (N/m)

B= Coeficiente de rigidez (N/m<sup>2</sup>)

El coeficiente de rigidez  $A$  representa la fuerza máxima que admite la estructura del vehículo sin deformación permanente mientras que coeficiente  $B$  representa la pendiente de la recta de la gráfica que relaciona linealmente la fuerza y la deformación residual del vehículo. Dicha representación gráfica se muestra en la *Figura 21*.



*Figura 21. Energía de deformación elástica*

A continuación se incluye la *Tabla 4* con los coeficientes  $A$  y  $B$  obtenidos por la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) para 6 categorías de vehículos, según su tamaño y tipo de carrocería. Lo más adecuado sería disponer de los coeficientes para cada modelo de automóvil, pero esto no es siempre posible.

Dada la infinidad de modelos de automóvil y el coste de los ensayos, hay que utilizar los coeficientes correspondientes a la categoría más adecuada al vehículo objeto de análisis. Es por ello que es necesario resaltar que el uso de estos coeficientes agrupados en categorías de vehículos constituye una aproximación.

	<b>Categoría 1</b>	<b>Categoría 2</b>	<b>Categoría 3</b>	<b>Categoría 4</b>	<b>Categoría 5</b>	<b>Furgones</b>
Batalla [m]	2,055 a 2,408	2,408 a 2,581	2,581 a 2,804	2,804 a 2,984	2,984 a 3,129	2,769 a 3,302
Vía [m]	1,298	1,387	1,496	1,57	1,618	1,717
Longitud [m]	4,059	4,442	4,983	5,405	5,754	4,663
Anchura [m]	1,544	1,707	1,844	1,956	2,017	1,981
Peso [kg]	990	1380	1600	1925	2300	1970
<b>Frontal</b>						
$A \left[ \frac{N}{m} \right]$	52850	45325	55475	62300	56875	67025
$B \left[ \frac{N}{m^2} \right]$	32.830	296270	385840	234260	254930	868140

Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Furgones
<b>Trasero</b>					
$A \left[ \frac{N}{m} \right]$	64050	68425	71750	62475	51975
$B \left[ \frac{N}{m^2} \right]$	261820	282490	303160	389570	482300
<b>Lateral</b>					
$A \left[ \frac{N}{m} \right]$	13475	24500	30275	25025	30975
$B \left[ \frac{N}{m^2} \right]$	254930	461630	392730	344500	323830

Tabla 4. Coeficientes de rigidez A y B para seis categorías de vehículos

El modo de obtención de coeficientes de la tabla anterior suele realizarse a partir de la determinación de la batalla del vehículo objeto de análisis (distancia entre ejes) midiendo directamente o a través de catálogo. El valor de dicha batalla indicará a qué categoría de la tabla pertenece el vehículo e indirectamente determinará los coeficientes de rigidez a utilizar en función del tipo de choque (frontal, lateral o trasero).

Una vez conocidos los datos de los coeficientes de McHENRY ya puede procederse al desarrollo del método para el cálculo de la velocidad de impacto. Consiste en un método energético en el que la energía cinética del vehículo antes del impacto se transforma en el trabajo necesario para deformar la estructura y la carrocería del vehículo. Cabe destacar que es de aplicación tanto para choques frontales, traseros y laterales, siempre que se disponga de los coeficientes correspondientes a cada tipo de colisión.

#### 2.1.5.2. Cálculo de la energía absorbida

Para calcular la energía absorbida en el impacto se integra la expresión de la fuerza desarrollada sobre la distancia deformada en profundidad y sobre la anchura del vehículo afectada por la deformación. La expresión general para la energía absorbida es la mostrada en la *Ecuación 20*:

$$E_a = \iint F \cdot dx \cdot dy$$

Ecuación 20. Energía absorbida (Ec.1)

Siendo:

$dx$ = Diferencial de profundidad de la deformación

$dy$ = Diferencial de la anchura del vehículo

Sustituyendo la fuerza por la expresión lineal propuesta por McHENRY resulta la *Ecuación 21*:

$$E_a = \iint (A + B \cdot x) \cdot dx \cdot dy$$

*Ecuación 21. Energía absorbida (Ec.2)*

Se debe tener en cuenta que hay que incluir el término de trabajo por deformación elástica absorbida por el vehículo antes de presentar deformaciones permanentes. De este modo resulta la *Ecuación 22*:

$$E_a = \int_o^L \int_{-\frac{A}{B}}^o (A + B \cdot x) \cdot dx \cdot dy + \int_o^L \int_o^D (A + B \cdot x) \cdot dx \cdot dy$$

*Ecuación 22. Energía absorbida (Ec.3)*

Integrando respecto de la profundidad de deformación y sustituyendo  $x$  por  $D_i$ , siendo  $D_i$  la medida i-ésima de la deformación, resulta la *Ecuación 23*:

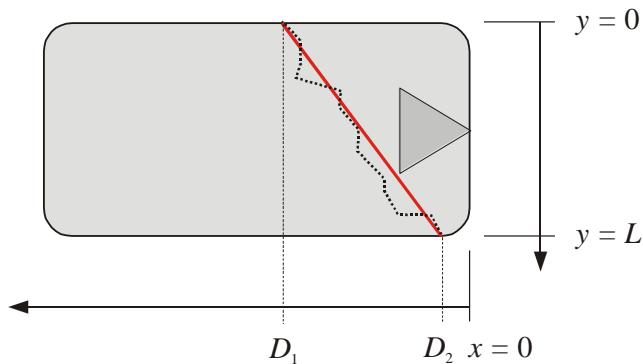
$$E_a = \int_o^L \left( \frac{A^2}{2 \cdot B} \right) \cdot dL + \int_o^L \left( A \cdot D_i + \frac{1}{2} \cdot B \cdot D_i \right) \cdot dL$$

*Ecuación 23. Energía absorbida (Ec.4)*

Posteriormente, se integra numéricamente la expresión obtenida anteriormente en función de las medidas de la profundidad de deformación residual tomadas sobre el vehículo, normalmente 2, 4 ó 6 medidas equidistantes. Dado que en el presente documento se analizaran colisiones centradas, se supondrá la hipótesis de que la deformación es constante en todo el ancho del vehículo y, por tanto, bastará con analizar 2 medidas de deformación para calcular la energía absorbida por cada vehículo.

#### 2.1.5.2.1. Energía absorbida mediante dos medidas de deformación

En la *Figura 22* se muestra un perfil de deformación cuya geometría ha sido aproximada por una recta obtenida como resultado de unir dos puntos de deformación medidos en el frontal del vehículo.



*Figura 22. Dos medidas sobre un perfil de deformación*

El perfil de deformación simplificado puede representarse numéricamente mediante la *Ecuación 24*:

$$x = D_1 - (D_1 - D_2) \cdot \frac{y}{L}$$

*Ecuación 24. Perfil de deformación simplificado*

Entonces, la energía absorbida durante el impacto viene dada por la *Ecuación 25*:

$$\begin{aligned} E_a &= \int_o^L \int_{\frac{A}{B}}^o (A + B \cdot x) \cdot dx \cdot dy + \int_o^L \int_o^{\frac{y}{L}(D_2-D_1)+D_1} (A + B \cdot x) \cdot dx \cdot dy = \\ &= \int_o^L \left[ A \cdot x + B \cdot \frac{x^2}{2} \right]_{\frac{A}{B}}^o \cdot dy + \int_o^L \left[ A \cdot x + B \cdot \frac{x^2}{2} \right]_o^{\frac{y}{L}(D_2-D_1)+D_1} \cdot dy = \\ &= I_1 + I_2 \end{aligned}$$

*Ecuación 25. Energía de deformación con dos medidas de deformación (Ec.1)*

Para facilitar el cálculo, se resolverán cada una de las dos integrales por separado. De este modo la *Ecuación 26* muestra el desarrollo de la integral  $I_2$ .

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_o^L \left[ A \cdot x + B \cdot \frac{x^2}{2} \right]_o^{\frac{y}{L}(D_2-D_1)+D_1} \cdot dy = \\ &= \int_o^L \left[ A \cdot \left[ \frac{y}{L} \cdot (D_2 - D_1) + D_1 \right] + \frac{B}{2} \cdot \left[ \frac{y}{L} \cdot (D_2 - D_1) + D_1 \right]^2 \right] \cdot dy = \\ &= \int_o^L \left[ A \cdot \left[ \frac{y}{L} \cdot (D_2 - D_1) + D_1 \right] + \frac{B}{2} \cdot \left[ \frac{y^2}{L^2} \cdot (D_2 - D_1)^2 + D_1^2 + \frac{2 \cdot y}{L} \cdot D_1 \cdot (D_2 - D_1) \right] \right] \cdot dy = \\ &= A \cdot \left[ \frac{y^2}{2 \cdot L} \cdot (D_2 - D_1) + D_1 \cdot y \right]_o^L + \frac{B}{2} \cdot \left[ \frac{y^3}{3 \cdot L^2} \cdot (D_2 - D_1)^2 + D_1^2 \cdot y + \frac{y^2}{L} \cdot D_1 \cdot (D_2 - D_1) \right]_o^L = \\ &= A \cdot \left[ \frac{L}{2} \cdot (D_2 - D_1) + D_1 \cdot L \right] + \frac{B}{2} \cdot \left[ \frac{L}{3} \cdot (D_2 - D_1)^2 + D_1^2 \cdot L + L \cdot D_1 \cdot (D_2 - D_1) \right] = \\ &= A \cdot \frac{L}{2} \cdot (D_1 + D_2) + \frac{B}{2} \cdot L \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot (D_2^2 + D_1^2 - 2 \cdot D_2 \cdot D_1) + D_1^2 \cdot L + L \cdot (D_2 \cdot D_1 - D_1^2) \right] = \\ &= A \cdot \frac{L}{2} \cdot (D_1 + D_2) + \frac{B}{2} \cdot L \cdot \frac{1}{3} \cdot (D_2^2 + D_1^2 + D_2 \cdot D_1) = \\ &= L \cdot \left[ \frac{A}{2} \cdot (D_1 + D_2) + \frac{B}{6} \cdot (D_1^2 + D_2^2 + D_1 \cdot D_2) \right] \end{aligned}$$

*Ecuación 26. Desarrollo integral  $I_2$*

Análogamente, el desarrollo de  $I_1$  viene dado por la *Ecuación 27*:

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_o^L \left[ A \cdot x + B \cdot \frac{x^2}{2} \right]_0^L \cdot dy = \int_o^L \left[ -A \cdot \left( -\frac{A}{B} \right) - \frac{B}{2} \cdot \left( -\frac{A}{B} \right)^2 \right] \cdot dy = \\ &= \int_o^L \left( \frac{A^2}{B} - \frac{A^2}{2 \cdot B} \right) \cdot dy = \frac{A^2}{2 \cdot B} \cdot [y]_o^L = L \cdot \frac{A^2}{2 \cdot B} \end{aligned}$$

*Ecuación 27. Desarrollo integral  $I_1$*

Por tanto, la expresión de la energía absorbida se resume en la *Ecuación 28*:

$$E_a = I_1 + I_2 = L \cdot \left[ \frac{A}{2} \cdot (D_1 + D_2) + \frac{B}{6} \cdot (D_1^2 + D_2^2 + D_1 \cdot D_2) \right] + L \cdot \frac{A^2}{2 \cdot B}$$

*Ecuación 28. Energía de deformación con dos medidas de deformación (Ec.2)*

Y sacando factor común L, se obtiene finalmente la expresión genérica a emplear de acuerdo a la *Ecuación 29*:

$$E_a = L \cdot \left[ \frac{A}{2} \cdot (D_1 + D_2) + \frac{B}{6} \cdot (D_1^2 + D_2^2 + D_1 \cdot D_2) + \frac{A^2}{2 \cdot B} \right]$$

*Ecuación 29. Energía de deformación con dos medidas de deformación (Ec.3)*

#### 2.1.5.3. Hipótesis para la aplicación del método

Tal y como se ha citado anteriormente, los coeficientes de rigidez mostrados en la *Tabla 4* se obtienen mediante ensayos. No obstante, la obtención de dichos coeficientes está sujeta a las siguientes restricciones:

- La rigidez de los vehículos es prácticamente uniforme en toda la anchura afectada por la colisión.
- La fuerza actúa perpendicularmente a la superficie del vehículo.
- La deformación residual del vehículo se mide también perpendicularmente a la superficie sin deformar.
- La profundidad de deformación es aproximadamente constante desde el suelo del vehículo hasta el capó, techo o tapa del maletero, según se trate de impacto frontal, lateral o trasero.
- Se consideran despreciables las fuerzas exteriores al sistema compuesto por los vehículos que colisionan, como las fuerzas de rozamiento de los neumáticos bloqueados, etc.

### 2.1.6. Cálculo del Delta-V a partir de energías de deformación

En este apartado se calculará la variación de las velocidades experimentadas por dos vehículos que sufren una colisión en la que se realiza la suposición de que esta es centrada y no existe giro de los vehículos. Dicho cálculo del Delta-V se realizará partir de los principios de Conservación de la Cantidad de Momento Lineal y Conservación de la Energía. A su vez, y de manera análoga al apartado anterior 2.1.5. *Análisis de deformaciones. Método de McHenry*, servirá de base de cálculo en el apartado 3.3.2. *Ejemplos de colisiones mediante análisis de deformaciones* del presente documento.

La expresión del Principio de Conservación de la Energía establece, de acuerdo a la *Ecuación 30*, que toda la pérdida de energía cinética experimentada por los dos vehículos que intervienen en la colisión se invierte en deformar las estructuras de ambos vehículos, es decir:

$$E_{ci} = E_{cf} + E_a$$

$$\frac{1}{2}m_1v_{1i}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{2i}^2 = \frac{1}{2}m_1v_{1f}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{2f}^2 + E_a$$

*Ecuación 30. Principio de Conservación de la Energía (Ec.1)*

Donde:

$E_{ci}$ : Energía cinética de los vehículos antes de la colisión [J]

$E_{cf}$ : Energía cinética de los vehículos en el instante de máximo acercamiento [J]

$E_a$ : Energía absorbida por los dos vehículos durante la colisión [J]

$m_1$ : Masa del vehículo 1 [kg]

$m_2$ : Masa del vehículo 2 [kg]

$v_{1i}$ : Velocidad del vehículo 1 antes de la colisión [m/s]

$v_{2i}$ : Velocidad del vehículo 2 antes de la colisión [m/s]

$v_{1f}$ : Velocidad del vehículo 1 durante el máximo acercamiento [m/s]

$v_{2f}$ : Velocidad del vehículo 2 durante el máximo acercamiento [m/s]

Teniendo en cuenta que en el instante de máximo acercamiento ambos vehículos poseen idéntica velocidad, la expresión anterior puede escribirse como la *Ecuación 31*:

$$\frac{1}{2}m_1v_{1i}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{2i}^2 = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_f^2 + E_a$$

*Ecuación 31. Principio de Conservación de la Energía (Ec.2)*

Donde:

$v_f$ : Velocidad de los vehículos durante el máximo acercamiento [m/s]

Por su parte, el Principio de Conservación de la Cantidad de Momento Lineal establece, de acuerdo a la *Ecuación 32*, que la cantidad de momento lineal del sistema permanece invariable en el

transcurso del tiempo, siempre y cuando las acciones exteriores al sistema sean de magnitud inapreciable en comparación con las acciones internas, es decir:

$$p_i = p_f$$

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}$$

*Ecuación 32. Principio de Conservación de la Cantidad de Momento Lineal (Ec.1)*

Donde:

pi: Momento lineal del sistema antes de la colisión [kg·m/s]

pf: Momento lineal del sistema en el instante de máximo acercamiento [kg·m/s]

Volviendo a tener en cuenta que en el instante de máximo acercamiento ambos vehículos poseen idéntica velocidad, la expresión anterior se puede escribir como la *Ecuación 33*:

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = (m_1 + m_2) v_f$$

*Ecuación 33. Principio de Conservación de la Energía (Ec.2)*

De este modo, gracias a la expresión anterior, es posible expresar la velocidad inicial del vehículo 2 en función de la velocidad inicial del vehículo 1 y de la velocidad de ambos vehículos en el instante de máximo acercamiento de acuerdo a la *Ecuación 34*:

$$v_{2i} = \frac{(m_1 + m_2) v_f - m_1 v_{1i}}{m_2}$$

*Ecuación 34. Velocidad inicial del vehículo 2*

Sustituyendo la expresión anteriormente calculada en la *Ecuación 31* obtenida a partir de la aplicación del Principio de Conservación de la Energía y desarrollando posteriormente términos, se obtiene la *Ecuación 35*:

$$\frac{1}{2} m_1 v_{1i}^2 + \frac{1}{2} m_2 \left( \frac{(m_1 + m_2) v_f - m_1 v_{1i}}{m_2} \right)^2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_f^2 + E_a$$

$$m_1 v_{1i}^2 + m_2 \left( \frac{(m_1 + m_2) v_f - m_1 v_{1i}}{m_2} \right)^2 = (m_1 + m_2) v_f^2 + 2E_a$$

$$m_1 v_{1i}^2 + \frac{(m_1 + m_2)^2 v_f^2 + m_1^2 v_{1i}^2 - 2(m_1 + m_2) v_f m_1 v_{1i}}{m_2} = (m_1 + m_2) v_f^2 + 2E_a$$

$$\left( m_1 + \frac{m_1^2}{m_2} \right) v_{1i}^2 + \left( \frac{(m_1 + m_2)^2}{m_2} - (m_1 + m_2) \right) v_f^2 - \frac{2(m_1^2 + m_1 m_2) v_f v_{1i}}{m_2} = 2E_a$$

$$\frac{m_1^2 + m_1 m_2}{m_2} v_{1i}^2 + \frac{m_1^2 + m_1 m_2}{m_2} v_f^2 - \frac{2(m_1^2 + m_1 m_2) v_f v_{1i}}{m_2} = 2E_a$$

$$v_{1i}^2 + v_f^2 - 2v_f v_{1i} = 2E_a \frac{m_2}{m_1^2 + m_1 m_2}$$

$$(v_{1i} - v_f)^2 = 2E_a \frac{m_2}{m_1(m_1 + m_2)}$$

Ecuación 35. Desarrollo Principios de Conservación (Ec.1)

De forma análoga y gracias a la *Ecuación 34* obtenida a partir de la aplicación del Principio de Conservación de la Cantidad del Momento Lineal, es posible expresar la velocidad inicial del vehículo 1 en función de la velocidad inicial del vehículo 2 y de la velocidad de ambos vehículos en el instante de máximo acercamiento de acuerdo a la *Ecuación 36*:

$$v_{1i} = \frac{(m_1 + m_2)v_f - m_1 v_{2i}}{m_2}$$

Ecuación 36. Velocidad inicial del vehículo 1

De nuevo, sustituyendo la expresión anterior en la *Ecuación 31* obtenida a partir de la aplicación del Principio de Conservación de la Energía y desarrollando posteriormente términos, se obtiene la *Ecuación 37*:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m_1 \left( \frac{(m_1 + m_2)v_f - m_2 v_{2i}}{m_1} \right)^2 + \frac{1}{2}m_2 v_{2i}^2 &= \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_f^2 + E_a \\ m_1 \left( \frac{(m_1 + m_2)v_f - m_2 v_{2i}}{m_1} \right)^2 + m_2 v_{2i}^2 &= (m_1 + m_2)v_f^2 + 2E_a \\ \frac{(m_1 + m_2)^2 v_f^2 + m_2^2 v_{2i}^2 - 2(m_1 + m_2)v_f m_2 v_{2i}}{m_1} + m_2 v_{2i}^2 &= (m_1 + m_2)v_f^2 + 2E_a \\ \left( \frac{m_2^2}{m_1} + m_2 \right) v_{2i}^2 + \left( \frac{(m_1 + m_2)^2}{m_1} - (m_1 + m_2) \right) v_f^2 - \frac{2(m_1 m_2 + m_2^2)v_f v_{2i}}{m_1} &= 2E_a \\ \frac{m_2^2 + m_1 m_2}{m_1} v_{2i}^2 + \frac{m_2^2 + m_1 m_2}{m_1} v_f^2 - \frac{2(m_1 m_2 + m_2^2)v_f v_{2i}}{m_1} &= 2E_a \\ v_{2i}^2 + v_f^2 - 2v_f v_{2i} &= 2E_a \frac{m_1}{m_2^2 + m_1 m_2} \\ (v_{2i} - v_f)^2 &= 2E_a \frac{m_1}{m_2(m_1 + m_2)} \end{aligned}$$

Ecuación 37. Desarrollo Principios de Conservación (Ec.2)

Finalmente, una vez obtenidas las ecuaciones que relacionan el cuadrado de la variación de velocidad de cada uno de los dos vehículos, se puede expresar el Delta-V de cada uno de los vehículos de acuerdo a la *Ecuación 38*:

$$\Delta v_1 = v_{1i} - v_{1f} = \sqrt{\frac{2E_a m_2}{m_1(m_1 + m_2)}}$$

$$\Delta v_2 = v_{2i} - v_{2f} = \sqrt{\frac{2E_a m_1}{m_2(m_1 + m_2)}}$$

Ecuación 38. Expresión analítica cálculo Delta-V

Donde:

$\Delta v_1$ = Variación de velocidad del vehículo 1 durante la colisión (m/s)

$\Delta v_2$ = Variación de velocidad del vehículo 1 durante la colisión (m/s)

$E_a$ : Energía absorbida por los dos vehículos durante la colisión [J]

$m_1$ : Masa del vehículo 1 [kg]

$m_2$ : Masa del vehículo 2 [kg]

Cabe destacar también que las variaciones de velocidad calculadas en la *Ecuación 38* únicamente calculan dichos Delta-V en el período de acercamiento (tiempo que transcurre entre el contacto inicial entre los vehículos y el momento en el que se produce la máxima deformación) y que, por tanto, su precisión no es total al no tener en cuenta los efectos de la restitución. No obstante, dicha ecuación será más precisa en impactos de cierta velocidad en los que el rebote o restitución son relativamente pequeños y en los que la deformación elástica sea mucho menos representativa que la deformación residual.

## 2.2. WHIPLASH

Se define whiplash o latigazo cervical como el mecanismo de transferencia de energía al cuello por aceleración/deceleración que puede resultar como consecuencia de un impacto trasero o lateral.

Esta transferencia de energía, producida en su mayoría por colisiones de vehículos a motor, puede provocar lesiones óseas o heridas de los tejidos blandos (esguince cervical) que a su vez pueden implicar una gran variedad de manifestaciones clínicas (trastornos asociados al esguince cervical) (Québec Task Force (SPITZER, 1995)).

### 2.2.1. Colisión a baja velocidad

Se entiende por colisión a baja velocidad aquella que sucede con una velocidad igual o inferior a 16 km/h (10 mph). En la perspectiva accidentológica está comprobado científicamente su potencial lesivo. En efecto, en una monografía de RENÉ CAILLET de 1968 dedicada al dolor cervical, (correspondiente a una edición española de Barcelona en 1988), expresaba que accidentes aparentemente inofensivos para el vehículo pueden tener consecuencias nada desdeñables para los ocupantes de estos. En dicha monografía ponía de manifiesto que cuando un automóvil se desplaza a una velocidad de 7 mph (11.2 km/h) ya se pueden originar lesiones severas en el cuello.

#### 2.2.1.1. Factores desencadenantes del mecanismo de lesión

El mecanismo del latigazo cervical depende de diferentes patrones cinemáticos así como de diferentes factores físicos y geométricos del vehículo y del ocupante que recibe el impacto. Entre otros, cabe destacar: el vector de dirección en que el coche fue golpeado, la posición de la cabeza y del cuerpo en el momento de recibir el impacto, el tipo de asiento, factores humanos, entre otros.

Posteriormente y dependiendo de diversos factores como la rigidez del asiento, la energía elástica almacenada por este, el uso del cinturón de seguridad, la posición del reposacabezas, la detención del vehículo tras la colisión posterior y otros parámetros geométricos, se produce una combinación de hiperextensión y hiperflexión del cuello conocida como latigazo cervical o whiplash tal y como se muestra en la *Figura 23*.

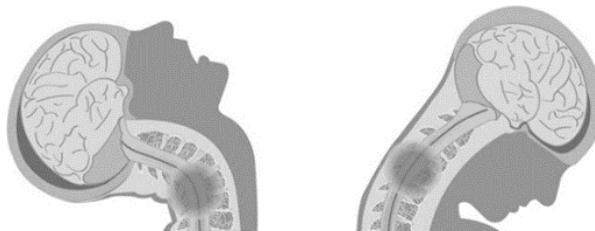


Figura 23. Hiperextensión e hiperflexión del cuello

### 2.2.1.2. Movimientos del ocupante

La transferencia de energía producto de un latigazo cervical, en el caso de un impacto posterior, no se limita ni mucho menos a la región cervical. La fuerza del impacto posterior se transmite inicialmente a través del asiento, la que modifica en su dinámica, la geometría del raquis en su conjunto. De este modo, la energía del impacto recorre todo el raquis, iniciando el movimiento en la pelvis y ascendiendo por la columna lumbar hasta la región cervical donde se produce la mayor amplitud del látigo raquídeo. La biomecánica del ocupante de un vehículo que sufre una colisión por alcance, con respecto a su cuello, se compone de las siguientes tres fases de acuerdo a la *Figura 24*.

- a) Movimiento de “trepada” o “ramping” y de enderezamiento de la columna vertebral.
- b) Movimiento de retracción brusco de la cabeza en relación al torso.
- c) Movimiento de hiperextensión

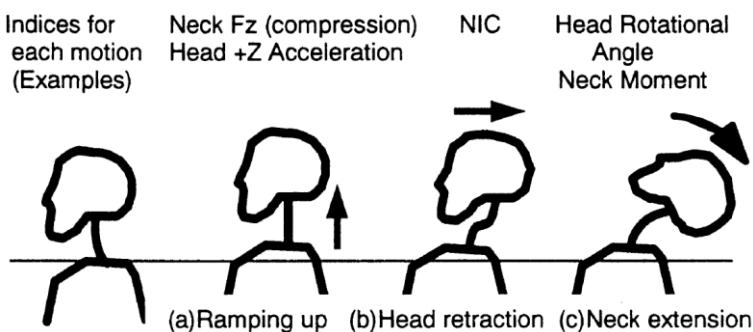


Figura 24. Movimientos del latigazo cervical

Cabe destacar que una mayor diferencia de masa entre el vehículo que golpea respecto al que recibe el impacto provoca un mayor riesgo de que sufran lesiones cervicales los ocupantes del vehículo más ligero. Asimismo, conviene recalcar la importancia de los citados Principios de la Cantidad de Movimiento (Momento Lineal) y de Conservación de la Energía desarrollados en el apartado 2.1.6. *Cálculo del Delta-V a partir de energías de deformación*, ya que las lesiones en los ocupantes tienen una gran dependencia con la variación de esta energía entre los vehículos implicados en la colisión.

### 2.2.2. Factores humanos

Las distorsiones de la columna cervical, también llamadas lesiones por latigazo cervical, han resultado ser una de las tipologías más comunes de lesiones en los accidentes de tráfico de acuerdo con la tasa de ocurrencia y la importancia de las consecuencias de dichas lesiones. Muchos aspectos técnicos han sido publicados sobre dicho latigazo cervical o whiplash, sin embargo existe escasa documentación acerca de los factores humanos que condicionan dicho mecanismo de lesión. Particularmente, estos parámetros y su relación con las lesiones cervicales se han analizado sobre la base de accidentes Volkswagen. En dicha base de datos, se expone la importancia en forma cuantitativa del género, la edad, la talla y el peso corporal de los ocupantes con turismos implicados en colisiones

posteriores, a través de su relación con las frecuencias de ocurrencia y el riesgo de sufrir un latigazo cervical.

El objetivo de este apartado reside, por tanto, en analizar en las colisiones traseras de vehículos la importancia de los factores humanos sobre la frecuencia y riesgo de distorsiones de la columna cervical a partir de, como ya se ha comentado, la base de datos de Volkswagen. Dada la gran variedad de términos existentes para identificar este grupo de lesiones, se ha focalizado el análisis en lesiones clasificadas como AIS=1 (lesiones con gravedad leve) como consecuencia de un latigazo cervical.

#### 2.2.2.1. Fuente de datos

Los datos empleados en este apartado han sido recopilados por Accident Research Unit of the Medical University Hanover (MUH) registrando en promedio 1000 accidentes anualmente. El análisis de este estudio se realiza sobre 8150 accidentes de tráfico, con un total de 20788 personas implicadas y 14233 vehículos de diferentes tipos (incluyendo motocicletas, camiones, etc.) no haciendo en ningún caso preselección de automóviles en relación a la tipología, modelo o fabricante.

Del número total de 14837 ocupantes de 9985 vehículos de pasajeros registrados en la base de datos, 10349 tenían colocado el cinturón de seguridad en el momento del accidente y, de ellos, 5 779 (55,8 %) no resultaron heridos. Esta última cifra refleja una característica muy importante del sistema de recogida de datos MUH ya que todos los usuarios de la carretera que están involucrados en un accidente en particular se registran en la base de datos, incluso aquellos que han sufrido ningún daño en absoluto. Sólo debido a este principio, es posible calcular valores numéricos cuantitativos del riesgo de lesión de los ocupantes que participan en las situaciones de accidente de un tipo claramente especificado.

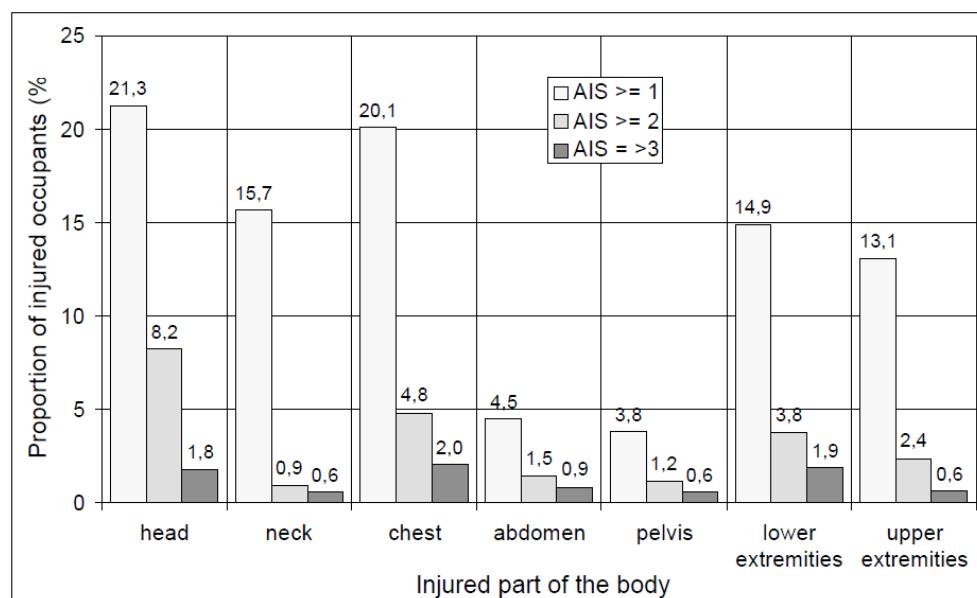
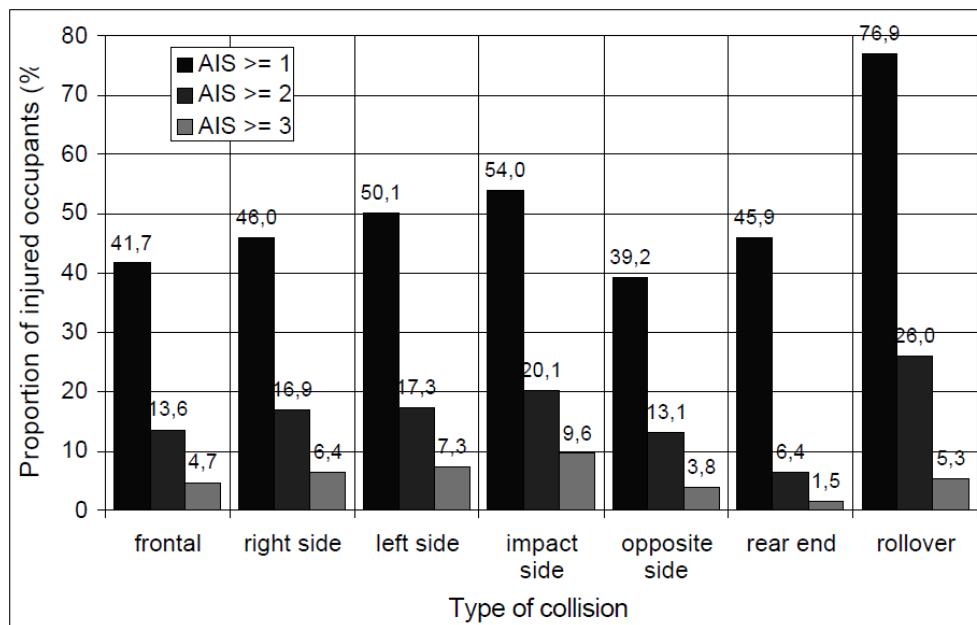


Figura 25. Riesgo de lesión en diferentes partes del cuerpo

De esta forma, la *Figura 25* muestra una visión general del riesgo de lesiones en diversas áreas del cuerpo de los ocupantes con cinturón de seguridad en función de la gravedad de lesiones de acuerdo a la escala AIS.

Además de ello, la *Figura 26* muestra el riesgo de lesiones en los ocupantes con cinturón de seguridad de vehículos en diferentes tipos de colisión.



*Figura 26. Riesgo de lesión según el tipo de colisión*

Ambos diagramas contienen resultados de los análisis de todas las colisiones de automóviles de pasajeros, es decir incluyendo también los accidentes que comprenden una secuencia de más de una sola colisión con otro vehículo u objeto. Aproximadamente el 21 % de los turismos en la base de datos de accidentes de Volkswagen están involucrados dichas colisiones múltiples que a menudo son más graves que las individuales. Dado el aumento de incertidumbre entre los factores humanos y las lesiones en este tipo de colisiones, parece lógico centrar el estudio en análisis de colisiones individuales con el fin de aumentar el grado de fiabilidad. Las cifras concretas de la base de datos de accidentes de Volkswagen referentes a la frecuencia de lesiones de latigazo cervical se exponen en la *Tabla 5*.

Collision type: (according to position of main damage)	All occupants in passenger cars	All belted occupants in passenger cars	Injured belted occupants in passenger cars	Belted occupants with neck injury	Belted occupants with neck distortion
All collisions	14 276 (100.0 %)	10 349 (100.0 %)	4 570 (100.0 %)	1 621 (100.0 %)	1 229 (100.0 %)
Frontal collisions	9 064 (63.5 %)	6 650 (64.3 %)	2 773 (60.7 %)	931 (57.4 %)	700 (57.0 %)
Right side collisions	1 368 (9.6 %)	940 (9.1 %)	432 (9.5 %)	106 (6.5 %)	71 (5.8 %)
Left side collisions	1 635 (11.5 %)	1 146 (11.1 %)	574 (12.6 %)	171 (10.5 %)	119 (9.7 %)
Impact side occupants	1 482 (10.4 %)	1 067 (10.3 %)	576 (12.6 %)	173 (10.7 %)	118 (9.6 %)
Opposite side occupants	1 386 (9.7 %)	953 (9.2 %)	374 (8.2 %)	88 (5.4 %)	58 (4.7 %)
Rear-end collisions	1 744 (12.2 %)	1 295 (12.5 %)	594 (13.0 %)	358 (22.1 %)	297 (24.2 %)
Single rear-end coll.	1 005 (7.0 %)	836 (8.1 %)	330 (7.2 %)	226 (13.9 %)	186 (15.1 %)
Rollover	386 (2.7 %)	281 (2.7 %)	216 (4.7 %)	56 (3.5 %)	46 (3.7 %)

*Tabla 5. Cifras de lesiones en distintos tipos de accidentes*

Pese a los distintos tipos de accidente que desencadenan riesgo de distorsión de la columna cervical, el siguiente análisis se limita a accidentes no múltiples por alcance en vehículos cuyos ocupantes sí llevaban el cinturón de seguridad.

#### 2.2.2.2. Resultados de los factores humanos en relación con el latigazo cervical

##### 2.2.2.2.1. Género de los ocupantes lesionados

El género de los ocupantes de los vehículos de pasajeros parece ser un parámetro muy importante en relación con el riesgo de sufrir una lesión en la distorsión de la columna cervical en una colisión trasera. La *Tabla 6* muestra un resumen de las colisiones por alcance sufridas por hombres y mujeres.

Number of:	Total	Male	female	male / female relationship
Occupants involved:	836	482	337	58.9 / 41.1
Occupants injured:	186	73	113	39.2 / 60.8
Injury risk:	22.2 %	15.1 %	33.5 %	./.

Tabla 6. Número de ocupantes lesionados en colisiones traseras en función del género

De acuerdo a la tabla anterior, pese a que la mayoría de los ocupantes implicados en colisiones traseras son varones, el número de mujeres que sufren lesiones es mayor. Incluso el porcentaje de afectadas duplica el valor de las lesiones en el caso de ocupantes masculinos (33.5% frente a 15.1%).

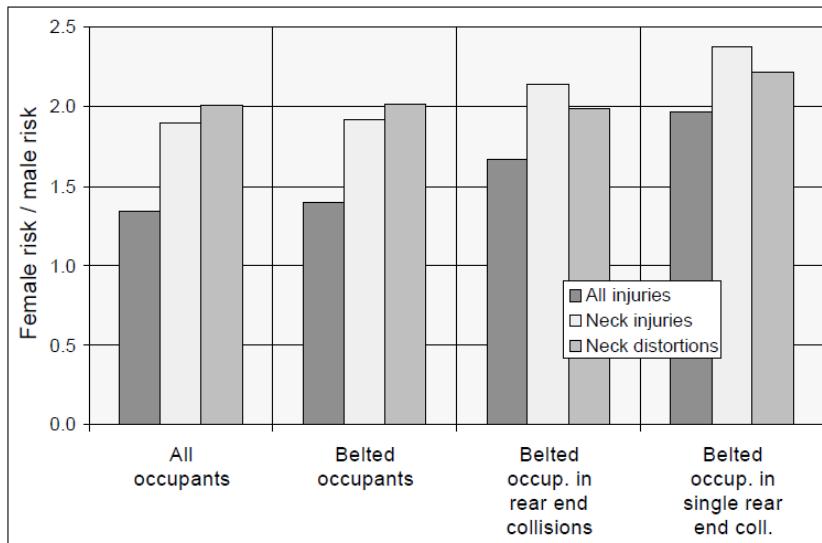
Para probar esta hipótesis de mayor susceptibilidad a este tipo de lesiones por parte del género femenino, la *Tabla 7* muestra los datos para las mujeres y hombres bajo diversos tipos de condiciones y para diferentes tipos de lesiones.

	All occupants in passenger vehicles	Belted occupants in passenger vehicles	Belted occupants in rear end collisions	Belted occupants in single rear end collisions
1. Number of occupants in passenger vehicles				
male	8 700 (100 %)	6 299 (100 %)	749 (100 %)	482 (100 %)
female	5 224 (100 %)	3 938 (100 %)	526 (100 %)	337 (100 %)
2. Number (and percentage) of injured occupants				
male	3 353 (38.5 %)	2 438 (38.7 %)	274 (36.6 %)	139 (28.8 %)
female	2 705 (51.8 %)	2 130 (54.1 %)	320 (60.8 %)	191 (56.7 %)
3. Number (and percentage) of occupants with neck-injuries				
male	920 (10.6 %)	737 (11.7 %)	143 (19.1 %)	85 (17.6 %)
female	1 047 (20.0 %)	884 (22.4 %)	215 (40.9 %)	141 (41.8 %)
4. Number (and percentage) of occupants with neck distortions				
male	665 (7.6 %)	544 (8.6 %)	124 (16.6 %)	73 (15.1 %)
female	801 (15.3 %)	685 (17.4 %)	173 (32.9 %)	113 (33.5 %)

Tabla 7. Número de ocupantes y lesionados

Estas cifras, consideradas a priori como el índice de riesgo de lesiones, demuestran que los ocupantes femeninos tienen una mayor proporción de lesiones frente a los varones en la misma tipología de accidente. Cabe destacar también que ni para los diferentes tipos de lesión ni para las diferentes condiciones, las cifras de riesgo para cada género se mantienen constantes.

Con el propósito de realizar un análisis más detallado, la *Figura 27* muestra los cocientes de las cifras de riesgo para los ocupantes femeninos y masculinos.



*Figura 27. Ratio del riesgo de lesión mujer/hombre (AIS≥1)*

Tal y como puede observarse en la figura anterior, todos los cocientes de riesgo de lesión mujer/hombre son superiores a uno por lo que, en todas las combinaciones de accidentes mostradas, el género femenino tiene una mayor probabilidad de riesgo de accidente. Como dato a destacar, mencionar que el riesgo de lesión en el cuello para una mujer llega a duplicar o sobrepasar dicha cifra llegando a 2.4 en colisiones traseras individuales en comparación con los varones.

En cuanto a las causas de estas diferencias específicas de género, la literatura presenta una serie de nuevas hipótesis que apuntan a parámetros de comportamiento específicos por género o a diferencias en las propiedades anatómicas del cuello.

De acuerdo con un concepto fundado en razones mecánicas, los hombres tienen la musculatura del cuello más fuerte que las mujeres (IIHS, 1995). Esta afirmación se basa en los valores medidos proporcionados entre otros por FOUST et al (1973). Además, a partir de datos antropométricos obtenidos por American Army, STATES (1973) realiza una comparación del volumen de la cabeza con la sección transversal del cuello concluyendo que "las mujeres tienen menos musculatura del cuello que los hombres que poseen un mismo tamaño de cabeza" (FORET-BRUNO et al (1991))

Otra diferencia anatómica, de acuerdo con OTTE et al (1997), podría ser la causa de las diferencias específicas de género en el riesgo de lesiones ya que en relación con su propio peso corporal, las mujeres tienen cuellos más largos y cabezas más grandes en comparación con los hombres. Por último, SPITZER et al (1995) afirman que de acuerdo a datos estadísticos "las mujeres pueden ser más propensas que los hombres a presentar una reclamación a sus seguro tras sufrir un latigazo cervical".

#### 2.2.2.2.2. Edad de los ocupantes lesionados

A efectos de analizar el efecto de la edad de los ocupantes implicados en las lesiones producidas por latigazo cervical, este parámetro ha sido clasificado entre las edades de 8 y 67 años. A su vez, se ha caracterizado la edad de 18 años con la intención de diferenciar los posibles poseedores del permiso de conducción. La Figura 28 muestra la distribución de frecuencias de los ocupantes que sufrieron lesiones de distorsión en la columna cervical. Como puede observarse, la mayoría de casos residen en el grupo de edad comprendido entre los 18 y los 57 años disminuyendo dicha frecuencia dentro de este rango conforme aumenta la edad.

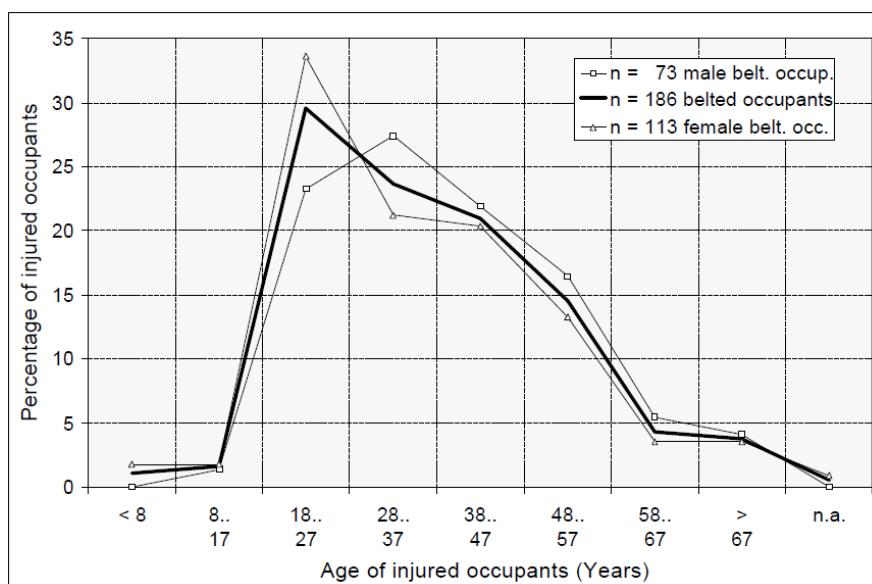


Figura 28. Distribución de frecuencias de ocupantes lesionados en función de la edad

La Figura 29 muestra el riesgo de lesión para los distintos grupos de edad de ocupantes de vehículos involucrados en una colisión trasera y sufrieron una lesión en la columna cervical.

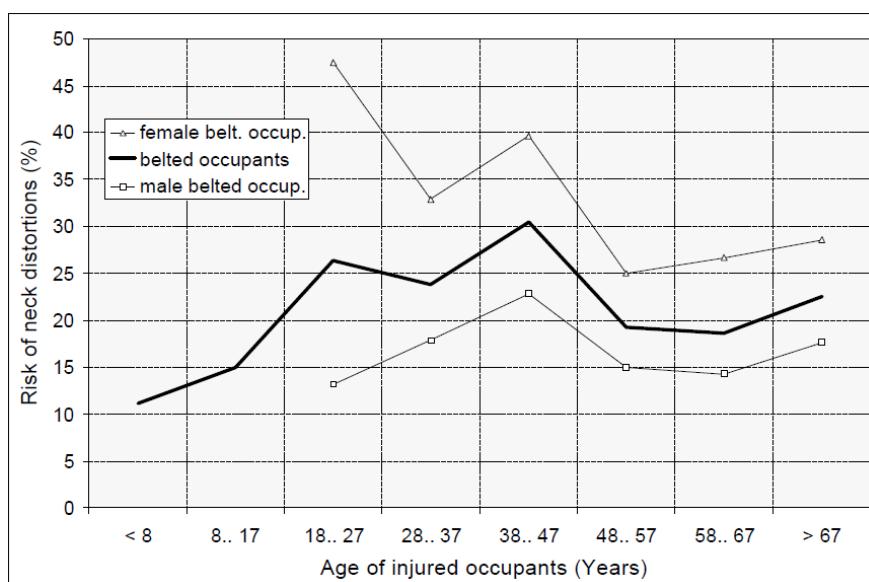


Figura 29. Riesgo de lesión de ocupantes en función de la edad

En prácticamente todos los grupos de edad mayores de 18 años el riesgo de lesiones fue de entre aproximadamente un 20% y 30%. Cabe destacar el pronunciado riesgo de lesión de mujeres comprendidas entre 18 y 27 ( $>45\%$ ), en comparación con el riesgo para ese mismo intervalo de edad de los hombres ( $<15\%$ ).

Pese a que es difícil establecer una tendencia uniforme en los gráficos en la correlación entre la edad y el riesgo de lesiones parece que la mayor gama de ellas se producen entre las edades de 23 a 53 quizás como consecuencia también de la alta probabilidad de encontrar ocupantes de esta edad como ocupantes de vehículos de viajeros.

#### 2.2.2.2.3. Altura de los ocupantes lesionados

Para realizar el análisis de la relación entre la estatura física de los ocupantes implicados y el riesgo de lesiones distorsión de la columna cervical, la *Figura 30* ilustra la distribución de frecuencias de aquellos ocupantes que sufrieron lesión divididos en rangos de alturas comprendidas entre 158 cm y 187 cm y agrupadas en intervalos de 5 cm.

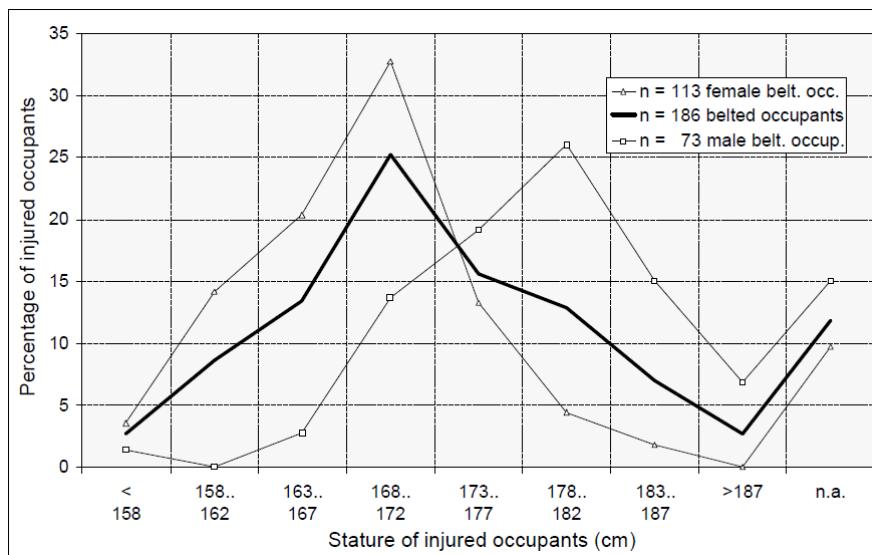


Figura 30. Distribución de frecuencias de ocupantes lesionados en función de la altura

Por otro lado, la *Figura 31* muestra la gráfica asociada al riesgo de lesión de los ocupantes. En ella puede observarse como el riesgo de padecer lesión aumenta considerablemente con la estatura situando el máximo en el intervalo 173-177 cm con una probabilidad cercana al 60%. En el caso de los hombres, solo aquellos más altos incrementen el riesgo de lesión hasta un 35%.

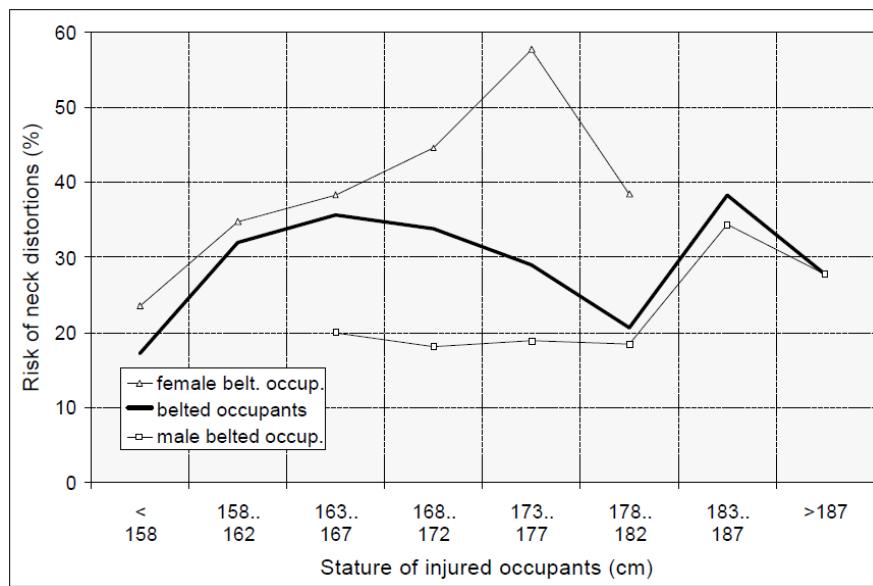


Figura 31. Riesgo de lesión de ocupantes en función de la altura

#### 2.2.2.2.4. Peso de los ocupantes lesionados

Por último, se va a examinar la relación entre el peso corporal de los ocupantes involucrados y la aparición de lesiones distorsión de la columna cervical en colisiones por alcance. En este caso la variable peso se divide en rangos de 5 kg de amplitud desde los 53 kg hasta los 92 kg.

La distribución de frecuencias de peso corporal para los ocupantes afectados se muestra en la Figura 32, la cual revela dos casos claramente diferenciados. Para un peso corporal medio de aproximadamente 72 kg existe una preponderancia de las mujeres mientras que para pesos superiores es el género masculino quien tiene una mayor representación.

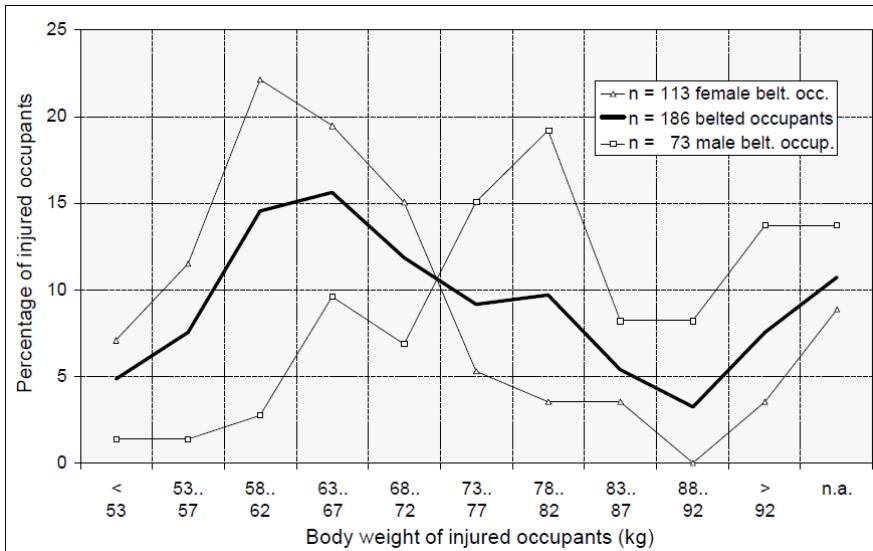


Figura 32. Distribución de frecuencias de ocupantes lesionados en función del peso

Análogamente a los casos analizados anteriormente, la *Figura 33* muestra el riesgo de lesión de los ocupantes.

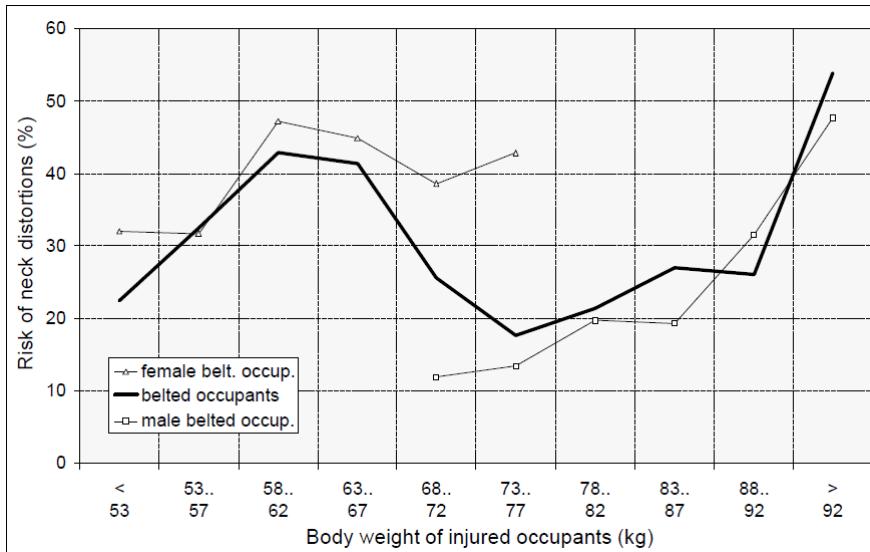


Figura 33. Riesgo de lesión de ocupantes en función del peso

La curva resultante en forma de “S” está dominada en los ocupantes de menor peso por la curva de riesgo de las mujeres, mientras que en las clases de peso más alto la curva dominante es la del sexo masculino. Analizando estos resultados es insostenible poder extraer conclusiones unánimes y constantes acerca de la relación analizada.

### 2.2.3. Investigaciones relacionadas con el Delta-V

#### 2.2.3.1. Diseño del vehículo

Las lesiones por latigazo cervical hoy en día son más frecuentes que en los vehículos antiguos. Este hecho ha sido señalado por muchos investigadores como AVERY (2000) indicando que “las lesiones por whiplash son ahora más probables que hace diez años, pues si bien es cierto que los vehículos han mejorado ciertas particularidades de ese diseño, la rigidez del propio vehículo para limitar los efectos de los golpes a baja velocidad pueden conducir a un aumento de las lesiones en el cuello” (AVERY, Motor Insurance Research Centre, Thatcham, England).

NAVIN y ROMILLY (1993) demostraron que algunos vehículos pueden resistir impactos traseros entre 5-12 mph (8 - 19.6 km/h) sin daño estructural significativo. Tras recibir el impacto, los movimientos resultantes de los ocupantes se caracterizan por un intervalo de retardo, seguido por una aceleración potencialmente peligrosa con velocidades mayores que las del vehículo que ha recibido el impacto.

Los fabricantes de vehículos diseñan la estructura del mismo para soportar un impacto posterior a alta velocidad de manera que este afecte lo mínimo posible a sus ocupantes. A su vez,

diseñan los diferentes elementos de seguridad pasiva para paliar los efectos del impacto sobre dichos sujetos. Actualmente los criterios actuales de fabricación de automóviles son:

- Aceros Alto Límite Elástico (ALE).
- Tecnología USLAB (Ultralight Steel Auto Body).
- Mayor resistencia a la rotura.
- Zona plástica más reducida.
- Menor deformación antes de la rotura.

En el caso de los choques a baja velocidad, los criterios de diseño a nivel de estructura se basan en minimizar los daños sobre la carrocería, pero no en disminuir los efectos del impacto sobre el ocupante. Los daños que sufre el vehículo en un choque posterior a baja velocidad no afectan a su estructura y sí levemente a la carrocería y a elementos destinados a absorber la energía del impacto. Este hecho se traduce en este tipo de colisiones son cada vez más elásticas con valores del coeficiente de restitución tendentes a la unidad ya que la componente plástica del choque es muy baja.

Estas consideraciones de diseño llevan asociada la problemática de que el Potencial Lesivo del Ocupante (PLO) aumenta considerablemente. Considerando la *Ecuación 39* se puede afirmar que a menor deformación, el PLO del ocupante aumenta:

$$a = \frac{V^2}{2 \cdot d}$$

*Ecuación 39. Aceleración*

Otro factor de diseño, en este caso de seguridad pasiva que afecta de forma agravante en el PLO por whiplash en colisiones a baja velocidad, es el cinturón de seguridad. El sistema de anclaje en tres puntos puede prevenir el fenómeno de rebote del torso pero, debido al mismo, aumenta la flexión de la columna cervical.

Además, la inmovilización por un solo anclaje del hombro puede producir una rotación del tronco y del cuello cuando el hombro no inmovilizado se desplaza hacia delante. A esto se le debe añadir el aumento del PLO cuando el propio reposacabezas propicia un fenómeno del rebote diferencial. (Grupo de Trabajo de Québec).

#### 2.2.3.2. Umbrales del Delta-V para producir lesión cervical

Dentro de las diversas investigaciones sobre colisiones traseras a baja velocidad, en concreto sobre el Delta-V y su relación con las lesiones de las partes blandas de la región cervical, se pueden destacar las siguientes:

SCHMIDT (1989) propone la *Tabla 8* para relacionar los parámetros físicos más habituales con la producción de lesiones cervicales.

ACELERACIÓN (G)	< 4	4 - 15	16 - 40	> 40
EBS (Km/h)	< 5	8 - 30	30 - 80	> 80
ΔV (Km/h) (vehículos con peso equivalente)	8	15 - 45	45 - 105	> 105
EFECTOS	Ausencia de lesión	Lesión leve	Lesión fuerte	Lesión mortal

Tabla 8. Parámetros de Schmidt

B.L. ALLEN (1989) equipara la aceleración de la cabeza de los impactos a baja velocidad con situaciones cotidianas que no causan lesiones cervicales como estornudar, toser, un empujón o dejarse caer sobre una silla. En estos ensayos sobre voluntarios resultaron cifras de aceleración de la cabeza incluso mayores a las alcanzadas en las lesiones producidas por colisiones a baja velocidad.

D.A. PETERS (1991) realizó diversos ensayos, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Para Delta-V inferiores a 2 mph (3,2 km/h) no hay pruebas de síntomas duraderos.
- Entre 3 - 4 mph (4,8 - 6,4 km/h) las fuerzas son las típicas de un parque de atracciones y no hay constancia de síntomas permanentes.
- 5 mph (8 km/h) es el umbral más bajo para cualquier efecto lesivo duradero.
- Entre 5 - 10 mph (8 – 16 km/h) se presenta cierto dolor de cabeza y malestar temporal del cuello.
- En torno a los 10 mph (16 km/h) la lesión es ciertamente posible, pero no segura, y los reposacabezas pueden actuar como elemento de atenuación.

McCONNELL (1993, 1995) llevó a cabo el estudio que, por encargo de la Biodinamic Research Corporation, más divulgación ha tenido. Su conclusión fue que un Delta-V de 5 mph (8 km/h) es el umbral en que se daban las probabilidades para que se produjesen lesiones en el cuello en impactos posteriores a baja velocidad.

El Grupo de Quebec (1995) recomienda el estudio de McConell ya que considera que describe claramente el proceso que lleva a provocar una lesión y la respuesta cinemática de los sujetos testados con ocasión de un accidente posterior a baja velocidad. Según los autores de este trabajo un Delta-V de 8 km/h es el límite a partir del cual la columna vertebral experimenta una aceleración de 4,5G produciendo esguinces cervicales como consecuencias del whiplash.

W. CASTRO (1997) ensayó con 4 hombres (28 - 47 años) y 5 mujeres (26 - 37 años) en colisiones a baja velocidad. Los resultados muestran que los sujetos con dolor cervical habían

experimentado un Delta-V superior a 11 km/h. Concluye que el límite a partir del cual existe daño cervical como consecuencia del whiplash se halla para un Delta-V comprendido entre 10 y 15 km/h.

KULLGREN y KRAFFT (2005) establecen una correlación entre la duración de los síntomas y la severidad del impacto medido por Delta-V y aceleración media. En su trabajo concluyen que el riesgo de sufrir lesiones en el cuello en colisiones por alcance es del 10% para un Delta-V de 8 km/h, llega al 100% cuando el Delta-V es de 25 km/h y del 20% para aceleraciones medias de 5G. Asimismo es del 30% para un Delta-V de 25 km/h en colisiones frontales y nunca excede del 45% en colisiones frontales para un Delta-V por encima de 35 km/h.

Society of Automotive Engineers (S.A.E.) realizó 33 ensayos sobre alcances a baja velocidad a vehículos con voluntarios de edades comprendidas entre 27 y 58 años. Se estableció como umbral de Delta-V un valor de 8 km/h como límite tolerable humano por debajo del cual no se producen daños cervicales.

Además de los estudios anteriormente citados, se exponen a continuación otras investigaciones que, pese a que no todas ellas relacionan el parámetro Delta-V con las lesiones cervicales, son de interés por su objeto de análisis.

BOSTRÖM (1996) propone el Criterio de Lesión en el Cuello conocido con las siglas NIC (Neck Injury Criterion). Este parámetro pone en relación el movimiento de la cabeza y el de la primera vértebra dorsal (T1) comparando la aceleración que experimenta el ocupante en estas dos localizaciones con la finalidad de intentar predecir y cuantificar la curva S que se produce en el cuello. Establece un NIC= 15 como el umbral a partir del cual un latigazo cervical puede producir lesiones en los sujetos que sufren el accidente.

W. CASTRO (1997) obtuvo que un 20% de los sujetos voluntarios sometidos a alcances placebo (con aceleraciones inferiores a la equivalente de un primer paso al caminar) experimentaron síntomas de traumatismo cervical leve, lo que supone un componente psicológico de la lesión.

R. FERRARI (2006) estableció criterios médicos para establecer la probabilidad de una relación de causalidad entre un traumatismo cervical y los síntomas crónicos. Concluyeron en la necesidad de un Delta-V de, al menos, 10,6 mph (17 km/h) en impactos por alcance con vehículos de peso similar y de, al menos, 21 mph (33,8 km/h) en impactos frontales o colisiones laterales para considerar daños cervicales como consecuencia del whiplash.

#### 2.2.3.3. Otros estudios relacionados con lesiones cervicales

Además de los valores anteriormente expuestos, la investigación científica ha constatado que los ligamentos cervicales experimentan elongaciones por encima de la tolerancia fisiológica entre 3 y 10G (CHOLEWICKI, 1997).

Asimismo, tal y como se ha citado en el documento, THOMPSON (1989) propone que para una velocidad de impacto de 8 mph (12,8 km/h) la aceleración del ocupante es 2,5 veces superior a la del vehículo. Sin embargo, otros investigadores han demostrado que puede llegar a ser 5 veces mayor (WEST, 1993 y ROSENBLUTH, 1994)

The Spine Research Institute Of San Diego realizó estudios experimentales (Crash Test) en los que evidencian que la variación de velocidad Delta-V no es directamente proporcional a la aceleración de la cabeza.

## 2.3. EJEMPLOS PRÁCTICOS

Una vez expuesto el método de cálculo y análisis del Delta-V, así como su relación con las lesiones cervicales producidas por el mecanismo del whiplash, resulta imprescindible realizar una determinación correcta de este parámetro con el fin de poder estimar con un mayor grado de fiabilidad las lesiones cervicales asociadas a este.

De este modo, se van a desarrollar diversas hipótesis de colisión entre dos vehículos con el fin de poder evaluar, de forma pedagógica, el valor del Delta-V para cada una de ellas analizando las diversas casuísticas que pueden llevar a error en la interpretación así como a la estimación incorrecta de este parámetro. Dichas hipótesis pretenden aclarar la problemática existente en torno al Delta-V a través del planteamiento de diversos ejemplos en los que, variando parámetros como la masa, rigidez o deformación, se calculará el valor del Delta-V asociado en cada uno de los impactos.

### 2.3.1. Ejemplos de colisiones ideales

#### 2.3.1.1. Ejemplos de colisiones frontales

Se van a considerar a modo de ejemplo dos vehículos que se aproximan uno hacia el otro con la misma masa y una velocidad idéntica e igual a 50 km/h. A partir de esta suposición inicial se establecen dos hipótesis:

1. **Los dos vehículos poseen idéntica masa y rigidez.** En este caso los vehículos, tras absorber toda la energía del impacto, se detendrán finalmente con un nivel de daños idéntico tal y como muestra la *Figura 34*.

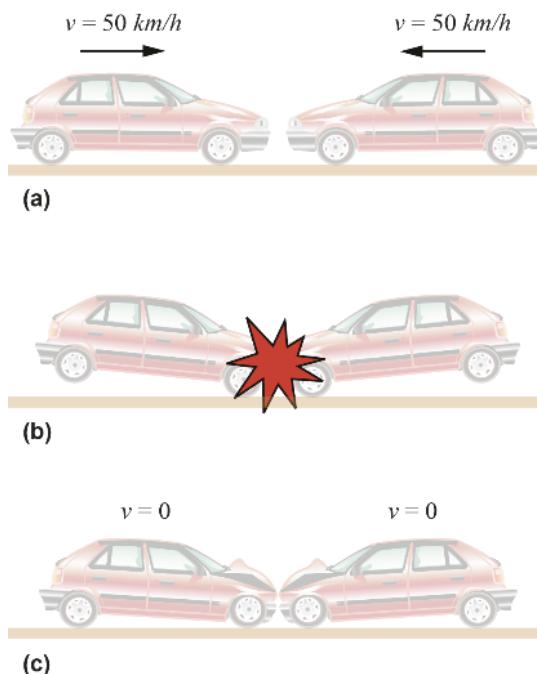
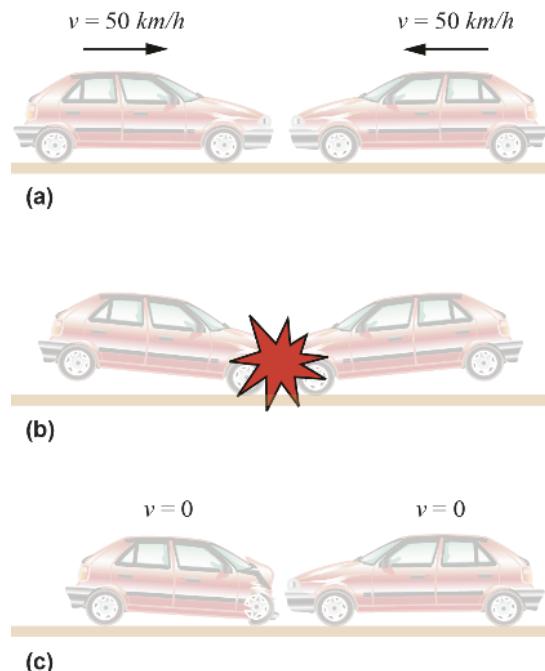


Figura 34. Colisión ideal frontal 1

Además de ello, cada vehículo habrá experimentado una variación de velocidad de 50 km/h a 0 km/h, siendo el efecto de la colisión análogo a impactar con una barrera rígida a 50 km/h.

Por lo tanto, cada uno de los dos vehículos experimentara un Delta-V de 50 km/h y absorberá la mitad de la energía total de deformación.

2. **Uno de los vehículos es infinitamente rígido.** En este caso ambos vehículos quedarán detenidos pero el vehículo con menos rigidez absorberá toda la energía de deformación tal y como muestra la *Figura 35*.



*Figura 35. Colisión ideal frontal 2*

Los dos vehículos tendrán un Delta-V de 50 km/h pero el vehículo menos rígido, pese a haber perdido la misma energía cinética ya que poseen la misma masa y velocidad inicial, sufrirá una deformación por aplastamiento mayor de la que hubiera tenido contra una barrera rígida a 50 km/h.

Por el contrario, si un vehículo golpea a otro que es menos rígido, el daño producido como consecuencia de la colisión será menor que si hubiera impactado contra una barrera rígida a 50 km/h.

### 2.3.1.2. Ejemplo de colisión contra una barrera rígida

En este apartado se va a suponer el siguiente ejemplo de colisión contra una barrera fija:

- Colisión de un vehículo contra una barrera fija.** En la *Figura 36* se muestran dos colisiones contra una barrera fija. En la parte izquierda se observa un vehículo de masa  $m$  que colisiona a una velocidad  $v_1$ . En la derecha, se observa un vehículo de idénticas características pero posee el doble de masa, es decir,  $2m$ , y que circula a una velocidad  $v'$ .

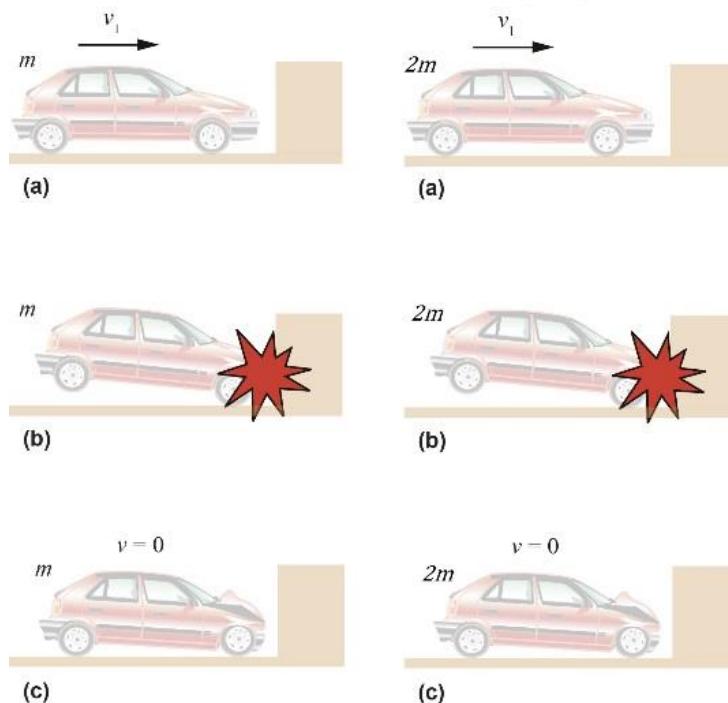


Figura 36. Colisión ideal frontal 3

En el supuesto de que, tras la colisión, ambos vehículos hayan terminado con idéntico nivel de daños, es decir, que hayan absorbido exactamente la misma cantidad de energía de deformación,  $E_a$ , puede afirmarse la siguiente expresión de acuerdo a la *Ecuación 40*.

$$E_{c1} = E_a = \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$E_{c2} = E_a = \frac{1}{2}(2m)v_2^2$$

Ecuación 40. Energía absorbida ejemplo colisión ideal frontal

A partir de la ecuación anterior puede despejarse el valor de la velocidad del primer vehículo en función de la del segundo de acuerdo a la *Ecuación 41*:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}(2m)v_2^2$$

$$v_1 = \sqrt{2}v_2$$

Ecuación 41. Velocidad ejemplo colisión ideal frontal

Por tanto, para que ambos vehículos terminaran con el mismo nivel de daños fue necesario que el vehículo de la izquierda impactara con una velocidad  $\sqrt{2}$  veces más grande que la del vehículo de la derecha. De este modo, si por ejemplo el vehículo de la izquierda circulaba a 50 km/h, el vehículo de la derecha solo necesitaba circular a algo más de 35 km/h para que se produjeran los mismos daños en ambos vehículos.

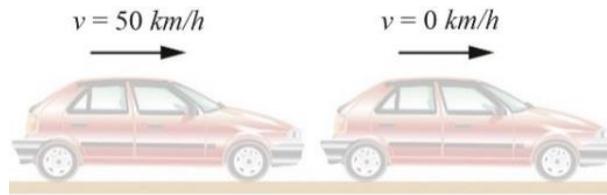
Por otro lado, si consideramos como referencia el vehículo de la izquierda, también sería posible decir que la EBS del vehículo de la derecha fue de 50 km/h, aunque la velocidad real del impacto fue, debido a poseer el doble de masa, de 35 km/h.

Como conclusión, se puede decir que el vehículo de la izquierda tuvo un Delta-V de 50 km/h y una EBS también de 50 km/h. Sin embargo, el vehículo de la derecha tuvo un Delta-V de 35 km/h pero su EBS se vio incrementada a 50 km/h.

### 2.3.1.3. Ejemplo de colisión trasera

En este apartado se va a suponer el siguiente ejemplo de colisión trasera:

- Colisión por alcance entre dos vehículos.** En este caso se supondrá, de acuerdo a la *Figura 42*, el impacto por alcance entre dos vehículos que poseen la misma masa en el que el vehículo que recibe el impacto se encuentra parado en el instante inicial de la colisión y posee el doble de rigidez.



Ecuación 42. Ejemplo colisión ideal trasera

De acuerdo al apartado 2.1.1.2. *Efectos del coeficiente de restitución*, y al tratarse de una colisión semielástica se considerará la *Ecuación 43* en función del coeficiente de restitución basada en la nomenclatura de la *Figura 1* del presente documento.

$$\begin{aligned} m_1 &= m_2 = m \\ \Delta v_1 &= v_3 - v_1 \rightarrow v_3 = \left( \frac{m_1 - m_2 e}{m_1 + m_2} \right) v_1 \\ \Delta v_2 &= v_4 - v_2 = v_4 \rightarrow v_4 = \left( \frac{m_1 (1 + e)}{m_1 + m_2} \right) v_1 \end{aligned}$$

Ecuación 43. Delta-V ejemplo colisión trasera ideal (Ec.1)

Si además, a modo de ejemplo, se considera que la velocidad del vehículo que realiza el impacto es de 16 km/h y que, en conformidad a la *Figura 2* del presente trabajo, el coeficiente de restitución será aproximadamente de 0.25, se puede calcular la variación de velocidad que ambos vehículos experimentarán de acuerdo a la *Ecuación 44*.

$$\begin{aligned}\Delta v_1 &= v_1 - v_3 = 16 - v_3 \\ v_3 &= \left(\frac{m - 0.25m}{2m}\right) 16 = 6 \frac{\text{km}}{\text{h}} \rightarrow \Delta v_1 = 10 \frac{\text{km}}{\text{h}} \\ \Delta v_2 &= v_4 - v_2 = v_4 - 0 = v_4 \\ v_4 &= \left(\frac{m(1 + 0.25)}{2m}\right) 16 = 10 \frac{\text{km}}{\text{h}} \rightarrow \Delta v_2 = 10 \frac{\text{km}}{\text{h}}\end{aligned}$$

*Ecuación 44. Delta-V ejemplo colisión trasera ideal (Ec.2)*

Analizando únicamente el accidente en términos de velocidad se observa como el Delta-V para ambos vehículos será de 10 km/h. Sin embargo, si se tienen en cuenta otros factores como la rigidez, no podrá caracterizarse el accidente teniendo en cuenta únicamente esta variación de velocidad ya que, pese a ser la misma, el vehículo que recibe el impacto sufrirá menos daños que el vehículo que colisiona frontalmente ya que posee el doble de rigidez.

Este ejemplo sirve como ilustración de que el parámetro Delta-V no sirve como estimador fiable de un accidente ya que, además de este, deben analizarse otras variables que intervienen en dicho accidente. Cabe destacar que no sería posible caracterizar el accidente analizando únicamente uno de los dos vehículos ya que, dada la mayor rigidez del vehículo que se encontraba parado, el vehículo que ha colisionado frontalmente daría la sensación de haber colisionado a mayor velocidad si solo se analizan los daños en dicho vehículo.

### 2.3.2. Ejemplos de colisiones mediante análisis de deformaciones

El presente apartado pretende realizar un estudio de sensibilidad en el que se vea relacionado el cálculo del Delta-V y las deformaciones provocadas en un accidente entre dos vehículos, en concreto un Seat Ibiza SC 1.8 TSI y un Audi A4 2.0 TDI, bajo dos hipótesis de colisión: frontal centrada y trasera centrada. La *Tabla 9* y la *Figura 37* muestran las características necesarias de los vehículos implicados para el posterior análisis de energía de deformación.

VEHÍCULOS	Seat Ibiza SC 1.8 TSI	Audi A4 2.0 TDI
<b>Masa (kg)</b>	1260	1525
<b>Batalla (m)</b>	2,467	2,820
<b>Anchura (m)</b>	1,693	1,840
<b>Anchura deformada (m)</b>	1,693	1,693

*Tabla 9. Características vehículos*



Figura 37. Seat Ibiza y Audi A4

Para realizar el cálculo del citado Delta-V se analizarán las energías de deformación en cada uno de los vehículos a partir del conocimiento de las deformaciones de cada uno de ellos. Además de ello, destacar que dentro de cada una de las hipótesis de colisión se analizarán cuatro casos de deformación creciente de acuerdo a la *Tabla 10* con el fin de visualizar la variación del Delta-V en cada uno de ellos:

	Seat Ibiza SC 1.8 TSI	Audi A4 2.0 TDI
<b>Deformadas caso 1 (m)</b>	D <sub>1</sub> =D <sub>2</sub> = 0,06	D <sub>1</sub> =D <sub>2</sub> = 0,06
<b>Deformadas caso 2 (m)</b>	D <sub>1</sub> =D <sub>2</sub> = 0,08	D <sub>1</sub> =D <sub>2</sub> = 0,08
<b>Deformadas caso 3 (m)</b>	D <sub>1</sub> =D <sub>2</sub> = 0,12	D <sub>1</sub> =D <sub>2</sub> = 0,12
<b>Deformadas caso 4 (m)</b>	D <sub>1</sub> =D <sub>2</sub> = 0,20	D <sub>1</sub> =D <sub>2</sub> = 0,20

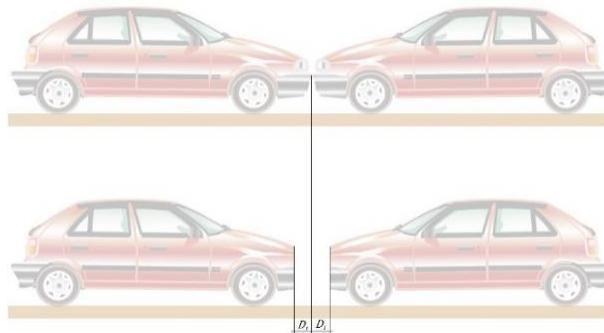
Tabla 10. Deformaciones

El método de cálculo de energía de deformación será el desarrollado en el apartado 2.1.5. *Análisis de deformaciones. Método de McHenry* mediante el cual se puede calcular dicha energía a partir de la *Ecuación 45*:

$$E_a = L \cdot \left[ \frac{A}{2} \cdot (D_1 + D_2) + \frac{B}{6} \cdot (D_1^2 + D_2^2 + D_1 \cdot D_2) + \frac{A^2}{2 \cdot B} \right]$$

Ecuación 45. Energía absorbida. McHenry

Cabe destacar que, dado que en ambas hipótesis la colisión es centrada, se establece la suposición de que las deformaciones en ambos vehículos son constantes a lo largo de toda la anchura del vehículo y que, por tanto, las distancias D<sub>1</sub> y D<sub>2</sub> del método empleado son iguales en cada una de las hipótesis. Dicha suposición está esquematizada en la *Figura 38*.



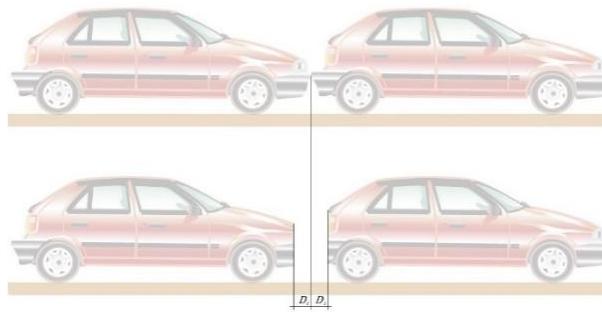


Figura 38. Deformación ( $D_i$ ) en cada una de las hipótesis de colisión

Posteriormente, se realizará el cálculo del Delta-V de cada uno de los vehículos a partir de la Ecuación 46, desarrollada en el apartado 2.1.6. *Cálculo del Delta-V a partir de energías de deformación.*

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{2E_a m_2}{m_1(m_1 + m_2)}}$$

$$E_a = E_1 + E_2$$

$$\Delta v_2 = \sqrt{\frac{2E_a m_1}{m_2(m_1 + m_2)}}$$

Ecuación 46. Cálculo Delta-V

### 2.3.2.1. Ejemplo de colisión frontal

De acuerdo a lo detallado en la introducción de este apartado de ejemplos mediante el análisis de deformaciones, en primer lugar se analizará una colisión frontal entre el Seat Ibiza y el Audi A4 tal y como muestra la Figura 39. El método de análisis de deformaciones a emplear será el de McHENRY y posteriormente se calculará el Delta-V asociado a cada uno de los casos supuestos.



Figura 39. Ejemplo colisión frontal

La Tabla 11 expone los coeficientes de rigidez delanteros de ambos vehículos obtenidos de la Tabla 4 del presente documento en función de la batalla de cada uno ya que son necesarios para la obtención de la energía de deformación.

COLISIÓN FRONTAL	Seat Ibiza SC 1.8 TSI	Audi A4 2.0 TDI
Coeficiente rigidez frontal A (N/m)	45325	62300
Coeficiente rigidez frontal B (N/m <sup>2</sup> )	296270	234260

Tabla 11. Coeficientes de rigidez frontal

Con el fin de resumir el desarrollo matemático, el cálculo de cada una de las energías de deformación aplicando el método de McHenry se ha realizado mediante una hoja de cálculo, cuyos resultados se muestran en la *Tabla 12*.

COLISIÓN FRONTAL	Seat Ibiza SC 1.8 TSI	Audi A4 2.0 TDI	Energía total
<b>Energía absorbida caso 1 (J)</b>	11376,65	21067,38	32444,03
<b>Energía absorbida caso 2 (J)</b>	13613,58	23732,11	37345,69
<b>Energía absorbida caso 3 (J)</b>	16084,57	29537,47	45622,04
<b>Energía absorbida caso 4 (J)</b>	31248,43	43051,89	74300,32

*Tabla 12. Energías absorbidas en colisión frontal real*

Utilizando las energías expuestas en la tabla anterior, se puede calcular el Delta-V para cada uno de los vehículos en cada uno de los casos analizados. Asimismo se ha calculado la Velocidad Equivalente de Barrera con el fin de disponer de otro parámetro de caracterización del accidente. Dichos resultados se muestran en la *Tabla 13*.

COLISIÓN FRONTAL	Seat Ibiza SC 1.8 TSI	Audi A4 2.0 TDI
<b>Delta-V caso 1</b>	(m/s)	5,31
	(km/h)	19,12
<b>EBS caso 1 (km/h)</b>		18,92
<b>Delta-V caso 2</b>	(m/s)	5,70
	(km/h)	20,51
<b>EBS caso 2 (km/h)</b>		20,08
<b>Delta-V caso 3</b>	(m/s)	6,30
	(km/h)	22,67
<b>EBS caso 3 (km/h)</b>		22,41
<b>Delta-V caso 4</b>	(m/s)	8,04
	(km/h)	28,93
<b>EBS caso 4 (km/h)</b>		27,05

*Tabla 13. Delta-V y EBS en colisión frontal real*

Tal y como muestra la tabla anterior, la EBS del Seat Ibiza tiene una magnitud inferior al Delta-V en cada uno de los casos. Sin embargo, en el caso del Audi A4 la EBS supera el valor del Delta-V en cada uno de ellos. Este fenómeno se debe fundamentalmente a la diferencia de masas y rigideces de ambos así como a las velocidades que cada uno de ellos tendrían que tener en el momento del accidente para que en cada uno asuma la misma deformación en cada caso.

### 2.3.2.2. Ejemplo de colisión trasera

De forma análoga al ejemplo anterior se va a analizar una colisión entre dos vehículos pero en este caso la tipología de la colisión será de tipo trasero. En este se supondrá que el Seat Ibiza realiza el impacto y que por tanto el Audi A4 recibe el impacto en la parte trasera de acuerdo a la *Figura 40*. El método de análisis de deformaciones a emplear será nuevamente el de McHENRY y posteriormente se calculará la EBS y el Delta-V asociado a cada uno de los casos supuestos.



*Figura 40. Ejemplo colisión trasera*

A continuación se exponen en la *Tabla 14* las únicas características que sufrirían variación, es decir, los coeficientes de rigidez ya que en este caso se emplearan los traseros para el caso del Audi A4 permaneciendo invariables los del Seat Ibiza. Respecto a las deformaciones se va a mantener la misma magnitud de estas para poder analizar la diferencia entre el Delta-V y la EBS entre una colisión trasera y frontal que provocan la misma deformación.

COLISIÓN TRASERA	Audi A4 2.0 TDI
<b>Coeficiente rigidez trasero A (N/m)</b>	62475
<b>Coeficiente rigidez trasero B (N/m<sup>2</sup>)</b>	389570

*Tabla 14. Coeficiente de rigidez trasero Audi A4*

Las *Tablas 15 y 16* muestran, respectivamente, la energía absorbida en esta tipología de impacto para cada uno de los vehículos y el valor de Delta-V y EBS asociado a cada una de ellas.

COLISIÓN TRASERA	Seat Ibiza SC 1.8 TSI	Audi A4 2.0 TDI	Energía total
<b>Energía absorbida caso 1 (J)</b>	11376,65	16014,52	27391,17
<b>Energía absorbida caso 2 (J)</b>	13613,58	19053,28	32666,86
<b>Energía absorbida caso 3 (J)</b>	16084,57	25922,26	42006,83
<b>Energía absorbida caso 4 (J)</b>	31248,43	42826,01	74074,44

*Tabla 15. Energías absorbidas en colisión trasera real*

COLISIÓN TRASERA		Seat Ibiza SC 1.8 TSI	Audi A4 2.0 TDI
<b>Delta-V caso 1</b>	(m/s)	4,88	4,03
	(km/h)	17,57	14,51
<b>EBS caso 1 (km/h)</b>		15,30	16,50
<b>Delta-V caso 2</b>	(m/s)	5,33	4,40
	(km/h)	19,18	15,85

<b>EBS caso 2 (km/h)</b>		16,73	18,00
<b>Delta-V caso 3</b>	(m/s)	6,04	4,99
	(km/h)	21,75	17,97
<b>EBS caso 3 (km/h)</b>		18,19	20,99
<b>Delta-V caso 4</b>	(m/s)	8,02	6,63
	(km/h)	28,89	23,87
<b>EBS caso 4 (km/h)</b>		25,35	26,98

Tabla 16. Delta-V y EBS en colisión trasera real

De acuerdo a la tabla anterior, en esta hipótesis de colisión trasera se cumple la misma relación que en la hipótesis de colisión frontal ya que el EBS del Seat Ibiza tiene una magnitud inferior al Delta-V en cada uno de los casos y en el Audi A4 el EBS supera el valor del Delta-V en cada uno de ellos. Los motivos que justifican estos resultados son idénticos a los expuestos en la hipótesis de colisión anterior.

### 2.3.2.3. Ejemplos de colisiones contra un vehículo infinitamente rígido

Diversos errores en las investigaciones de accidentes se han producido por realizar el cálculo del Delta-V a partir del análisis de solo uno de los vehículos implicados en el accidente. Este hecho solo sería posible en el caso en que el vehículo implicado hubiera colisionado contra un vehículo infinitamente rígido y, por tanto, toda la energía de deformación hubiera sido asumida por el vehículo en cuestión.

En este apartado se pretende realizar el cálculo del Delta-V en los dos casos anteriormente citados, es decir, para una colisión frontal y una trasera pero con la particularidad de que se utilizará en el cálculo del Delta-V únicamente la energía de deformación de un vehículo. En el primero de los casos se tendrá en cuenta únicamente la energía de deformación asociada al Seat Ibiza, mientras que para la colisión trasera se supondrá que disponemos únicamente de las deformaciones asociadas al vehículo que recibe el impacto, es decir, el Audi A4.

Una vez realizado dicho cálculo se obtendrá, de acuerdo a la *Ecuación 47*, el porcentaje de error que se cometería en una investigación en la que bien sea por desconocimiento, error u omisión en el cálculo, solo se analizara la energía de uno de los dos vehículos.

$$\% \text{ Error Delta-V} = \frac{\Delta V_{real} - \Delta V_{erróneo}}{\Delta V_{real}} \cdot 100$$

Ecuación 47. Error Delta-V

### 2.3.2.3.1. Colisión frontal contra un vehículo infinitamente rígido

Tal y como se ha comentado anteriormente, para realizar el cálculo del Delta-V se supondrá que el Audi A4 es infinitamente rígido o, equivalentemente, que el Seat Ibiza absorbe toda la energía de deformación. Igualmente sería semejante en esta hipótesis la suposición errónea de poder calcular dicho Delta-V analizando únicamente las deformaciones en el Seat Ibiza desconociendo por tanto las del Audi A4 tal y como muestra la *Figura 41*.



*Figura 41. Ejemplo colisión frontal errónea*

De este modo, las *Tablas 17, 18 y 19* muestran, respectivamente, la energía absorbida, el Delta-V calculado y el porcentaje de error cometido al despreciar la energía de deformación del Audi A4.

C. FRONTAL INF. RÍGIDA	Seat Ibiza SC 1.8 TSI	Audi A4 2.0 TDI	Energía total
<b>Energía absorbida caso 1 (J)</b>	11376,65	0	11376,65
<b>Energía absorbida caso 2 (J)</b>	13613,58	0	13613,58
<b>Energía absorbida caso 3 (J)</b>	16084,57	0	16084,57
<b>Energía absorbida caso 4 (J)</b>	31248,43	0	31248,43

*Tabla 17. Energías absorbidas en colisión frontal inf. rígida*

C. FRONTAL INF. RÍGIDA	Seat Ibiza SC 1.8 TSI
<b>Delta-V caso 1</b>	<b>(m/s)</b> 3,14
	<b>(km/h)</b> 11,32
<b>Delta-V caso 2</b>	<b>(m/s)</b> 3,44
	<b>(km/h)</b> 12,38
<b>Delta-V caso 3</b>	<b>(m/s)</b> 3,74
	<b>(km/h)</b> 13,46
<b>Delta-V caso 4</b>	<b>(m/s)</b> 5,21
	<b>(km/h)</b> 18,76

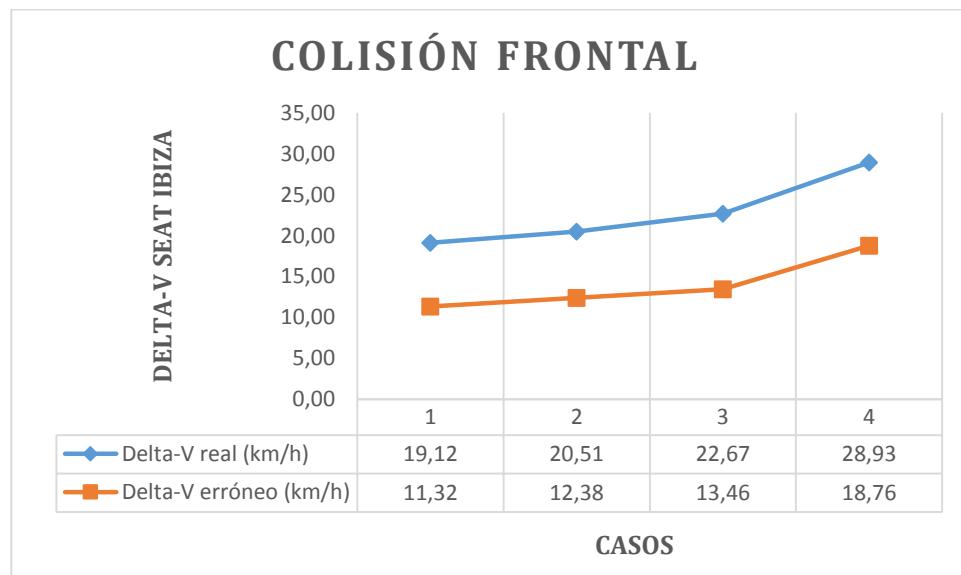
*Tabla 18. Delta-V en colisión frontal inf. rígida*

C. FRONTAL INF. RÍGIDA	Seat Ibiza SC 1.8 TSI
<b>Error Delta-V caso 1 (%)</b>	40,78
<b>Error Delta-V caso 2 (%)</b>	39,62
<b>Error Delta-V caso 3 (%)</b>	40,62
<b>Error Delta-V caso 4 (%)</b>	35,15

*Tabla 19. Error Delta-V colisión frontal inf. rígida*

De acuerdo a la tabla anterior, la omisión en el cálculo de la energía absorbida por el segundo vehículo que interviene en la colisión frontal, en este caso el Audi A4, conllevaría unos errores en el cálculo del Delta-V inaceptables en una investigación rigurosa ya que están en torno a un 40%.

Con la finalidad de resumir la información obtenida, la *Figura 42* muestra la variación del Delta-V para el Seat Ibiza calculada, en primer lugar, mediante el análisis de la energía de deformación de ambos vehículos según el apartado 2.3.2.1. *Ejemplo de una colisión frontal*, o por el contrario obteniendo dicho parámetro mediante la suposición errónea de analizar únicamente la energía de deformación del Seat Ibiza de este apartado.



*Figura 42. Delta-V en colisión frontal real y errónea*

#### 2.3.2.3.2. Colisión trasera de vehículo infinitamente rígido

En este caso, se realizara la hipótesis de considerar que el vehículo que en este caso es infinitamente rígido es el Seat Ibiza y que, por tanto, el vehículo que recibe el impacto, en este caso el Audi A4, absorberá toda la energía. Análogamente al caso anterior, sería semejante la suposición errónea de poder calcular dicho Delta-V analizando únicamente las deformaciones en Audi A4 desconociendo por tanto las del Seat Ibiza tal y como muestra la *Figura 43*.



*Figura 43. Ejemplo colisión trasera errónea*

Las *Tablas 20, 21 y 22* muestran, respectivamente, la energía absorbida, el Delta-V calculado y el porcentaje de error cometido al despreciar la energía de deformación del Seat Ibiza.

C. TRASERA INF. RÍGIDA	Seat Ibiza SC 1.8 TSI	Audi A4 2.0 TDI	Energía total
<b>Energía absorbida caso 1 (J)</b>	0	16014,52	16014,52
<b>Energía absorbida caso 2 (J)</b>	0	19053,28	19053,28
<b>Energía absorbida caso 3 (J)</b>	0	25922,26	25922,26
<b>Energía absorbida caso 4 (J)</b>	0	42826,01	42826,01

Tabla 20. Energías absorbidas en colisión trasera inf. rígida

C. TRASERA INF. RÍGIDA	Audi A4 2.0 TDI
<b>Delta-V caso 1</b>	<b>(m/s)</b>
	3,08
<b>Delta-V caso 2</b>	<b>(km/h)</b>
	11,10
<b>Delta-V caso 3</b>	<b>(m/s)</b>
	3,36
<b>Delta-V caso 4</b>	<b>(km/h)</b>
	12,10
<b>Delta-V caso 1</b>	<b>(m/s)</b>
	3,92
<b>Delta-V caso 4</b>	<b>(km/h)</b>
	14,12
<b>Delta-V caso 1</b>	<b>(m/s)</b>
	5,04
<b>Delta-V caso 4</b>	<b>(km/h)</b>
	18,15

Tabla 21. Delta-V en colisión trasera inf. rígida

C. TRASERA INF. RÍGIDA	Audi A4 2.0 TDI
<b>Error Delta-V caso 1 (%)</b>	23,54
<b>Error Delta-V caso 2 (%)</b>	23,63
<b>Error Delta-V caso 3 (%)</b>	21,44
<b>Error Delta-V caso 4 (%)</b>	23,96

Tabla 22. Error Delta-V colisión trasera inf. rígida

De forma análoga a la hipótesis de colisión frontal, la tabla anterior muestra que la omisión en el cálculo de la energía absorbida por el vehículo que impacta frontalmente en la colisión trasera, en este caso el Seat Ibiza, supondrían unos errores en el cálculo del Delta-V por encima del 20%.

Asimismo y de manera semejante a la hipótesis de colisión frontal, la *Figura 44* muestra la variación del Delta-V para el Audi A4 calculada analizando la energía de deformación de ambos vehículos según el apartado 2.3.2.1. *Ejemplo de una colisión trasera*, o por el contrario obteniendo dicho parámetro mediante la suposición errónea de analizar únicamente la energía de deformación del Audi A4 de este apartado.

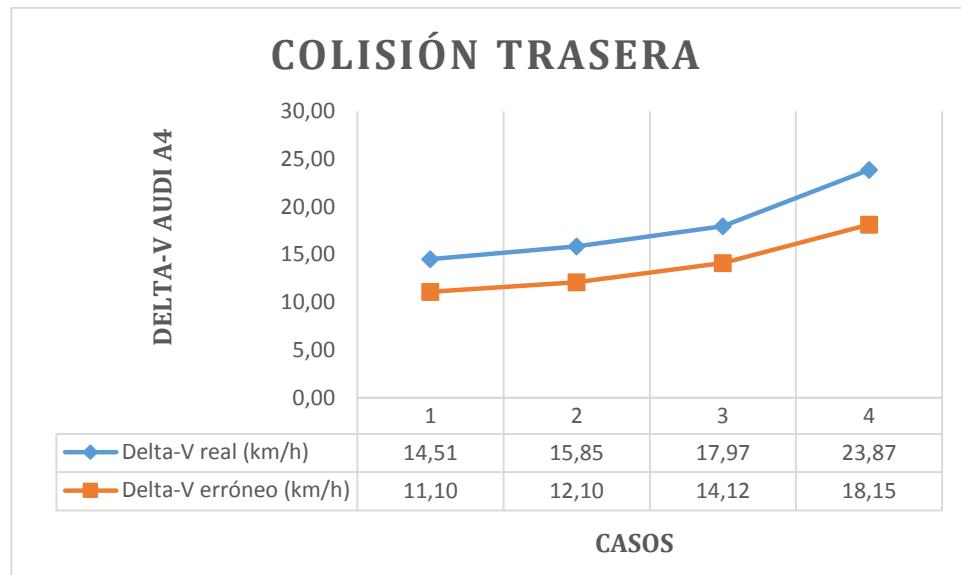


Figura 44. Delta-V en colisión trasera real y errónea

A modo de resumen, la *Figura 45*, muestra el porcentaje de error cometido en el cálculo del Delta-V de forma errónea (bajo el análisis de la energía de deformación de un solo vehículo) en comparación a su obtención rigurosa en las dos hipótesis realizadas, es decir, en una colisión frontal y una colisión trasera.

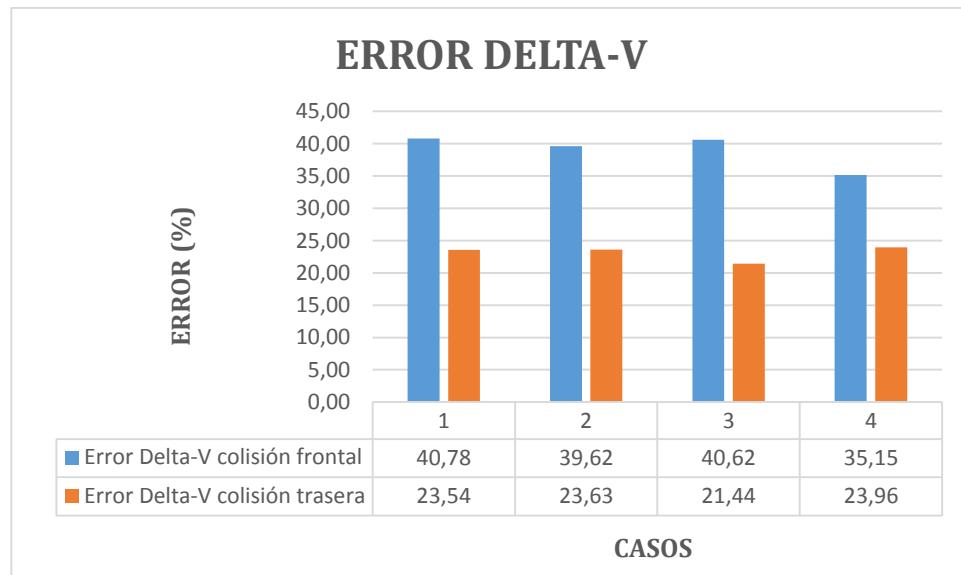


Figura 45. Error Delta-V

## 2.4. MARCO LEGAL VIGENTE

Han transcurrido ya más de veinte años desde la entrada en vigor en 1995 del Sistema de valoración de daños y perjuicios causados a las personas en accidentes de circulación, que figura actualmente como Anexo en el Texto Refundido de la Ley sobre responsabilidad civil y seguro en la circulación de vehículos a motor, aprobado por el Real Decreto Legislativo 8/2004, de 29 de octubre. Durante este tiempo, el conjunto de reformas que en el ámbito comunitario se han emprendido en relación con el seguro del automóvil, tendentes todas ellas a incrementar la protección a las víctimas mediante la garantía de una indemnización suficiente, justifican la conveniencia de revisar el sistema con el fin de introducir las modificaciones necesarias.

De esta necesidad surge la nueva Ley 35/2015, de 22 de septiembre, de reforma del sistema para la valoración de los daños y perjuicios causados a las personas en accidentes de circulación en vigor desde el pasado 1 de enero de 2016.

### 2.4.1. Lesiones por traumatismo cervical menor

Las lesiones producidas por el mecanismo del latigazo cervical están englobadas en la citada Ley dentro de lesiones por traumatismos menores de la columna cervical de acuerdo al artículo 135. Asimismo, dicho artículo establece que los traumatismos cervicales menores que se diagnostican con base a la manifestación del lesionado sobre la existencia de dolor, y que no son susceptibles de verificación mediante pruebas médicas complementarias, se indemnizan como lesiones temporales. Posteriormente la secuela que derive de un traumatismo cervical menor se indemniza sólo si un informe médico concluyente acredita su existencia tras el período de lesión temporal.

Precisamente en la necesidad de un informe médico concluyente reside la problemática, tal y como se ha mencionado en el apartado 1. *INTRODUCCIÓN* del presente documento, ya que se han producido una gran cantidad de casos de fraude a las compañías de seguro por parte de diversos sujetos ya que no existía una prueba diagnóstica capaz de establecer una credibilidad a la sintomatología del dolor manifestada por dicho sujeto una vez finalizado el período de lesión temporal.

Como respuesta a esta necesidad, Barema Valoración ha presentado este mes de Junio de 2016, la Algiografía, una prueba médica complementaria para verificar o descartar la existencia de traumatismos menores producidos en la columna cervical en un accidente de tráfico. Esta técnica ha sido desarrollada por el grupo de Investigación y Desarrollo en biomecánica de la Universidad de Zaragoza y ha contado con el apoyo del Instituto de Medicina Legal de Aragón y, sin duda, abre las puertas a poder demostrar la lesión suscitada por el afectado.

Dicha prueba de diagnóstico consiste en un estudio cinemático de la movilidad del raquis cervical en tres grados de libertad que sirve para determinar la limitación de la movilidad funcional de forma que el médico puede evaluar la normalidad del movimiento más allá de la manifestación del lesionado sobre la existencia de dolor.

Así, los datos del paciente que se somete a la Algiografía se capturan mediante sensores inerciales con el apoyo de la realidad virtual para guiar la secuencia de movimientos y lograr la inmersión total del accidentado en un escenario simulado. De este modo, el paciente realiza distintos movimientos de rotación y flexo-extensión con el cuello que son trasladados a un software mediante un sistema óptico y otro mecánico, generándose un avatar en 3D. Esta figura resultante replica los gestos del paciente con una fidelidad superior al 98% certificada por la Universidad de Comillas, lo que aporta información sobre grados y curvas de movilidad.

Tras la realización de la prueba se genera un informe en el que se plasma el grado de libertad de movimiento en cervicales, las curvas de movilidad de cada movimiento y las curvas de aceleración para valorar la consistencia del movimiento. La *Tabla 23* muestra las competencias que el Ingeniero y el profesional en Medicina poseen acerca de dicha prueba:

<b>El ingeniero emite un informe donde se reflejan:</b>	<b>Un médico determina los siguientes parámetros:</b>
Grados de movilidad de los 6 movimientos cervicales	Grados de movilidad cervical y los relaciona con tablas de normalidad estándar
Curvas de movilidad de cada movimiento	Coherencia de la prueba
Índices de coherencia y/o colaboración del paciente	Valora las alteraciones de la velocidad angular

*Tabla 23. Competencias Algiografía*

Finalmente, un médico experto en Valoración del Daño Corporal y en Biomecánica emite un informe concluyente de verificación del traumatismo cervical.

#### 2.4.2. Indemnizaciones por traumatismo cervical menor

Una vez emitido un informe concluyente sobre la valoración de la secuela, dicha lesión se indemnizará de acuerdo a las reglas de valoración de indemnizaciones de la Ley citada. En primer lugar, surge la necesidad de establecer un baremo médico que englobará y que emitirá una puntuación anatómico funcional de la secuela producida por la lesión de acuerdo a la tabla correspondiente a la Tabla 2.A.1 de la Ley. Dicha tabla se muestra en la *Tabla 24*:

codigo	DESCRIPCIÓN DE LAS SECUELAS	PUNTUACIÓN ANATÓMICO FUNCIONAL
<b>B) COLUMNAS VERTEBRALES</b>		
<b>1. Traumatismos menores de la columna vertebral</b>		
03005	Algias postraumáticas cronicadas y permanentes y/o síndrome cervical asociado y/o agravación de artrosis previa	1-5
	2.- Columna vertebral (no derivada de traumatismo menor)	
03006	Osteitis vertebral postraumática sin afectación medular	30-40
03007	Artrosis postraumática sin antecedentes previos	2-8
03008	Agravación artrosis previa	1-5
03009	Material de osteosíntesis en columna vertebral	5-15
	Fractura acuñamiento/aplastamiento (se considerará globalmente todo el segmento afectado de columna cervical, dorsal o lumbar)	
03010	• Menos de 50% de altura vertebral	2-10
03011	• Más de 50% de altura vertebral	11-15
03012	Cuadro clínico derivado de hernia/s discal/es correlacionable con el accidente. (Se considera globalmente todo el segmento afectado de columna cervical, dorsal o lumbar)	1-15
	Algias postraumáticas	
03013	• Sin compromiso radicular y/o síndrome cervical asociado	1-5
03014	• Con compromiso radicular (deberá objetivarse con EMG) con síndrome cervical asociado	6-10
03015	Limitación de la movilidad de la columna cervical derivada de patología ósea	5-15
	Limitación de la movilidad de la columna dorso-lumbar de origen mecánico	
03016	• Limitación únicamente el segmento dorsal	2-10
03017	• Limitación de ambos segmentos dorsal y lumbar	11-20
03018	Alteración de la estética vertebral postfractura (valorar según arco de curvatura y grados)	1-20

Tabla 24. Descripción de las secuelas

Tal y como puede extraerse de la tabla anterior, las secuelas por traumatismos menores de la columna cervical poseen una puntuación anatómico funcional comprendida entre 1-5. Una vez conocida dicha puntuación, de acuerdo a la Tabla 2.A.2 de la Ley se establece el baremo económico en concepto de indemnización al sujeto afectado. Dada la gran extensión de las tablas de la Ley en materia de compensación económica en función de la puntuación anatómico funcional y la edad del lesionado, la *Tabla 25* incluye a título ilustrativo las indemnizaciones para sujetos con edades múltiplos de diez.

PUNTOS	EDAD DEL LESIONADO (años)				
	10	20	30	40	50
1	875,00€	849,85€	818,3€	786,78 €	744,73 €
2	1803,99€	1752,14€	1.685,3€	1.618,50 €	1.529,39 €
3	2778,70€	2698,83€	2.593,46 €	2.488,08 €	2.347,50 €
4	3790,88€	3681,92€	3.535,10 €	3.388,28 €	3.192,41 €
5	4832,19€	4693,30€	4.502,63 €	4.311,95 €	4.057,62 €

PUNTOS	EDAD DEL LESIONADO (años)				
	60	70	80	90	≥100
1	694,97 €	656,24 €	636,26 €	616,29 €	596,31 €
2	1.427,09 €	1.346,79 €	1.301,70 €	1.256,61 €	1.211,52 €
3	2.190,30 €	2.066,61 €	1.993,04 €	1.919,47 €	1.845,90 €
4	2.978,46 €	2.808,07 €	2.699,34 €	2.590,61 €	2.481,88 €
5	3.785,50 €	3.567,44 €	3.421,21 €	3.274,98 €	3.128,75 €

Tabla 25. Indemnizaciones

### 3. CONCLUSIONES

Una vez desarrollado el presente Trabajo Fin de Grado, se proponen a continuación diversas conclusiones extraídas del mismo cuya finalidad reside en resumir los conceptos imprescindibles del Delta-V y de su relación con las lesiones cervicales.

- Con el fin de evitar errores en las investigaciones de accidentes, se debe analizar el término Delta-V desde una perspectiva rigurosa desde el ámbito de la dinámica de choque y de los principios biomecánicos.
- Un solo valor de Delta-V puede describir infinitos casos de accidentes y, por tanto, sin otros indicadores dinámicos tales como la aceleración, la distancia de frenado o la forma del impulso en la colisión, no se puede predecir la gravedad del mismo utilizando únicamente este parámetro.
- El especialista en reconstrucción de accidentes debe adquirir la información necesaria para determinar qué Delta-V ha sido efectivamente transmitido a los ocupantes del vehículo impactado. Dicho Delta-V reconstruido puede proporcionar evidencia convincente de que el accidente fue lo suficientemente grave como para haber sido la causa de las lesiones producidas en los ocupantes del vehículo. Sin embargo, para un Delta-V por debajo de los umbrales de daño, el reconstructor debe basarse en la biomecánica para proporcionar datos sobre las divergencias respecto a los valores umbral.
- Existen parámetros corporales como el tamaño, el peso, la condición física antes de una colisión, el sexo y la edad, que influyen notablemente en dichos umbrales de lesión. Incluso la orientación de la cabeza en el momento del accidente es importante ya que si la cabeza está girada hacia un lado en el momento del accidente será más probable la aparición de lesiones en el ocupante.
- En referencia a las investigaciones de diversos autores citadas en el presente documento, es aceptado por casi todos ellas que valores de  $G < 4$  o de  $\Delta V < 8 \text{ km/h}$  en colisiones por alcance a baja velocidad no desencadenarían lesión cervical en el ocupante. Se establece, por tanto, en estos valores los umbrales tolerables sin consecuencias a largo plazo sobre los mismos.

- En el desarrollo del presente documento se ha analizado el Delta-V en términos de aceleración del vehículo. Sin embargo, uno de los intereses desde la perspectiva de la accidentología es como se proyecta dicho Delta-V sobre el ocupante, es decir, poder estimar la aceleración dicho sujeto dentro del vehículo, tanto en su conjunto como en determinados segmentos corporales como la cabeza.
- Es en este punto en el que el Delta-V prescinde de la singularidad del lesionado, singularidad que obviamente no termina en el peso de su cabeza sino que como se ha expuesto, existen otros muchos factores que en esa individualidad hay que tener presentes. Es por ello que varios autores y la moderna literatura especializada han logrado como consenso general en la comunidad científica que no se puede predecir la probabilidad o la gravedad de una lesión calculando únicamente el Delta-V.
- Asimismo, pese a que el riesgo de síntomas iniciales del cuello se incrementa con el cambio de velocidad, se prioriza el valor de la aceleración de la cabeza del ocupante como parámetro más representativo en la predicción de consecuencias a largo plazo. (KRAFFT, 2000 y KULLGREN, 2000).
- De acuerdo a los diversos ejemplos expuestos en el texto que ilustran la problemática existente en la determinación del Delta-V se concluye que no es posible calcular rigurosamente el valor de este analizando únicamente los daños en un solo vehículo. Este hecho provoca la necesidad de realizar un análisis de deformaciones que determine dicho parámetro a través del análisis de ambos vehículos.
- La Ley 35/2015, en vigor desde el 1 de enero de 2016, establece la necesidad de un informe médico concluyente que acredite la existencia de una secuela como consecuencia de un traumatismo cervical menor tras el período de lesión temporal. Dicha lesión, que hasta la fecha no podía ser demostrada, puede evidenciarse gracias a la nueva prueba diagnóstica denominada Algiografía.

## 4. BIBLIOGRAFÍA

- ALBA, J.J., IGLESIAS, A., ARAGUÁS, J. (2001). *Accidentes de tráfico. Introducción al análisis de deformaciones.*
- ARREGUI, C., COMBALÍA, A., VELAZQUEZ, J., SANCHEZ, D., TEIJEIRA, R. (2012). *Biomecánica del latigazo cervical: conceptos cinemáticos y dinámicos.*
- AVERY, M., (2005). *Whiplash Research.*
- BAYDAL, J.M. (2012). *Cinemática del raquis cervical. Definición de patrones de movimiento para la valoración funcional en el síndrome del latigazo cervical.*
- CAILLIET, R. (1993). *Dolor cervical y del brazo.*
- EMORI, R., Horiguchi, J., *Whiplash in low speed vehicle collisions.* . SAE Paper 900542.
- FAKHRUDDIN, H. (2003). *Maximizing imparted speed in elastic collisions.*
- HENDERSON, B. (2012). *A retrospective study in understanding low speed change vehicle collisions occupant movement and likelihood of injury.*
- HERNANDO LORENZO, A., CALVO MENCHACA, M. (1999). *Biomecánica del accidente de tráfico.*
- HOWARD, R., HARDING, R., KRENICH, S., *The Biomechanics of "Whiplash" in low velocity collisions.* SAE Paper 1999-01-3235.
- HUSTED, D., BISS, D., HEVERLY, D., *The appropriate use of "Delta-V" in describing accident severity.* SAE Paper 1999-01-1295.
- JOUVENCEL, M.R. (2003). *Latigazo Cervical y Colisiones a baja velocidad.*
- KORNHAUSER, M. *Delta-V thresholds for cervical spine injury.* SAE Paper 960093.
- LLORET IBAÑEZ, J. (2015). *Colisiones a baja velocidad y lesiones del raquis cervical, nexo causal.*
- McCONNELL (1993). *Analysis of human test subject kinematic responses to low velocity rear end impacts.*
- MONOGRAPHIE SCIENTIFIQUE DU GROUPE DE TRAVAIL QUÉBÉCOISE SUR (1995). *Les Troubles associés a l'entorse cervicale (TAEC). Redefinir le whiplash et sa prise en charge.*
- ROBERTS, V.L., COMPTON, C.P. *The relationship between Delta V and injury.* SAE Paper 933111
- ROBINETTE, D., FAY, R., PAULSEN, R. *Delta-V: Basic concepts, computational methods, and misunderstandings.* SAE Paper 940915.
- SANTIAGO, S., MONTES, D. (2011). *Biomecánica en la valoración médica legal de las lesiones.*
- SHAH, N., MATTHEWS, S. (2014). *Low velocity whiplash injury.*
- SPINE RESEARCH INSTITUTE OF SAN DIEGO. *Another report fails to show a correlation between vehicle delta v and outcome in acute whiplash injuries.*
- TEMMING, J., *Human factors data in relation to whiplash injuries in rear end collisions of passenger cars.* SAE Paper 981191.