

Estudio piloto sobre el impacto de las características antropométricas en el riesgo de lesión durante frenados de emergencia

Silvia Santos-Cuadros¹, Sergio Fuentes del Toro², María Elisa Aragón-Basanta³,
William Ricardo Venegas Toro⁴, Carolina Álvarez Caldas⁵, Alejandro Quesada González⁶

^{1, 2, 5, 6} Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, ¹ssantos@ing.uc3m.es,
²sfuentes@ing.uc3m.es, ⁵calvarez@ing.uc3m.es, ⁶alejandro@ing.uc3m.es

³ Instituto Universitario de Ingeniería mecánica y biomecánica, Universitat Politècnica de València, mearba@doctor.upv.es

⁴ Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional de Quito (Ecuador), william.venegas@epn.edu.ec

Las lesiones cervicales por accidentes sin impacto representan un creciente problema de salud, especialmente con la adopción de frenado automático y vehículos autónomos. La columna cervical es vulnerable a la deceleración brusca, donde la diferencia de inercia entre la cabeza y el torso genera un efecto latigazo que provoca daños musculoesqueléticos. Aunque existen estudios biomecánicos del comportamiento cervical utilizando modelos físicos y computacionales, la falta de biofidelidad limita su precisión, y los ensayos con voluntarios son escasos y no representan la diversidad poblacional. La mayoría se centra en el modelo masculino promedio, dejando una brecha significativa en la comprensión del riesgo no sólo para las mujeres sino también para otros subgrupos masculinos.

El cinturón de seguridad desempeña un papel crucial en la dinámica del movimiento cabeza-torso, pero algunos estudios sugieren que podría incrementar el riesgo de lesiones cervicales a baja velocidad. La falta de investigaciones con voluntarios sin sistema de retención añade incertidumbre sobre su eficacia en este escenario, especialmente en transporte público (tren, metro o autobús), donde es común viajar sin sujeción. Estos hallazgos podrían ser relevantes para el diseño de vehículos autónomos que podrían prescindir de cinturones a baja velocidad.

En respuesta a estas limitaciones, se propone un protocolo experimental con voluntarios de ambos sexos y diversas características antropométricas, evaluando situaciones con y sin cinturón. El objetivo es ampliar el conocimiento sobre seguridad vial, considerando variables como edad, género, peso y perímetro corporal, que influyen en la eficacia del cinturón. Las pruebas incluirán ensayos experimentales de baja deceleración y simulaciones a alta deceleración, así como estudios sobre la conciencia del pasajero frente al relajamiento en el instante de frenado.

El análisis cinemático se realizará mediante marcadores, videoanálisis y sensores inerciales y de electromiografía para evaluar el movimiento y las fuerzas en distintas regiones anatómicas. Esto permitirá identificar patrones de lesión diferenciados por género, proporcionando criterios más precisos para mejorar la seguridad vial en futuros desarrollos tecnológicos y medios de transporte actuales.

Esta publicación es parte de la ayuda PID2023-152278NA-I00, financiado/a por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE

1. Introducción

Las lesiones cervicales resultantes de accidentes sin colisión representan un problema de salud significativo. Se anticipa que la prevalencia de estos trastornos musculoesqueléticos aumente debido a la adopción generalizada de sistemas de frenado automático en los vehículos y la aparición de vehículos autónomos. La columna cervical se destaca como una de las regiones más vulnerables a los cambios bruscos de velocidad. En situaciones de frenado de emergencia, la cabeza y el torso exhiben una inercia diferente, lo que lleva a un movimiento retrasado entre ellos. Esta discrepancia se manifiesta como un efecto de latigazo en el cuello, lo que provoca que algunas vértebras se flexionen mientras que otras se hiperextiendan, lo que constituye el principal mecanismo de las lesiones cervicales. Junto con el comportamiento de las vértebras, el papel de los músculos juega un papel crucial en las lesiones cervicales, particularmente en incidentes de baja velocidad. Las lesiones cervicales plantean un importante problema de salud pública con importantes costos sociales y económicos asociados [1,2]. La literatura existente incluye numerosos estudios biomecánicos [3,4] dedicados a evaluar el comportamiento cervical. Sin embargo, muchos de estos estudios utilizan animales [5–8], dispositivos de prueba antropomórficos (ATD) [9,10], sustitutos humanos post mortem (PMHS) [11,12], especímenes cervicales aislados [8,12,13] o de cabeza y cuello, y modelos humanos computacionales [14]. Una debilidad común entre estos modelos biomecánicos es su baja biofidelidad, su grado de similitud con el comportamiento real de los seres humanos. Por ejemplo, los ATD se construyen con materiales más rígidos que los órganos y tejidos humanos. Los PMHS pueden replicar el comportamiento esquelético, pero carecen de tensión muscular, lo que los hace poco representativos cuando se centran en las respuestas musculares. Si bien existen modelos computacionales sofisticados de cabeza y cuello [15,16] y determinan con éxito las respuestas de la cabeza [17], no logran replicar con precisión la respuesta humana general, particularmente en la interacción entre la cabeza y el cuello [18]. La alta biofidelidad puede lograrse con la participación de voluntarios en las pruebas. Sin embargo, los estudios realizados hasta la fecha con voluntarios sometidos a frenado generalmente incluyen una muestra muy baja de sujetos y no son representativos de la población.

La investigación ha profundizado en dominios específicos destinados a adaptar las medidas de seguridad vial para dar cabida a las diferencias de género y edad. Sorprendentemente, las mujeres enfrentan un riesgo 47% mayor de sufrir lesiones graves en accidentes automovilísticos en comparación con los hombres, con un riesgo cinco veces mayor de sufrir latigazo cervical [19]. A pesar de estas estadísticas alarmantes, muchos modelos biomecánicos empleados en entornos de laboratorio pasan por alto las cruciales distinciones antropométricas entre mujeres y hombres. En consecuencia, las colisiones simuladas predicen inadecuadamente las lesiones en mujeres. El sesgo prevaleciente hacia los ocupantes masculinos en la eficacia de los dispositivos de seguridad para ocupantes subraya la necesidad de un enfoque más inclusivo para mejorar la seguridad vial en general. Además, la gran mayoría del trabajo publicado sobre este tema, realizado con ATD o modelos humanos computacionales, generalmente utiliza el modelo Hybrid III del percentil 50, que refleja solo el género masculino y con características de un hombre estadounidense promedio. Por lo tanto, existe una falta latente de información sobre el comportamiento del género femenino durante el frenado, además de la inclusión de una muestra más representativa del género masculino, ya que las diferentes características antropométricas pueden implicar un riesgo diferente de lesión, incluso dentro del mismo género.

Por otro lado, han surgido informes divergentes sobre las distinciones relacionadas con el género y la conciencia en la respuesta muscular cervical de varios estudios [20], con puntos de vista contrastantes presentados por otros autores [21]. La naturaleza conflictiva de estos hallazgos introduce incertidumbre con respecto a la necesidad de controlar la conciencia del momento de la perturbación.

Por lo tanto, este estudio se centra en cubrir la actual falta de conocimiento sobre el comportamiento cinemático y muscular de un pasajero durante el frenado con voluntarios masculinos y femeninos, cubriendo un rango representativo de diferentes valores de características antropométricas. Además, se ha detectado que prácticamente no se han realizado pruebas con voluntarios sin sistemas de retención. Es crucial reconocer que los cinturones de seguridad innegablemente salvan vidas a altas velocidades. Sin embargo, varios estudios indican un mayor riesgo de lesiones en el cuello a bajas velocidades con este sistema de retención [22]. En particular, la referencia a baja velocidad está estrechamente ligada a la baja deceleración, ya que el cambio esperado en la velocidad durante el frenado de emergencia a velocidades más bajas es menos pronunciado que a altas velocidades. Por esta razón, este estudio se propone caracterizar no solo el escenario con sistemas de retención, sino también llevar a cabo pruebas donde no se utiliza el cinturón, lo que implica un movimiento relativo diferente entre las diferentes regiones anatómicas. Esta información podría ser de aplicación en el diseño de futuros vehículos autónomos que contemplen la posibilidad de no utilizar un sistema de retención cuando se viaja a baja velocidad. En cualquier caso, su aplicación ya sería útil en la seguridad de la movilidad pública actual, donde es común viajar sin sujeción (tren, autobús, metro, etc.). Finalmente, cabe destacar que algunos estudios [23] sugieren que un impacto no es un requisito previo para sufrir una lesión en el cuello. El frenado repentino por sí solo podría representar un riesgo potencial de daño cervical. De ahí la gran importancia de estudios como este, que podrían ayudar a caracterizar la seguridad vial en términos de frenado. Específicamente, este estudio busca abordar la falta de estudios específicos

de género en el campo de los sistemas de retención y las mujeres. La novedad radica en su enfoque en llenar este vacío de conocimiento y su potencial para contribuir al desarrollo de sistemas de retención más inclusivos y efectivos.

2. Metodología

2.1. Participantes

- **Criterios de inclusión**

Los criterios de inclusión para este estudio piloto se centrarán en reclutar voluntarios que representen la diversidad de la población española en términos de características antropométricas y demográficas. Específicamente, se buscará incluir participantes de ambos sexos, con un rango de edad amplio (aproximadamente entre 18 y 65 años) y diferentes complejiones físicas. Se prestará especial atención a la inclusión de mujeres, ya que existe una falta de datos sobre su respuesta a frenadas de emergencia. Además, se considerarán variables como la altura, el peso, el perímetro del cuello, el perímetro del pecho, el perímetro de la cadera y la longitud del cuello, entre otras. Estos criterios de inclusión son un borrador previo y se definirán con mayor detalle en el momento en que se disponga de información relativa a la distribución de dichas variables en la población española. Esto permitirá asegurar que la muestra del estudio sea lo más representativa posible y que los resultados puedan ser extrapolables a la población general.

- **Reclutamiento**

El reclutamiento de los participantes se ha llevado a cabo a través de diversas estrategias de difusión. Se utilizaron medios digitales como el correo electrónico, redes sociales creadas para el estudio, medios de radio, vídeos de youtube, web de la universidad, carteles de difusión del proyecto, entre otros, con el fin de alcanzar un público amplio y diverso.

En el caso de que alguien esté interesado en participar, se le proporcionará información detallada de forma oral y escrita sobre los objetivos del estudio, los riesgos potenciales y los beneficios que podría obtener al participar. Se explicará en qué consistirán las pruebas, la duración de las sesiones y el tipo de datos que se recogerán.

- **Consideraciones éticas**

Este estudio se llevará a cabo con rigurosos principios éticos, habiendo sido aprobado por el Comité de Ética de la Universidad Carlos III de Madrid.

Antes de comenzar la participación, cada voluntario recibirá un ID único para pseudonimizar toda la información que se recolecte. Esto garantizará la confidencialidad y el anonimato de los datos de los participantes, protegiendo su privacidad. Se obtendrá el consentimiento informado por escrito de todos los participantes. Se les explicará detalladamente los objetivos del estudio, los procedimientos que se llevarán a cabo, los posibles riesgos y beneficios, y su derecho a abandonar el estudio en cualquier momento sin penalización.

El estudio se encuentra en proceso de aprobación por parte del comité de ética de la Universidad Carlos III de Madrid, que está revisando el protocolo y verificando que se cumplen todas las normas éticas y de investigación.

La investigación se realizará de acuerdo con la Declaración de Helsinki, que establece los principios éticos para la investigación con seres humanos [1].

- **Preparación previa al estudio**

Unos días antes de la participación, los voluntarios recibirán información escrita sobre el consentimiento informado y una serie de recomendaciones para prepararse para el estudio que garanticen la seguridad y comodidad de los participantes durante el estudio, así como la precisión de los datos recopilados:

- **Descanso adecuado:** Se recomienda que los participantes descansen bien la noche anterior al estudio y eviten el consumo de alcohol o sustancias estimulantes que puedan alterar su estado físico o mental.
- **Ropa cómoda:** Los participantes deben vestir ropa de color preferiblemente negro y ajustada que evite en la medida de lo posible el movimiento relativo de determinados sensores, y dejen al descubierto determinadas zonas clave de colocación de sensores. Se recomienda evitar el uso de joyas u otros objetos que puedan interferir con los sensores o marcadores utilizados en el estudio.
- **Información relevante:** Es importante que los participantes informen a los investigadores sobre cualquier condición médica preexistente, lesión o discapacidad que puedan tener, así como cualquier alteración que pueda poner en riesgo la participación de los voluntarios.
- **Comprensión del estudio:** Los participantes deben comprender completamente el propósito del estudio, los procedimientos que se llevarán a cabo y los posibles riesgos o molestias asociadas. Se les debe dar la

oportunidad de hacer preguntas y expresar cualquier preocupación que puedan tener antes de dar su consentimiento para participar.

- **Preparación mental:** Se recomienda que los participantes lleguen al estudio con una actitud relajada y positiva. Los investigadores pueden proporcionarles información sobre qué esperar durante las pruebas y cómo pueden prepararse mentalmente para ellas.

Siguiendo estas recomendaciones, se puede garantizar que los participantes estén en las mejores condiciones posibles para realizar las pruebas y que los datos recopilados sean lo más precisos y confiables posible.

3. Diseño experimental

El estudio se ha diseñado en 7 pasos, más uno previo, que todos los voluntarios deben de completar para finalizar el estudio. A continuación, se explica cada uno de ellos de forma independiente:

3.1. Paso 0: información previa a los voluntarios

Antes de que los voluntarios vengan a las instalaciones para realizar los ensayos, se les enviará toda la información que posteriormente se les entregará de forma presencial. Dentro de esta información encontrarán el consentimiento de participación, la protección de datos y los informes del comité de ética. Además, se les enviará unas instrucciones para la prueba. Entre ellas se les indicará que ese día no se echen cremas y traigan ropa adecuada.

Se les proporcionará un documento con información detallada sobre el estudio, incluyendo sus objetivos, procedimientos, posibles riesgos y beneficios. También se les informará sobre sus derechos como participantes y cómo se protegerán sus datos personales. Se les pedirá que lean detenidamente la información y que firmen un formulario de consentimiento informado si deciden participar.

3.2. Paso 1: Explicación del experimento

Cuando los voluntarios lleguen al laboratorio, se les procederá a explicar el experimento. Los diferentes pasos de los que se compone, cómo serán las pruebas que se realizan y los riesgos que pueda suponer. También se les remarcará que no están obligados a permanecer en la prueba hasta que esta finalice y que pueden abandonar en el momento que ellos consideren oportuno. Se les explicará en detalle cómo se desarrollará el experimento, incluyendo las diferentes fases, la duración de cada una de ellas y las tareas que deberán realizar. Se les mostrará el equipo que se utilizará y se les dará la oportunidad de hacer preguntas y aclarar cualquier duda que puedan tener. También se les avisa de que deben comunicar de inmediato cualquier malestar que puedan experimentar durante las pruebas.

3.3. Paso 2: protección de datos y comité de ética

El estudio se encuentra actualmente en proceso de aprobación tanto de la protección de datos como del comité de ética. A cada uno de los voluntarios se les dará a leer y firmar tanto la documentación correspondiente a la protección de datos como todo lo relativo al comité de ética, de tal forma que sean conscientes de los riesgos que puede suponer participar en el estudio. Antes de proceder al siguiente paso, los voluntarios podrán preguntar todo lo que deseen sobre el estudio, riesgos o cualquier cosa que les surja. Tras responder a todo, y siempre y cuando el voluntario lo desee, se podrá continuar con el siguiente paso. Se les explicará cómo se protegerán sus datos personales durante y después del estudio. Se les informará sobre las medidas de seguridad que se implementarán para garantizar la confidencialidad de su información. Se les asegurará que sus datos solo se utilizarán para fines de investigación y que no se compartirán con terceros sin su consentimiento.

3.4. Paso 3: toma de datos básicos

En este paso, se proporcionará a los voluntarios un cuestionario para completar en el que tendrán que introducir algunos de sus datos como el año de nacimiento, género y hábitos. Adicionalmente el equipo investigador procederá a la toma de las variables antropométricas como:

- **Altura:** La altura se medirá utilizando un estadiómetro. Es un dato fundamental para calcular el Índice de Masa Corporal (IMC) y otros índices que relacionan la masa corporal con la estatura.
- **Peso:** El peso se medirá utilizando una báscula. Al igual que la altura, es esencial para el cálculo del IMC y otros índices. Además, el peso total del cuerpo es un factor importante para calcular la inercia durante la frenada.
- **Perímetro del cuello:** Se medirá con una cinta métrica flexible. Esta medida es relevante porque la región del cuello es especialmente vulnerable a lesiones en movimientos bruscos. El perímetro del cuello puede influir en la respuesta biomecánica de esta zona durante la frenada, además se trata de una variable relacionada estrechamente con el género.

- **Perímetro del pecho:** Se medirá a la altura de las axilas, con los brazos relajados a los lados. Esta medida es útil para estimar la masa y la distribución de masa en la parte superior del cuerpo, lo cual es importante para entender cómo se desplaza el cuerpo durante la frenada. Se trata de una variable estrechamente relacionada con el género, que puede aportar resultados relevantes en la respuesta al frenado según el sexo del pasajero. Es un parámetro clave en la interacción con el cinturón.
- **Perímetro de la cintura:** Se medirá a la altura del ombligo. Esta medida es útil para calcular la relación cintura-cadera, un indicador de riesgo cardiovascular. Además, al igual que el perímetro del pecho, puede ayudar a refinar la estimación de la masa y distribución de masa corporal.
- **Perímetro de la cadera:** Se medirá a la altura de los glúteos, en su punto más prominente. Esta medida, junto con el perímetro de la cintura, permite calcular la relación cintura-cadera. Se trata de una variable estrechamente relacionada con el género, que puede aportar resultados relevantes en la respuesta al frenado según el sexo del pasajero. Es un parámetro clave en la interacción con el cinturón.
- **Longitud del cuello:** Se medirá desde la base del cráneo hasta la parte superior del esternón. Esta medida es relevante para determinar la longitud de la columna cervical, lo cual puede influir en su vulnerabilidad a lesiones.
- **Longitud del torso:** Se medirá desde la parte superior del esternón hasta la cresta ilíaca. Esta medida, junto con la longitud del cuello, permite estimar la longitud total del tronco, lo cual es importante para entender cómo se mueve el cuerpo durante la frenada.
- **Longitud del cuello, brazos y piernas:** Estas medidas influyen en la inercia y el momento de fuerza de las extremidades y el cuello durante el frenado. Estas variables pueden afectar la magnitud y dirección de las fuerzas que actúan sobre la columna cervical.
- **Anchura de los hombros y la pelvis:** Estas medidas son importantes para determinar la posición y alineación del cuerpo en el asiento. La forma en que el cuerpo se apoya en el asiento puede influir en la respuesta a la deceleración y la efectividad del cinturón de seguridad.

Estas mediciones se realizarán utilizando un antropómetro y una cinta métrica siguiendo los protocolos estandarizados. Los datos recopilados se utilizarán para analizar la relación entre las características antropométricas y el riesgo de lesión durante el frenado.

La inclusión de estas variables antropométricas permitirá un análisis más completo y preciso del riesgo de lesión durante frenados de emergencia, considerando la variabilidad individual en la morfología de los participantes.

3.5. Paso 4: preparación de los voluntarios

Antes de comenzar con cada una de las pruebas, cada uno de los voluntarios debe ser instrumentado. Para ello se han elegido diferentes tecnologías que se explicarán a continuación:

- **Actividad muscular:** se empleará un sistema de electromiografía de superficie, un sistema no invasivo para la medición de la actividad muscular a lo largo de la frenada. Se utilizarán 12 sensores EMG en total, 6 en el lado derecho del cuerpo y 6 en el lado izquierdo, para medir la actividad de los siguientes músculos:
 - **Esternocleidomastoideo:** Este músculo es uno de los principales responsables de la flexión y rotación del cuello. Su actividad es relevante para entender cómo se protege el cuello durante la frenada.
 - **Escaleno:** Estos músculos se encuentran en la parte lateral del cuello y contribuyen a la flexión lateral y la estabilización del cuello. Su actividad es importante para evaluar cómo se tensan estos músculos para resistir las fuerzas generadas durante la frenada.
 - **Trapezio superior:** Este músculo se extiende desde la base del cráneo hasta la parte media de la espalda y es responsable de la elevación y rotación de la escápula, así como de la extensión del cuello. Su actividad es relevante para entender cómo se prepara la parte superior del cuerpo para resistir la deceleración.
 - **Deltoides:** Músculo que cubre la articulación del hombro. Sus fibras anteriores participan en la flexión y rotación interna del brazo, las fibras medias en la abducción y las fibras posteriores en la extensión y rotación externa.
 - **Pectoral mayor:** Este músculo es uno de los principales responsables de la aducción y rotación interna del hombro, así como de la flexión del hombro. Su actividad es relevante para entender cómo se protege el pecho durante la frenada.
 - **Recto abdominal:** Este músculo se extiende desde el pubis hasta el esternón y es responsable de la flexión del tronco. Su actividad es importante para evaluar cómo se tensa el abdomen para resistir las fuerzas generadas durante la frenada.

La selección de estos músculos se basa en su relevancia para la biomecánica de la columna cervical y del tronco durante movimientos bruscos. La medición de su actividad permitirá entender cómo responden estos músculos a la frenada y cómo contribuyen a la protección del cuerpo [24, 25].

- **Sistema de sensores inerciales:** para la captura del movimiento se ha decantado por un sistema de sensores inerciales que irán instalados en las diferentes posiciones anatómicas del cuerpo en base a las necesidades de cada uno de los voluntarios. El sistema acaba de ser adquirido y el equipo investigador está cerrando la posición de los sensores con la compañía para obtener resultados relevantes del estudio. No obstante, estos sensores registrarán el movimiento de la cabeza, zonas cervical, dorsal y lumbar de la columna, junto con la rotación de la pelvis.
- **IMU y célula de carga:** Se instalará una IMU en el cinturón de seguridad de cada voluntario. Este dispositivo, que combina acelerómetros y giroscopios, permitirá medir con precisión las aceleraciones lineales y la velocidad angular a las que está sometido el cinturón durante la frenada. Asimismo, el cinturón será instrumentado con una célula de carga para registrar la tensión del cinturón en cada caso. Esta información es crucial por varias razones:
 - **Análisis de la dinámica del cinturón:** La IMU registrará cómo se mueve y deforma el cinturón durante la frenada, lo cual es fundamental para entender cómo interactúa con el cuerpo del voluntario y cómo distribuye las fuerzas.
 - **Detección de diferencias individuales:** Cada voluntario experimentará la frenada de manera diferente, y la IMU permitirá cuantificar estas diferencias en términos de aceleraciones y movimientos del cinturón. Esto puede ser útil para identificar factores de riesgo individuales y personalizar las recomendaciones de seguridad.
 - **Validación de modelos biomecánicos:** Los datos de la IMU pueden ser utilizados para validar y ajustar modelos biomecánicos que simulan el comportamiento del cuerpo humano durante una frenada. Esto puede mejorar la precisión de estos modelos y su capacidad para predecir el riesgo de lesiones.

3.6. Paso 4: ensayos de frenada.

Los ensayos de la frenada se llevarán a cabo en un entorno controlado. Los voluntarios se sentarán en el asiento del copiloto y se les pedirá que mantengan la postura que comúnmente adoptarían en caso de viaje, y que se coloquen el cinturón como lo harían habitualmente, sin aportar indicaciones sobre la correcta colocación del cinturón.

Los ensayos de frenada se han dividido en cuatro bloques por los que todos los voluntarios han de pasar. Se puede ver una descripción del número de frenados de cada bloque (si lleva o no cinturón durante el frenado o del estado de atención) en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Bloques de frenada para los ensayos con voluntarios.

Bloque	Nº Frenado	¿Lleva cinturón?	Estado
A	1	Sí	Relax
	2		
B	1	No	Alerta
	2		
C	1	Sí	Relax
	2		
D	1	No	Alerta
	2		

Es importante destacar que:

- **Orden aleatorio:** El orden de presentación de los bloques se determinará de forma aleatoria para cada voluntario. Esto ayudará a controlar el efecto del orden de los ensayos en los resultados.
- **Dos frenadas por bloque:** Cada bloque consta de dos frenadas. Esto permitirá evaluar si la experiencia de una frenada previa influye en la respuesta del voluntario en la siguiente frenada.
- **Condiciones de uso del cinturón:** Se evaluarán dos condiciones: con cinturón de seguridad y sin cinturón de seguridad. Esto permitirá analizar el impacto del cinturón en la dinámica del movimiento cabeza-torso durante la frenada.
- **Estado de alerta:** Se evaluarán dos estados de alerta: relajado (el voluntario no sabe cuándo se producirá la frenada) y alerta (el voluntario es avisado unos segundos antes de la frenada). Esto permitirá analizar cómo influye la anticipación en la respuesta del voluntario.

La decisión de utilizar o no el cinturón de seguridad está intrínsecamente ligada a la evolución de los sistemas de transporte, como la conducción autónoma y los viajes interurbanos. En el contexto de los vehículos autónomos,

por ejemplo, se plantea la posibilidad de prescindir del cinturón de seguridad en ciertas situaciones, especialmente a bajas velocidades. De manera similar, en el transporte interurbano (autobuses, trenes, etc.) es común que los pasajeros no utilicen cinturón de seguridad.

Por lo tanto, este estudio con voluntarios, que incluye escenarios con y sin cinturón de seguridad, permitirá evaluar el impacto de este dispositivo en la dinámica del movimiento cabeza-torso durante un frenado de emergencia. Esta evaluación es fundamental para comprender cómo el cinturón de seguridad afecta el riesgo de lesiones cervicales en diferentes situaciones y determinar si su uso, o la ausencia del mismo, puede aumentar o disminuir dicho riesgo. Los resultados de este estudio podrían ser cruciales para el diseño de futuros vehículos y sistemas de seguridad que se adapten a las necesidades específicas de cada situación, incluyendo la posibilidad de viajar sin cinturón en ciertos contextos.

Para asegurar la consistencia y la seguridad en las pruebas, cada frenada seguirá un perfil de velocidad y aceleración predefinido. Este perfil se compone de tres fases (Figura 1.):

- **Aceleración:** El vehículo comenzará en reposo y acelerará suavemente hasta alcanzar una velocidad de 20 km/h.
- **Velocidad constante:** Una vez alcanzada la velocidad de 20 km/h, el vehículo la mantendrá constante durante un periodo de entre 5 y 10 segundos. Este periodo de velocidad constante permite que los voluntarios se estabilicen y adopten una postura natural antes de la frenada.
- **Frenada:** Finalmente, se aplicará una deceleración constante de -4 m/s^2 hasta que el vehículo se detenga por completo.

Este perfil de frenada se ha diseñado para simular una situación de frenado de emergencia realista, pero a una velocidad moderada para minimizar el riesgo de lesiones para los voluntarios.

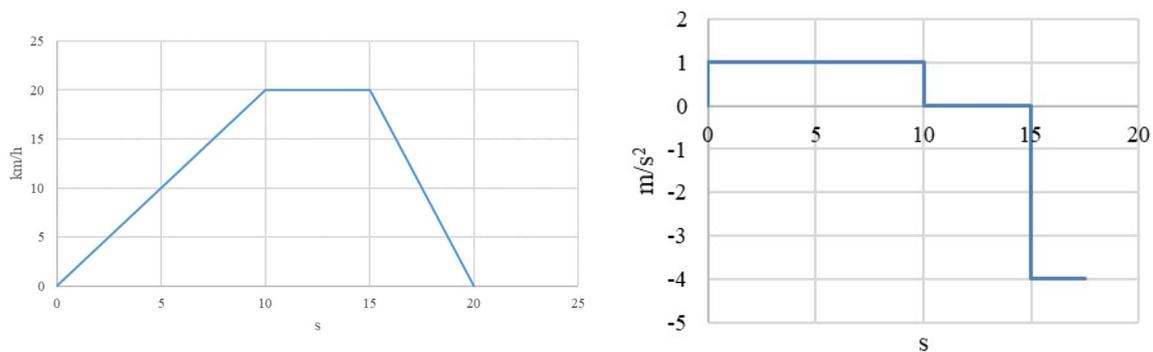


Figura 1. Perfil de velocidades en un ensayo.

Aunque el perfil general de la frenada se mantiene constante, la duración de cada fase (aceleración, velocidad constante y frenada) puede variar ligeramente entre los diferentes bloques de ensayos. Esta variabilidad se introduce para evitar que los voluntarios anticipen el momento exacto de la frenada y para evaluar su respuesta en diferentes condiciones.

Para evitar la fatiga y asegurar el confort de los voluntarios, se les dará un descanso de 5 minutos entre cada bloque de ensayos. Esto les permitirá recuperarse y prepararse para el siguiente bloque.

A modo de ejemplo, uno de los ensayos podría ser tal que:

Bloque	Nº Frenado	¿Lleva cinturón?	Estado
B	1	No	Alerta
	2		
Descanso 5 minutos			
D	1	No	Alerta
	2		
Descanso 5 minutos			
A	1	Sí	Relax
	2		
Descanso 5 minutos			
C	1	Sí	Relax

3.7. Paso 5: finalización del ensayo.

Tras finalizar las frenadas se comprobará que el voluntario se encuentra bien. Tras ello se procederá a quitarle toda la instrumentación. Se les retirarán los sensores y se les agradecerá su participación en el estudio. Se les recordará que pueden ponerse en contacto con el equipo investigador si tienen alguna pregunta o inquietud después del estudio.

3.8. Paso 6: test post-ensayo.

Se les proporcionará un test post-ensayo para que los voluntarios contesten. La finalidad del mismo es comprobar su estado actual y recopilación de información sobre las sensaciones a lo largo del mismo. Se les pedirá que completen un cuestionario para evaluar su estado físico y emocional después del ensayo. Se les preguntará sobre cualquier molestia o dolor que puedan experimentar. También se les pedirá que proporcionen información sobre sus sensaciones y percepciones durante el frenado.

3.9. Paso 6: test 24 horas posterior al ensayo.

24 horas después del ensayo, cada uno de los voluntarios recibirá un segundo test para comprobar si han sufrido algún tipo de lesión o no a lo largo del estudio. Se les enviará un cuestionario por correo electrónico o teléfono para hacer un seguimiento de su estado de salud 24 horas después del ensayo. Se les preguntará si han experimentado algún síntoma o lesión como resultado del experimento. Se les recordará que pueden ponerse en contacto con el equipo investigador si tienen alguna pregunta o inquietud.

4. Conclusiones

Este estudio se encuentra actualmente en fase de desarrollo inicial, con el reclutamiento de voluntarios y con las primeras pruebas de ensayo de frenada para definir el experimento final. Por ello, no es posible establecer conclusiones relevantes a fecha de hoy, y se ha dedicado este documento a establecer el protocolo de ensayo así como lograr difusión del proyecto con el fin de conseguir una amplia diversidad antropométrica de voluntarios.

5. Agradecimientos

Esta publicación es parte de la ayuda PID2023-152278NA-I00, financiado/a por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE

6. Bibliografía

1. Briggs, A. M. et al. Reducing the global burden of musculoskeletal conditions. *Bulletin of the World Health Organization* vol. 96 366–368 at <https://doi.org/10.2471/BLT.17.204891> (2018).
2. NHTSA. A compilation of motor vehicle crash data from the fatality analysis reporting system and the general estimates system. *Natl. Highw. Traffic Saf. Adm. DOT HS DOT HS 810, 205* (2005).
3. Kumar, S., Ferrari, R. & Narayan, Y. Kinematic and electromyographic response to whiplash loading in low-velocity whiplash impacts - A review. *Clin. Biomech.* 20, 343–356 (2005).
4. SEVERY, D. M., MATHEWSON, J. H. & BECHTOL, C. O. Controlled automobile rear-end collisions, an investigation of related engineering and medical phenomena. *Can. Serv. Med. J.* 11, 727–59 (1955).
5. Gosch, H. H., Gooding, E. & Schneider, R. C. An experimental study of cervical spine and cord injuries. *J. Trauma - Inj. Infect. Crit. Care* 12, 570–576 (1972).
6. LIU, Y. K., CHANDRAN, K. B., HEATH, R. G. & UNTERHARNSCHEIDT, F. Subcortical EEG Changes in Rhesus Monkeys Following Experimental Hyperextension-Hyperflexion (Whiplash). *Spine (Phila. Pa. 1976)*. 9, 329–338 (1984).
7. Domer, F. R., Liu, Y. K., Chandran, K. B. & Krieger, K. W. Effect of hyperextension-hyperflexion (whiplash) on the function of the blood-brain barrier of rhesus monkeys. *Exp. Neurol.* 63, 304–310 (1979).
8. Jr., A. S. et al. Experimental Studies of Brain and Neck Injury. *SAE Transactions* vol. 90 3378–3400 at <https://doi.org/10.2307/44724970> (1981).
9. ROBERTS, A. K. et al. Kinematics of the human spine and the biofidelity of current dummies. (2002).

10. Muzzy, W. H. & Lustick, L. Comparison of Kinematic Parameters Between Hybrid II Head and Neck System with Human Volunteers for -Gx Acceleration Profiles. in SAE Technical Papers (SAE International, 1976). doi:10.4271/760801.
11. Kallieris, D. & Schmidt, G. Neck response and injury assessment using cadavers and the Us-SID for far-side lateral impacts of rear seat occupants with inboard-anchored shoulder belts. in SAE Technical Papers (SAE International, 1990). doi:10.4271/902313.
12. McIntosh, A. S., Kallieris, D. & Frechede, B. Neck injury tolerance under inertial loads in side impacts. *Accid. Anal. Prev.* 39, 326–333 (2007).
13. Trajkovski, A., Hribernik, M., Kunc, R., Kranjec, M. & Krašna, S. Analysis of the mechanical response of damaged human cervical spine ligaments. *Clin. Biomech.* 75, 105012 (2020).
14. Stemper, B. D. & Corner, B. D. Whiplash-associated disorders: Occupant kinematics and neck morphology. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* vol. 46 834–844 at <https://doi.org/10.2519/jospt.2016.6846> (2016).
15. Kuo, C., Fanton, M., Wu, L. & Camarillo, D. Spinal constraint modulates head instantaneous center of rotation and dictates head angular motion. *J. Biomech.* 76, 220–228 (2018).
16. Alvarez, V. S., Halldin, P. & Kleiven, S. The Influence of Neck Muscle Tonus and Posture on Brain Tissue Strain in Pedestrian Head Impacts. *Stapp Car Crash J.* 58, 63–101 (2014).
17. Vavalle, N. A., Davis, M. L., Stitzel, J. D. & Gayzik, F. S. Quantitative Validation of a Human Body Finite Element Model Using Rigid Body Impacts. *Ann. Biomed. Eng.* 43, 2163–2174 (2015).
18. Wen, J., Raison, M. & Achiche, S. Using a cost function based on kinematics and electromyographic data to quantify muscle forces. *J. Biomech.* 80, 151–158 (2018).
19. Bose, D., Segui-Gomez, ScD, M. & Crandall, J. R. Vulnerability of Female Drivers Involved in Motor Vehicle Crashes: An Analysis of US Population at Risk. *Am. J. Public Health* 101, 2368–2373 (2011).
20. Kumar, S., Narayan, Y. & Amell, T. Role of awareness in head-neck acceleration in low velocity rear-end impacts. *Accid. Anal. Prev.* 32, 233–241 (2000).
21. Kumar, S., Narayan, Y. & Amell, T. An Electromyographic Study of Low-Velocity Rear-End Impacts. *Spine (Phila. Pa. 1976)*. 27, 1044–1055 (2002).
22. Kumar, S., Ferrari, R., Narayan, Y. & Jones, T. The effect of seat belt use on the cervical electromyogram response to whiplash-type impacts. *J. Manipulative Physiol. Ther.* 29, 115–125 (2006).
23. Santos-Cuadros S, Fuentes del Toro S, Olmeda E, San Román JL. Surface Electromyography Study Using a Low-Cost System: Are There Neck Muscles Differences When the Passenger Is Warned during an Emergency Braking Inside an Autonomous Vehicle? *Sensors*. 2021; 21(16):5378. <https://doi.org/10.3390/s21165378>
24. Fuentes del Toro S, Santos-Cuadros S, Olmeda E, San Román JL. Study of the Emergency Braking Test with an Autonomous Bus and the sEMG Neck Response by Means of a Low-Cost System. *Micromachines*. 2020; 11(10):931. <https://doi.org/10.3390/mi11100931>
25. Cohen-Manheim, I. et al. Does gender make a difference? Seatbelt use and the risk of severe injuries among drivers hospitalized in Level-1 trauma centers. *J. Transp. Heal.* 23, 101281 (2021).