



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD MECÁNICA**

**CARRERA MECÁNICA**

**ANÁLISIS BIOMECÁNICO MEDIANTE SIMULACIÓN  
COMPUTACIONAL DE LAS LESIONES QUE PUEDE SUFRIR UN  
PILOTO EN UN GO KART DE COMPETENCIAS  
INTERUNIVERSITARIAS, CASO DE ESTUDIO: IMPACTOS  
FRONTALES**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERA MECÁNICA**

**AUTORA: EVELYN BRIGITTD AGUIRRE SÁNCHEZ**

**DIRECTOR: Ing. SÓCRATES MIGUEL AQUINO ARROBA**

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, Evelyn Brigittd Aguirre Sánchez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Evelyn Brigittd Aguirre Sánchez, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 24 de junio 2024



**Evelyn Brigittd Aguirre Sánchez**

**0605158567**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA MECÁNICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **ANÁLISIS BIOMECÁNICO MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LAS LESIONES QUE PUEDE SUFRIR UN PILOTO EN UN GO KART DE COMPETENCIAS INTERUNIVERSITARIAS CASO DE ESTUDIO: IMPACTOS FRONTALES**, realizado por la señorita: EVELYN BRIGITTD AGUIRRE SÁNCHEZ, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Diego Fernando Mayorga Pérez  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



2024-06-24

Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



2024-06-24

Ing. Víctor David Bravo Morocho  
**ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



2024-06-24

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación le dedico en primer lugar a Dios por mantenerme fuerte durante toda mi etapa universitaria, a mi madre Luz Sánchez por estar en el momento justo cuando sentía que no podía más, a mi padre José Aguirre por haberme criado con valores y estar presente en cada pasito que he querido dar, y a mis hermanos por estar conmigo en todo momento.

Evelyn Aguirre

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco infinitamente a mi Dios por permitirme lograr una meta más en mi vida y sobre todo a mis padres que me han tenido paciencia y saber que esto se logra con constancia.

Evelyn Aguirre

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
RESUMEN .....	xiv
SUMMARY .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	2
1. <b>DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA</b> .....	2
1.1. <b>Antecedentes</b> .....	2
1.2. <b>Planteamiento del problema</b> .....	2
1.3. <b>Justificación</b> .....	3
1.3.1. <b>Justificación técnica</b> .....	3
1.3.2. <b>Justificación económica</b> .....	3
1.3.3. <b>Justificación social</b> .....	3
1.4. <b>Objetivos</b> .....	3
1.4.1. <b>Objetivo general</b> .....	3
1.4.2. <b>Objetivos específicos</b> .....	3
CAPÍTULO II .....	5
2. <b>MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1. <b>Definición de go kart</b> .....	5
2.2. <b>Karting</b> .....	5
2.3. <b>Chasis</b> .....	5
2.3.1. <i>Tipos de chasis de go kart</i> .....	5
2.4. <b>Normativa de regulación CIK/FIA</b> .....	7
2.4.1. <b>Categorías y grupos</b> .....	7
2.4.1.1. <i>Categoría OK</i> .....	7
2.4.1.2. <i>Categoría OK JUNIOR</i> .....	8
2.4.1.3. <i>Categoría KZ</i> .....	8
2.4.1.4. <i>Categoría KZZ</i> .....	9

<b>2.5.</b>	<b>Elementos de seguridad</b> .....	10
<b>2.6.</b>	<b>Tipos de impactos</b> .....	10
<b>2.7.</b>	<b>Pruebas de impacto</b> .....	11
<b>2.8.</b>	<b>Dummy de pruebas de impacto</b> .....	13
<b>2.8.1.</b>	<i>Dummy masculino Hybrid III</i> .....	14
<b>2.8.2.</b>	<i>Criterio de comportamiento de lesiones</i> .....	14
2.8.2.1.	<i>Criterio de comportamiento de la cabeza R94</i> .....	15
2.8.2.2.	<i>Criterio de lesiones del cuello R94</i> .....	15
2.8.2.3.	<i>Criterio de comportamiento del tórax R94</i> .....	16
2.8.2.4.	<i>Criterio de la fuerza del fémur R94</i> .....	16
2.8.2.5.	<i>Criterio de aceleraciones en la pelvis R95</i> .....	17
<b>2.9.</b>	<b>Método de elementos finitos</b> .....	18
<b>2.10.</b>	<b>Análisis explícito</b> .....	18
<b>2.11.</b>	<b>Análisis no lineal</b> .....	18
<b>2.12.</b>	<b>Mallado</b> .....	18
<b>2.13.</b>	<b>Ls-Dyna</b> .....	19
2.13.1.	<i>Pautas para el cálculo mediante análisis MEF</i> .....	20
 <b>CAPÍTULO III</b> .....		 23
<b>3.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	23
<b>3.1.</b>	<b>Ingeniería asistida por computador aplicada al go kart.</b> .....	23
<b>3.2.</b>	<b>Etapas de simulación</b> .....	24
<b>3.2.1.</b>	<i>Etapa 1: Modelado CAD</i> .....	24
<b>3.2.2.</b>	<i>Etapa 2: Preprocesamiento</i> .....	25
3.2.2.1.	<i>Generación de malla</i> .....	26
3.2.2.2.	<i>Ingreso del dummy</i> .....	26
3.2.2.3.	<i>Mallado del dummy</i> .....	28
3.2.2.4.	<i>Mallado de la pared de impacto</i> .....	28
3.2.2.5.	<i>Calidad de malla</i> .....	29
3.2.2.6.	<i>Cartas de control para materiales</i> .....	31
3.2.2.7.	<i>Carta de control para velocidad</i> .....	32
3.2.2.8.	<i>Fuerza gravitacional</i> .....	33
3.2.2.9.	<i>Acelerómetros</i> .....	33
3.2.2.10.	<i>Carta de control de contactos definidos</i> .....	34
3.2.2.11.	<i>Condiciones utilizadas en el modelo</i> .....	34

3.2.2.12.	<i>Incorporación de casco</i> .....	36
<b>3.3.</b>	<b>Estudios de casos</b> .....	37
<b>3.3.1.</b>	<b>CASO 1: Impacto frontal contra pared rígida</b> .....	37
<b>3.3.2.</b>	<b>CASO 2: Impacto frontal – frontal estático con piloto</b> .....	38
<b>3.3.3.</b>	<b>CASO 3: Impacto frontal – posterior estático con piloto</b> .....	39
<b>3.3.4.</b>	<b>Etapa 3: Solución código K</b> .....	40
 <b>CAPÍTULO IV</b> .....		 41
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	41
<b>4.1.</b>	<b>Resultados caso 1: Impacto frontal contra pared rígida</b> .....	41
<b>4.1.1.</b>	<b>Criterios de lesiones del dummy a 50 km/h, según R94.</b> .....	42
4.1.1.1.	<i>Criterio de lesiones en la cabeza HIC según R94.</i> .....	43
4.1.1.2.	<i>Criterio de lesiones del cuello según R94.</i> .....	43
4.1.1.3.	<i>Criterio de lesiones del tórax según R94.</i> .....	45
4.1.1.4.	<i>Criterio de fuerza del fémur según R94.</i> .....	45
<b>4.2.</b>	<b>Resultados caso 2: Impacto frontal - frontal</b> .....	46
<b>4.2.1.</b>	<b>Criterios de lesiones del dummy híbrido III a 50 km/h.</b> .....	48
4.2.1.1.	<i>Criterio de lesiones en la cabeza HIC según R94.</i> .....	48
4.2.1.2.	<i>Criterio de lesiones del cuello según R94.</i> .....	48
4.2.1.3.	<i>Criterio de lesiones del tórax según R94.</i> .....	50
4.2.1.4.	<i>Criterio de fuerza del fémur según R94.</i> .....	50
4.2.1.5.	<i>Evaluación de resultados de piloto móvil – piloto fijo</i> .....	52
<b>4.3.</b>	<b>Resultados caso 3: Impacto frontal- posterior</b> .....	52
<b>4.3.1.</b>	<b>Criterios de lesiones del dummy híbrido III a 50 km/h.</b> .....	54
4.3.1.1.	<i>Criterio de lesiones en la cabeza HIC según R94.</i> .....	54
4.3.1.2.	<i>Criterio de lesiones del cuello según R94.</i> .....	55
4.3.1.3.	<i>Criterio de lesiones del tórax según R94.</i> .....	56
4.3.1.4.	<i>Criterio de fuerza del fémur según R94.</i> .....	56
4.3.1.5.	<i>Resultados piloto móvil – piloto fijo posterior</i> .....	58
<b>4.4.</b>	<b>Análisis comparativo de los casos 1, 2 y 3 con y sin casco.</b> .....	58
<b>4.4.1.</b>	<b>Caso 1: Impacto frontal – pared rígida</b> .....	58
<b>4.4.2.</b>	<b>Caso 2: Impacto frontal – frontal</b> .....	60
<b>4.4.3.</b>	<b>Caso 3: Impacto frontal – posterior</b> .....	62

## **CAPÍTULO V**

<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>65</b>
<b>5.2</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>66</b>

**GLOSARIO**

**BIBLIOGRAFIA**

**ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Comparación de pesos entre el modelo virtual y el maniquí hybrid III 50 % .....	14
<b>Tabla 2-2:</b> Criterios de impacto frontal según UNECE/CEPE y EURONCAP .....	17
<b>Tabla 2-3:</b> Recomendaciones de calidad de mallado.....	19
<b>Tabla 3-1:</b> Etapas de simulación .....	24
<b>Tabla 3-2:</b> Dimensiones globales del go kart .....	25
<b>Tabla 3-3 :</b> Unidades de medida del modelo. ....	26
<b>Tabla 3-4:</b> Propiedades del mallado de la pared de impacto.....	30
<b>Tabla 3-5:</b> Propiedades del mallado del go kart. ....	30
<b>Tabla 3-6:</b> Propiedades del mallado del dummy. ....	31
<b>Tabla 3-7:</b> Materiales designados a distintas partes del modelo. ....	32
<b>Tabla 3-8:</b> Condiciones utilizadas para los distintos impactos. ....	35
<b>Tabla 4-1:</b> Secuencia del impacto frontal contra barrera a 50 Km/h. ....	41
<b>Tabla 4-2:</b> Secuencia del impacto frontal - frontal a 50 Km/h.....	46
<b>Tabla 4-3:</b> Comparativa de resultados piloto móvil – piloto fijo frontal.....	52
<b>Tabla 4-4:</b> Secuencia del impacto frontal- posterior a 50 Km/h. ....	53
<b>Tabla 4-5:</b> Comparativa de resultados dummy piloto - dummy posterior inmóvil. ....	58
<b>Tabla 4-6:</b> Secuencia del impacto frontal- pared con casco.....	58
<b>Tabla 4-7:</b> Comparación entre piloto sin casco – con casco.....	60
<b>Tabla 4-8:</b> Secuencia del impacto frontal- frontal con casco.....	60
<b>Tabla 4-9:</b> Comparación entre piloto sin casco – con casco.....	62
<b>Tabla 4-10:</b> Secuencia del impacto frontal- posterior con casco. ....	62
<b>Tabla 4-11:</b> Comparación entre piloto sin casco – con casco .....	64

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b> Chasis.....	5
<b>Ilustración 2-2:</b> Chasis tipo escalera .....	6
<b>Ilustración 2-3:</b> Chasis tipo "X" .....	6
<b>Ilustración 2-4:</b> Chasis tubular.....	7
<b>Ilustración 2-5:</b> Kart para categoría OK .....	8
<b>Ilustración 2-6:</b> Kart para categoría OK JUNIOR .....	8
<b>Ilustración 2-7:</b> Kart de categoría KZ.....	9
<b>Ilustración 2-8:</b> Kart de categoría KZZ.....	9
<b>Ilustración 2-9:</b> Tipos de colisiones.....	11
<b>Ilustración 2-10:</b> Esquema de ensayo de impacto frontal a 50 Km/h. ....	12
<b>Ilustración 2-11:</b> Esquema de ensayo de impacto trasero a 50 Km/h.....	13
<b>Ilustración 2-12:</b> Configuración del dummy .....	13
<b>Ilustración 2-13:</b> Partes del dummy .....	15
<b>Ilustración 2-14:</b> Criterio de tracción del cuello. ....	16
<b>Ilustración 2-15:</b> Criterio de cizalladura del cuello.....	16
<b>Ilustración 2-16:</b> Criterio de fuerza del fémur. ....	17
<b>Ilustración 2-17:</b> Flujograma de generación de malla mediante ANSA.....	20
<b>Ilustración 2-18:</b> Flujograma del proceso a realizar en LS-DYNA.....	21
<b>Ilustración 2-19:</b> Flujograma para el ingreso de soluciones.....	21
<b>Ilustración 3-1:</b> Estructura del proyecto.....	23
<b>Ilustración 3-2:</b> Modelado del go kart en SolidWorks .....	25
<b>Ilustración 3-3:</b> Generación del mallado en ANSA Prepost.....	26
<b>Ilustración 3-4:</b> Posicionamiento del dummy en el go kart en LS-Prepost. ....	27
<b>Ilustración 3-5:</b> Selección de movimientos del dummy LS-Prepost. ....	27
<b>Ilustración 3-6:</b> Mallado del dummy en LS-Prepost. ....	28
<b>Ilustración 3-7:</b> Malla de la pared de impacto en LS-Prepost. ....	29
<b>Ilustración 3-8:</b> Calidad de mallado de la pared de impacto en LS-Prepost. ....	29
<b>Ilustración 3-9:</b> Calidad del mallado del go kart en LS-Prepost. ....	30
<b>Ilustración 3-10:</b> Calidad de mallado del dummy en LS-Prepost.....	31
<b>Ilustración 3-11:</b> Velocidad de 50 Km/h para impactos frontales en LS-Prepost.....	32
<b>Ilustración 3-12:</b> Designación de acelerómetros del dummy en LS-Prepost.....	34
<b>Ilustración 3-13:</b> Cartas de control utilizadas en el modelo. ....	35
<b>Ilustración 3-14:</b> Casco utilizado para simulaciones.....	36

<b>Ilustración 3-15:</b> Propiedades mecánicas de la espuma del casco.....	37
<b>Ilustración 3-16:</b> Representación de choque frontal con pared rígida.....	38
<b>Ilustración 3-17:</b> Go kart contra la parte frontal de un go kart con pasajero estático.....	38
<b>Ilustración 3-18:</b> Go kart contra la parte posterior de un go kart con pasajero estático.....	39
<b>Ilustración 3-19:</b> LS-DYNA Program Manager Solver.....	40
<b>Ilustración 4-1:</b> HPC, en la cabeza del dummy a 50 Km/h.....	43
<b>Ilustración 4-2:</b> Fuerza de tracción en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.....	44
<b>Ilustración 4-3:</b> Fuerza de corte en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.....	44
<b>Ilustración 4-4:</b> ThCC, en la tórax del dummy a 50 Km/h.....	45
<b>Ilustración 4-5:</b> Fuerza del fémur izquierdo a velocidad de 50 Km/h.....	45
<b>Ilustración 4-6:</b> Fuerza del fémur derecho a velocidad de 50 Km/h.....	46
<b>Ilustración 4-7:</b> HPC, de la cabeza del dummy a 50 Km/h.....	48
<b>Ilustración 4-8:</b> Fuerza de tracción en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.....	49
<b>Ilustración 4-9:</b> Fuerza de cizalladura en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.....	50
<b>Ilustración 4-10:</b> ThCC, en la tórax del dummy a 50 Km/h.....	50
<b>Ilustración 4-11:</b> Fuerza del fémur izquierdo a velocidad de 50 Km/h.....	51
<b>Ilustración 4-12:</b> Fuerza del fémur derecho a velocidad de 50 Km/h.....	51
<b>Ilustración 4-13:</b> HPC, en la cabeza del dummy a 50 Km/h.....	54
<b>Ilustración 4-14:</b> Fuerza de tracción en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.....	55
<b>Ilustración 4-15:</b> Fuerza de cizalladura en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.....	56
<b>Ilustración 4-16:</b> ThCC, en la tórax del dummy a 50 Km/h.....	56
<b>Ilustración 4-17:</b> Fuerza del fémur izquierdo a velocidad de 50 Km/h.....	57
<b>Ilustración 4-18:</b> Fuerza del fémur derecho a velocidad de 50 Km/h.....	57

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**Anexo A:** Contrato de licencia de programas

**Anexo B:** Reglamento N°94 de la comisión económica para Europa

**Anexo C:** Planos de go kart

## RESUMEN

El desarrollo tecnológico en el diseño de las estructuras de go kart aún no ha sido debidamente explorado en el país, y las pocas investigaciones que existen no ofrecen resultados concluyentes sobre la seguridad de los pilotos, además, la ausencia de análisis estructurales y biomecánicos no proporciona datos certeros ante situaciones de impacto, por lo tanto el objetivo de la investigación fue analizar las lesiones del dummy masculino híbrido III durante los impactos frontales, kart – pared rígida, kart – frontal kart, kart – posterior kart, para verificar el cumplimiento de los criterios de aceptación según el reglamento CEPE R94 empleando método de elementos finitos, para ello se modeló la estructura del kart a través del software de diseño SOLIDWORKS y mediante el programa de LS-DYNA se obtuvo el dummy especializado en la recolección de datos de las lesiones producidas en el cuerpo humano. Se realizó el mallado de los elementos tipo Shell y Solid en 2 dimensiones, el cual permite alcanzar una malla que cumpla con el criterio de JACOBIANO, y se realizó los impactos de las simulaciones a velocidad de 50 Km/h. Los resultados obtenidos permitieron conocer para cada caso los criterios de lesión para la cabeza (HIC), el índice de severidad torácica (Csi), lesiones en el cuello, y lesiones del fémur. Comprobando que para el primer caso existe lesiones graves, mientras que para el segundo caso existe lesiones leves, y finalmente en el tercer caso es factible que no exista lesiones. En ese contexto se concluye que existen lesiones del piloto de leves a graves, por lo que se recomienda que el conductor lleve cinturón de seguridad de al menos dos puntos de anclaje.

**Palabras clave:** <IMPACTO FRONTALE> <DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD) > <DUMMY HIBRYD III > <LESIONES DEL PILOTO> < GO KART> < VELOCIDAD DE IMPACTO>

0999-DBRA-UTP-2024



## SUMMARY

The technological development in the design of go-kart structures has not yet been adequately explored in the country, and the few investigations that exist do not offer conclusive results on the safety of the drivers. Furthermore, the absence of structural and biomechanical analyses provides inaccurate data in impact situations. Therefore, the objective of the research was to analyze the injuries of the hybrid III male dummy during frontal impacts, kart-rigid wall, kart-front kart, and kart-rear kart to verify compliance with the acceptance criteria according to the CEPE R94 regulation using the finite element method. For this, the structure of the kart was modeled through the SOLIDWORKS design software, and through the LS-DYNA program, the dummy specialized in collecting injury produced in the human body data was obtained. The meshing of the Shell and Solid type elements in 2 dimensions was carried out, which allows reaching a mesh that meets the JACOBIANO criterion, and the impacts of the simulations were carried out at a speed of 50 km/h. The results obtained allowed us to know, for each case, the head injury criteria (HIC), the thoracic severity index (CSI), neck injuries, and femur injuries. Verifying that for the first case, there are serious injuries, while for the second case, there are minor injuries, and finally, in the third case, it is feasible that there are no injuries. In this context, it is concluded that there are minor to severe injuries to the pilot, so it is recommended that the driver wear a seat belt with at least two anchor points.

**Keywords:** <FRONTAL IMPACT> <COMPUTER AID DESIGN (CAD) > <DUMMY HIBRYD III > <RIDER INJURIES> < GO KART> < IMPACT SPEED>



Lic. Sandra Leticia Guijarro Paguay

C.I.: 0603366113

## **INTRODUCCIÓN**

La presente investigación se refiere a la evaluación de lesiones registradas en el dummy hybrid III percentil 50 durante impactos frontales verificando el cumplimiento de los criterios del reglamento CEPE R94 mediante la simulación por el método de elementos finitos.

Actualmente los go kart alcanzan velocidades superiores a 150 km/h, aumentando la posibilidad de sufrir accidentes repercutiendo directamente al piloto y en la estructura del monoplaça, los impactos más frecuentes son frontales. El desarrollo tecnológico que se ha dado en los últimos años permite implementar herramientas de ingeniería computacional enfocadas en la seguridad de los ocupantes durante impactos, en donde se analiza el comportamiento biomecánico de los mismos, para este estudio se utiliza el dummy hybrid III percentil 50, para pruebas de impacto frontal, siendo estos uno de los más usados en pruebas de seguridad ya que este dummy es una réplica del ser humano, por lo que posee características físicas iguales como: peso, masa, movilidad de articulaciones, también poseen sensores distribuidos en todo el cuerpo, de esta manera recopila información de variables como velocidad, y aceleración producidas durante las pruebas de impacto frontal, permitiendo medir el índice de lesiones producido durante las simulaciones mediante la utilización de método de elementos finitos. Se tiene como objetivo fundamental el análisis de lesiones del piloto en impactos frontales mediante simulaciones con software computacional tales como SolidWorks utilizado para el diseño y modelado, y LS-DYNA para el análisis del comportamiento del dummy. Por lo tanto el proceso de evaluación de lesiones se realizó mediante el reglamento CEPE R94.

## **CAPÍTULO I**

### **1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. Antecedentes**

El go kart se define como un automóvil originario de Estados Unidos, es propulsado por un motor, no dispone de suspensión y puede o no tener carrocería y cuenta con ruedas en contacto con el suelo no alineadas. La dirección es controlada por las ruedas delanteras y la potencia es transmitida del motor hacia las ruedas traseras que están unidas por un solo eje (Godino, 2015).

La evolución del go kart ha ido en aumento desde sus inicios, mejorando la estabilidad y frenada del chasis. En la actualidad estos go kart pueden alcanzar velocidades superiores a 150 km/h, aumentando la tendencia a sufrir accidentes que repercuten directamente en el piloto y en la estructura del monoplaza, en donde las colisiones más recurrentes en su mayoría son frontales.

Existen diferentes áreas relacionadas a la modificación y concepción del chasis de un karting y distintas formas de evaluarlas, por ejemplo, la Universidad de Calabria en Italia en el 2006 propuso una investigación en donde se analizó diferentes tipos de estructuras tubulares, que se caracterizaron por una tasa específica de deformación sometidas a una metodología compuesta por procesos numéricos de modelado geométrico, análisis estructural y dinámico cuyo resultado se muestra en un modelo matemático FEM preciso con un excelente comportamiento estructural. El desarrollo tecnológico en los últimos años contribuye a que se implementen herramientas de ingeniería computacional enfocadas en la seguridad de los ocupantes durante impactos, en donde se analiza el comportamiento biomecánico de los mismos. Los ensayos computacionales permiten replicar situaciones reales de colisiones, cuyos resultados son aceptables y validados por medio de métodos numéricos avanzados, por ende, no se desperdician recursos al verificar la calidad de las estructuras automotrices (Grzebieta, et al., 2014).

#### **1.2. Planteamiento del problema**

El desarrollo tecnológico en el diseño de las estructuras de go kart aún no ha sido debidamente explorado en el país, y las pocas investigaciones que existen no ofrecen resultados concluyentes sobre la seguridad de los pilotos, además, la ausencia de análisis estructurales y biomecánicos no proporciona datos certeros ante situaciones de impacto.

Según Mejía (2022), menciona que, se ha obtenido resultados significativos sobre esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad mediante impacto frontal. Sin embargo, no se ha realizado con la implementación de un dummy por lo que es evidente la necesidad de una mayor profundización en el análisis para garantizar la óptima seguridad en la conducción.

### **1.3. Justificación**

#### ***1.3.1. Justificación técnica***

El reglamento CIK FIA para este tipo de estructuras debería requerir ensayos que evalúen la seguridad del piloto. Sin embargo, la impericia de nuevas tecnologías, entre otros factores, ha llevado a que solo se solicite requisitos mínimos para este tipo de estructuras, dejando al piloto fuera del análisis.

Las altas velocidades que logran alcanzar los go kart aumentan el riesgo de los pilotos a sufrir graves lesiones, en especial durante impactos frontales, que es una de las situaciones más frecuentes que se dan en este deporte. La cabeza, cuello, columna y extremidades son las partes más sensibles que pueden ser afectadas, ya que están más expuestas.

#### ***1.3.2. Justificación económica***

El análisis biomecánico de las lesiones en pilotos de go kart al momento de un impacto frontal tiene repercusiones críticas, ya que este tipo de accidentes puede resultar en costosos gastos médicos y posibles demandas legales, es por ello por lo que un análisis biomecánico preciso permite identificar las partes de más vulnerabilidad del cuerpo y de esta manera desarrollar métodos para minimizar lesiones.

Según, Grzebieta, et al., (2014), menciona que, llevaron a cabo reconstrucciones de accidentes fatales junto con impactos frontales en diferentes escenarios para evaluar las lesiones del piloto. Estos análisis realizados con dummies y go karts físicos proporcionaron datos cruciales. Sin embargo, esta investigación no ofrece un método teórico que permite modificar condiciones y materiales según se requiera, que de manera física demandarían gran cantidad de tiempo y dinero. Esto no solo ahorra recursos considerables en términos de tiempo y dinero, sino que también garantiza resultados fiables y adaptables.

#### ***1.3.3. Justificación social***

La simulación de impactos frontales en go karts permite a los diseñadores e ingenieros comprender de mejor manera las lesiones que pueden afectar a los pilotos, permitiendo implementar medidas de protección y preventivas para garantizar la integridad física de los ocupantes.

### **1.4. Objetivos**

#### ***1.4.1. Objetivo general***

Realizar el análisis biomecánico mediante simulación computacional de las lesiones que puede sufrir un piloto en un go kart de competencias interuniversitarias, caso de estudio: impactos frontales.

#### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- Modelar mediante un software CAD un go kart en base a los parámetros establecidos en la normativa CIK-FIA.

- Simular el impacto frontal de un go kart contra una barrera de seguridad rígida existente en los kartódromos, por medio de un software CAE empleando el método de elementos finitos explícito no lineal.
- Simular el impacto frontal de un go kart contra la parte posterior de otro go kart con pasajero estático, por medio de un software CAE empleando el método de elementos finitos explícito no lineal.
- Simular el impacto frontal de un go kart contra la parte frontal de un go kart con pasajero estático, por medio de un software CAE empleando el método de elementos finitos explícito no lineal.
- Analizar los resultados obtenidos del dummy para identificar las zonas críticas de afectación del piloto.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Definición de go kart

El go kart es un vehículo a motor pequeño que posee cuatro ruedas no alineadas en contacto con el suelo, en donde las ruedas delanteras ejercer el control de la dirección, mientras que las traseras al ser conectadas a un solo eje transmite la potencia del motor. Este tipo de vehículo puede contar con o sin carrocería (Godino, 2015).

#### 2.2. Karting

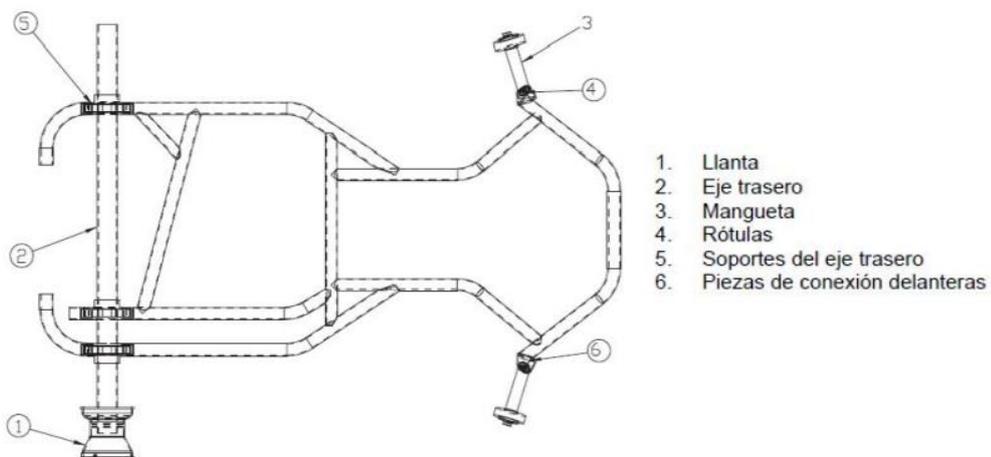
El karting es una competencia de automovilismo practicada con karts en un circuito cerrado llamado kartódromos, posee una longitud entre 600 y 1700 metros y un ancho que va de 8 a 15 metros, es ideal para la formación de pilotos y suele ser la carrera ideal para el debut de jóvenes aspirantes a pilotos de competición (Ochoa, 2013).

#### 2.3. Chasis

El chasis es la estructura que aporta rigidez al go kart, siendo la parte principal del mismo en donde está ensamblado todos las componentes mecánicos. El chasis debe ser construido de materiales anticorrosivos, buena tenacidad y capacidad para mantener su integridad estructural frente a distorsiones o alteraciones que soporte tanto al pasajero como los componentes ensamblados. Adicionalmente, estos go kart carecen de suspensión, por lo que requieren una adecuada gestión de la torsión para emular condiciones de suspensión (Poma, 2018).

##### 2.3.1. Tipos de chasis de go kart

Se diseñan en diferentes formas y en función de parámetros que están relacionados con la resistencia, distribución de cargas, flexiones, torsiones, momentos, aerodinámica, entre otros.



**Ilustración 2-1:** Chasis

Fuente: Aguado, 2014

### **Chasis en escalera o en “H”**

El chasis en escalera es uno de los más antiguos y viables para su producción debido a sus bajos costos de fabricación, además uno de más comunes en la industria automotriz que se ha tomado como base para la mayoría de los automóviles, su constitución se base en perfiles estructurales generalmente tipo C, y se interconectan mediante correas ubicadas de manera transversal (Poma, 2018).



**Ilustración 2-2:** Chasis tipo escalera

Fuente: Castro & Jiménez, 2018

### **Chasis en columna o “X”**

Este tipo de chasis inventado por Colin Chapman está constituido por un larguero central en forma de columna vertebral que une al eje posterior con el delantero del automóvil. Esta columna permite proporcionar sujeción a todos los componentes mecánicos, de esta manera se logra una estructura rígida (Gonza, 2023).



**Ilustración 2-3:** Chasis tipo "X"

Fuente: DMC, 2023

### **Chasis tubular**

Este chasis inventado por Touring en 1937 se empezó a usar a mediados del siglo XX en go kart deportivo, se origina debido a la necesidad de obtener rigidez y resistencia, pero a su vez ligero. Este chasis está compuesto por un sin número de miembros estructurales conectados entre sí mediante uniones soldadas (Poma, 2018)

Generalmente, se usa en prototipos de ámbito deportivo, en donde la carrocería solo contribuye estética y aerodinámicamente en el performance del go kart. Una desventaja importante en este tipo de automóviles implica el alto costo de fabricación (Gonza, 2023).



**Ilustración 2-4:** Chasis tubular

Fuente: Gonza, 2023

## **2.4. Normativa de regulación CIK/FIA**

La Federación Internacional del Automóvil (FIA) tiene influencia a nivel mundial en el ámbito automovilismo a través de la Comisión Internacional de Karting (CIK/FIA). Esta comisión es responsable de elaborar regulaciones detalladas con el propósito de promover la práctica del karting deportivo y, lo más importante, garantizar la unidad del karting, buscando un diseño eficiente en términos de componentes mecánicos y eléctricos (FIA KARTING, 2023).

### **2.4.1. Categorías y grupos**

A continuación, se presenta de una forma más detallada las categorías determinadas.

#### **2.4.1.1. Categoría OK**

Esta categoría es accesible a partir de 14 años, el chasis tiene que ser homologado por la CIK-FIA, poseer frenos hidráulicos solo traseros, 125 cc de 2 tiempos con eje equilibrado, la refrigeración por agua, las revoluciones máximas de 16000 rpm con una válvula de escape simplificada y de diseño único, carburador de mariposa de 24 mm de diámetro, sin cambio de marchas, embrague, sin motor de arranque, sin batería y el peso mínimo debe ser de 145 kg con piloto a bordo (FIA KARTING, 2023).



**Ilustración 2-5:** Kart para categoría OK

Fuente: FIA KARTING, 2023

#### 2.4.1.2. *Categoría OK JUNIOR*

Esta categoría es para jóvenes que aún están aprendiendo, la edad oscila entre 12 y 14 años, la competencia es grande y en grupos grandes, el chasis tiene que ser homologado por la CIK-FIA, poseer frenos hidráulicos solo traseros, 125 cc de 2 tiempos con eje equilibrado, la refrigeración por agua, las revoluciones máximas de 14000 rpm sin válvula de escape, escape de diseño único, carburador de mariposa de 20 mm de diámetro, sin caja de cambios, sin embrague, sin motor de arranque, sin batería y el peso mínimo debe ser de 145 kg con piloto a bordo (FIA KARTING, 2023).



**Ilustración 2-6:** Kart para categoría OK JUNIOR

Fuente: FIA KARTING, 2023

#### 2.4.1.3. *Categoría KZ*

Esta categoría es caracterizada por mayor libertad en el chasis, de esta manera permite el desarrollo del equipo, además debe poseer un motor potente de caja de cambios, en cuanto al Kart los frenos hidráulicos deben ser en las cuatro ruedas, poseer un motor de 125 cc de dos tiempos

con caja de cambios de 6 velocidades, la refrigeración debe ser líquida, la potencia debe ser cercana a los 50 CV y el peso mínimo con el piloto a bordo debe ser de 170 kg (FIA KARTING, 2023).



**Ilustración 2-7:** Kart de categoría KZ

Fuente: FIA KARTING, 2023

#### 2.4.1.4. Categoría KZZ

Esta categoría fue lanzada en el 2022, ha sido creada para satisfacer la demanda de pilotos de 35 años en adelante, el peso mínimo del piloto a bordo debe ser de 180 kg. Se caracteriza por un motor potente y con una caja de cambios, el rendimiento es extremadamente alto y con un costo bastante asequible (FIA KARTING, 2023).

En cuanto al go kart el chasis debe ser homologado por la CIK – FIA, poseer un motor de 125 cc de dos tiempos con caja de cambios de 6 velocidades, frenos hidráulicos en las cuatro ruedas, refrigeración líquida, potencia cercana a los 50 CV (FIA KARTING, 2023).



**Ilustración 2-8:** Kart de categoría KZZ

Fuente: FIA KARTING, 2023

## **2.5. Elementos de seguridad**

La protección física de los pilotos en competencias de esta índole es crucial, Por consiguiente, al concebir un go kart, es esencial que se tenga en cuenta la seguridad del piloto, gracias a los componentes pasivos que este incorpora con el fin de brindar protección al piloto en caso de colisiones frontales con objetos (Asencio, 2023).

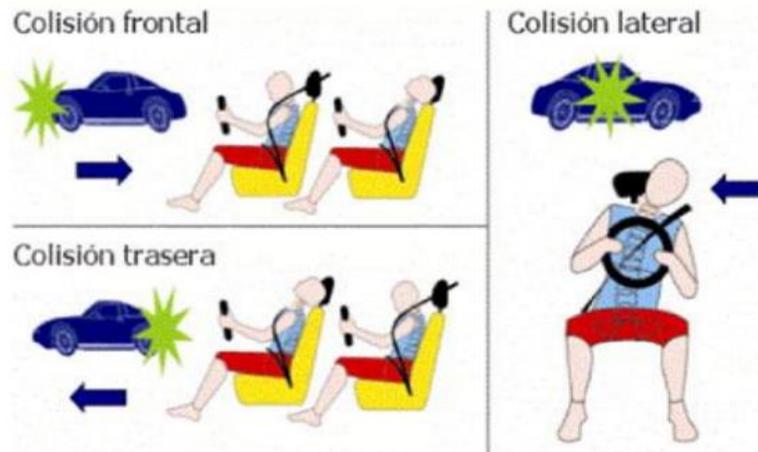
Un elemento importante y básico en el go kart es el paragolpes, este elemento es construido de barras metálicas y se encuentra fijado al chasis con el objetivo de resistir los impactos. Además, existen otros tipos de protección como son los protectores de ruedas posteriores, el objetivo de estos protectores consiste en minimizar las partículas de contaminación ubicadas en el suelo, ya que al adquirir el go kart energía estas partículas afectan cuantiosamente a los neumáticos llegando a que los mismos se degasten de manera más rápida y finalmente provocar un accidente (Asencio, 2023).

## **2.6. Tipos de impactos**

Para tomar en cuenta el análisis de impacto frontal que puede soportar un chasis de un go kart, primero se debe tener claro los tipos de colisiones, en este estudio se presenta algunos tipos de colisiones que se puede presentar y son más comunes (Asencio, 2023).

- Pérdida de pista o trayectoria: Se presenta en un go kart al abandonar la pista de carreras, dirigirse a las barreras de seguridad o partes laterales de la pista.
- De tipo frontal: Se presenta en la parte frontal del kart.
- De tipo lateral: ocurre cuando una sección de la parte lateral se involucra en una colisión.
- Por alcance: ocurre una vez que un go kart que va seguido de otro logra alcanzar al anterior y se impacta con la parte posterior del mismo.
- Volcadura: este tipo no es tan frecuente, pero se da por motivo de elevación a velocidad o a su vez al encontrarse con algún punto de pivote, generando de esta manera un vuelco.

Además, en un análisis se debe tomar en cuenta el tipo de impacto que se presenta ante una colisión, esto se da al intervenir el go kart en movimiento con otro. Para este tipo de impactos se realiza ensayos destructivos, en donde se ven involucrados unos o varios go karts y se pretende reproducir las acciones graves que puede sufrir el piloto (Asencio, 2023).



**Ilustración 2-9:** Tipos de colisiones

Fuente: Andrade, 2016

Se debe tener en cuenta que no es lo mismo un choque que una colisión, ya que el choque se da entre un go kart en movimiento y un objeto estático, en cambio, la colisión se da por dos objetos en movimiento, en este caso dos o más go karts, normalmente se da en la competencia de automovilismo denominada karting, ya que todos se encuentran corriendo de manera conjunta (Asencio, 2023).

### 2.7. Pruebas de impacto

Según Grzebieta et. al., (2014), reconstruyeron dos accidentes mortales que se produjo en el (2013, 2014) en carreras callejeras, en el primero el piloto se salió de la pista del karting y se impactó contra las barreras a una velocidad estimada de 100 Km/h, provocando lesiones fatales en los pilotos como lesión de la columna y golpes fatales en la cabeza, debido a esto se reconstruyó la muerte del piloto por medio computacional, donde se cambiaron las condiciones del accidente para verificar si existía posibilidades de no sufrir lesiones fatales. Entonces, se reconstruyó la barrera de seguridad a una más ligera, donde al impactarse redirija de manera segura al go kart de modo que viaje paralelo a las rejillas y el piloto estar debidamente sujeto, al realizar la simulación luego del impacto indicaron que el piloto pudo haber sobrevivido en dichas condiciones (Grzebieta et. al., 2014).

El segundo accidente se produjo a una velocidad de 25 Km/h de un ciclista, que al estar debidamente sujeto y con casco se impactó contra una barrera de hormigón a 90 grados que se encontraba revestida con una sola hilera de neumáticos, el piloto sufrió una fractura de cráneo provocando su muerte. La reconstrucción de este accidente se realizó de la misma manera por medio computacional, se determinaron al menos cuatro escenarios, en donde el ciclista se encontraba debidamente sujeto a tres puntos de sujeción y como revestimiento de la barrera una hilera de neumáticos, hasta dos hileras (Grzebieta et. al., 2014).

Con base a los resultados de las reconstrucciones de los accidentes, se ha desarrollado una serie de rigurosas pruebas de choque, estas incluyen pruebas específicas de go kart contra go kart y de go kart contra barrera, consideradas como los escenarios más representativos en este ámbito de competiciones. Las configuraciones de prueba siguen pautas estipuladas por la norma EN 16230 en el go kart basado en concesiones (Ross et al., 1993).

El propósito fundamental de estas pruebas es obtener resultados prácticos que contribuyan a optimizar la resistencia a los choques tanto de go karts como de barreras, la ejecución de las pruebas dinámicas tuvo lugar en las instalaciones de Crashlab, perteneciente a la Agencia de Servicios Marítimos y Carreteras del Gobierno del Estado de Nueva Gales Sur (NSW) (Ross et al., 1993).

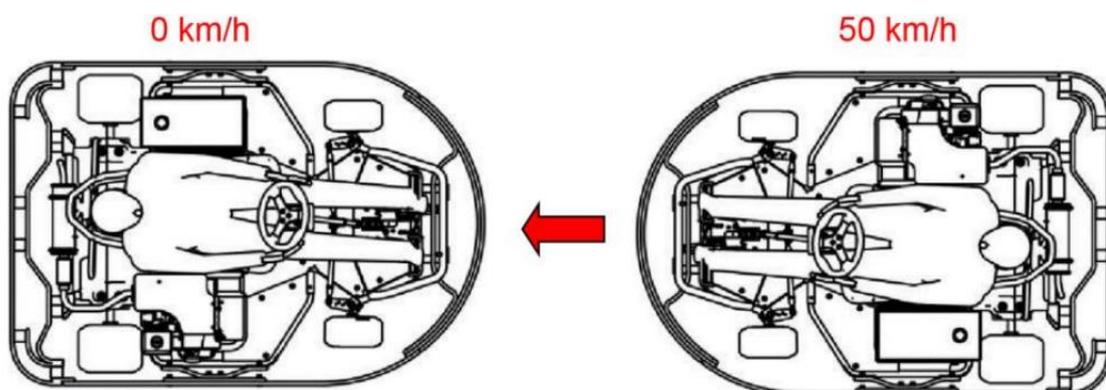
### **Criterios de evaluación**

La valoración del go kart durante las pruebas de su desempeño en la de choque con distintas barreras incluyeron observaciones detalladas y la evaluación de posibles riesgos para el piloto. En el caso específico de las barreras se llevó a cabo pruebas para evaluar la idoneidad estructural como la trayectoria en caso de impacto (Ross et al., 1993).

Se adaptaron algunos procedimientos para evaluar la seguridad como:

- Conformidad estructural  
Los elementos que han sido desprendidos durante el impacto del go kart no deben presentar algún tipo de peligro ni para el piloto del go kart, ni para el personal de la pista que opera las instalaciones.
- Riesgo de pilotos  
Las lesiones de los piloto se basan básicamente en la velocidad de impacto, a mayor velocidad mayor riesgo de fracturas.

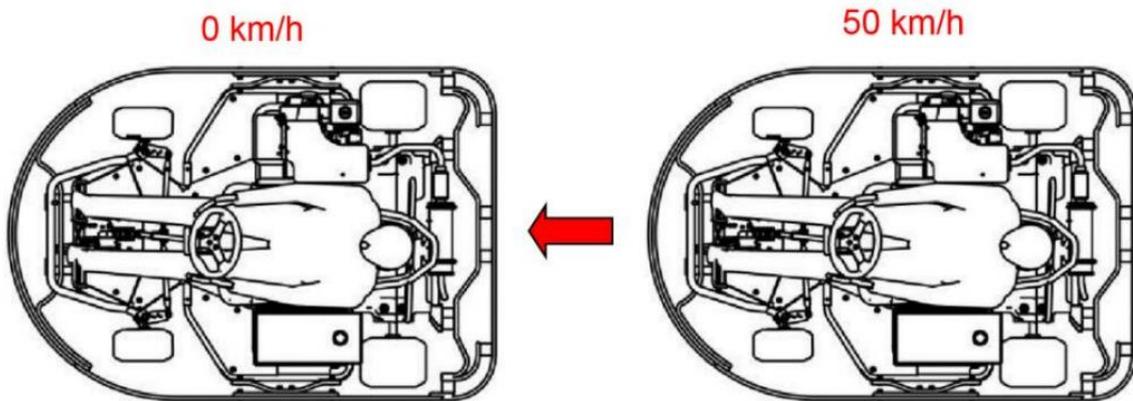
En la Ilustración 2-10, se muestra la primera prueba realizada mediante un impacto frontal a 50 Km/h contra otro go kart estacionario.



**Ilustración 2-10:** Esquema de ensayo de impacto frontal a 50 Km/h.

Fuente: Grzebieta, et al., 2014

En la Ilustración 2-11, se muestra la segunda prueba mediante el impacto trasero a otro go kart estacionario a 50 Km/h.



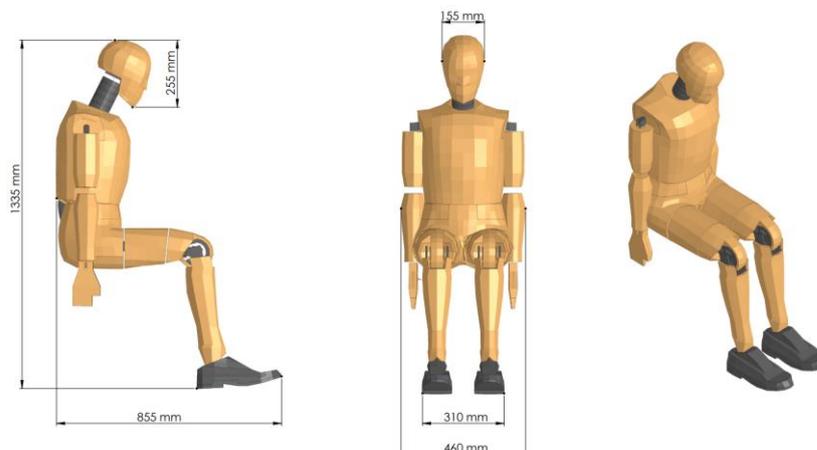
**Ilustración 2-11:** Esquema de ensayo de impacto trasero a 50 Km/h.

Fuente: Grzebieta et al., 2014

## 2.8. Dummy de pruebas de impacto

Para analizar los daños causados durante algún tipo de colisión en los pilotos de go kart, se realizan pruebas con dummies especializados para cada situación. Están constituidos por una piel de caucho, esqueleto de aluminio y varios sensores internos, por lo general estos maniqués van colocados en los asientos del piloto y del acompañante (Maldonado, 2004).

El propósito del dummy consiste en imitar al ser humano durante un impacto, lo que posibilita la recolección de datos sobre posibles lesiones que podrían sugerir, algo que no sería factible con un ocupante humano. Se dividen en varios tamaños a través de un porcentaje, el más común es el percentil 50 que se refiere a un hombre mediano, siendo el más común en impactos de tipo frontal, sus características principales es una estatura de 178 cm y 77 kg. Es utilizado para simulaciones computacionales y se ubica en la parte del piloto, su denominación es *HIBRIDO III 50% percentil masculino*, se basa en otras versiones anteriores a este (Maldonado, 2004).



**Ilustración 2-12:** Configuración del dummy

Fuente: CEND Ingeniería, 2023

### 2.8.1. *Dummy masculino Hybrid III*

Este modelo de prueba de impacto es reconocido como el más utilizado a nivel mundial para evaluar la seguridad de sistemas automotrices sometidos a pruebas de colisión frontal. Inicialmente concebido por General Motors, el diseño masculino del Híbrido III en el percentil 50, detallado en la Tabla, actualmente es gestionado y perfeccionado por Humanetics en colaboración con los Comités de Biomecánica de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y la Administración Nacional de Seguridad y Transporte en Carreteras (NHTSA) (Martínez et al., 2016).

**Tabla 2-1:** Comparación de pesos entre el modelo virtual y el maniquí hybrid III 50 %

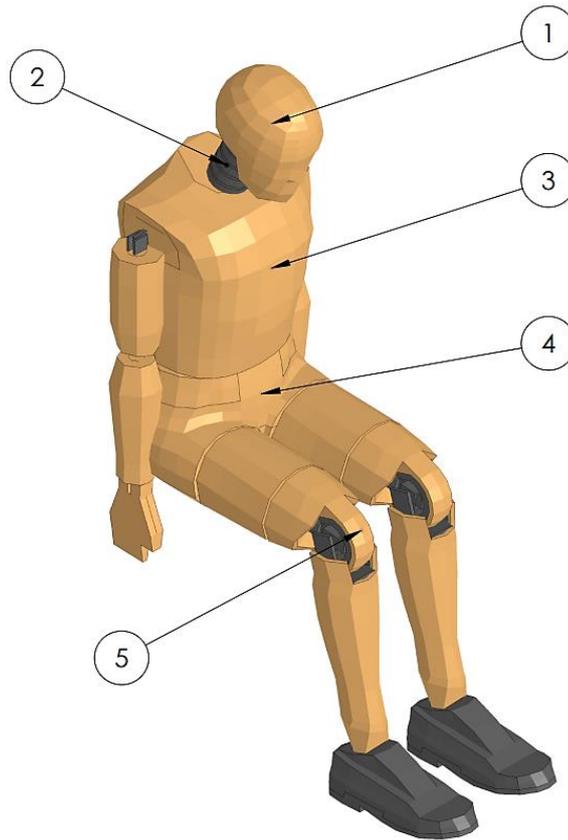
CONJUNTO		Requisitos norma		Peso medio maniqués (kg)	Peso Modelo FEM (kg)
		Mín. (kg)	Máx. (kg)		
<b>Cabeza</b>	<b>Cabeza</b>	4,49	4,59	4,55	4,54
<b>Cuello</b>	<b>Cuello</b>	1,49	1,59	1,51	1,55
<b>Tórax</b>	<b>Torso Superior</b>	17,05	17,33	17,07	17,27
<b>Pelvis</b>	<b>Torso Inferior</b>	22,90	23,81	23,07	23,07
<b>Pierna</b>	<b>Pierna Superior</b>	5,90	6,08	5,97	6,04
	<b>Pierna Inferior</b>	4,22	4,36	4,40	4,35
	<b>Pie</b>	1,09	1,23	1,15	1,14
<b>Brazo</b>	<b>Brazo Superior</b>	1,91	2,09	2,03	1,96
	<b>Brazo Inferior</b>	1,65	1,75	1,69	1,67
	<b>Mano</b>	0,52	0,61	0,55	0,53
<b>TOTAL MANIQUÍ HIII-50th</b>		<b>76,52</b>	<b>78,88</b>	<b>77,76</b>	<b>77,81</b>

Fuente: Martínez et al., 2016

El dummy, o maniquí de pruebas, es un componente esencial en simulaciones de impacto automotriz. En LS-DYNA, este modelo puede ser generado siempre y cuando se cuente con una licencia activa del software. La capacidad para crear y utilizar dummies en simulaciones de choque proporciona una representación crucial de la respuesta humana ante colisiones, permitiendo así evaluar la seguridad y el rendimiento del go kart en escenarios de impacto (Martínez et al., 2016).

### 2.8.2. *Criterio de comportamiento de lesiones*

Los resultados que se desean obtener son: el criterio de comportamiento de la cabeza HIC, fuerzas y momentos para calcular lesiones en el cuello, el comportamiento del tórax CSI, deformación de las costillas, aceleración de la pelvis y fuerzas en el fémur (Maldonado, 2004).



**Ilustración 2-13:** Partes del dummy

Fuente: CEND Ingeniería, 2023

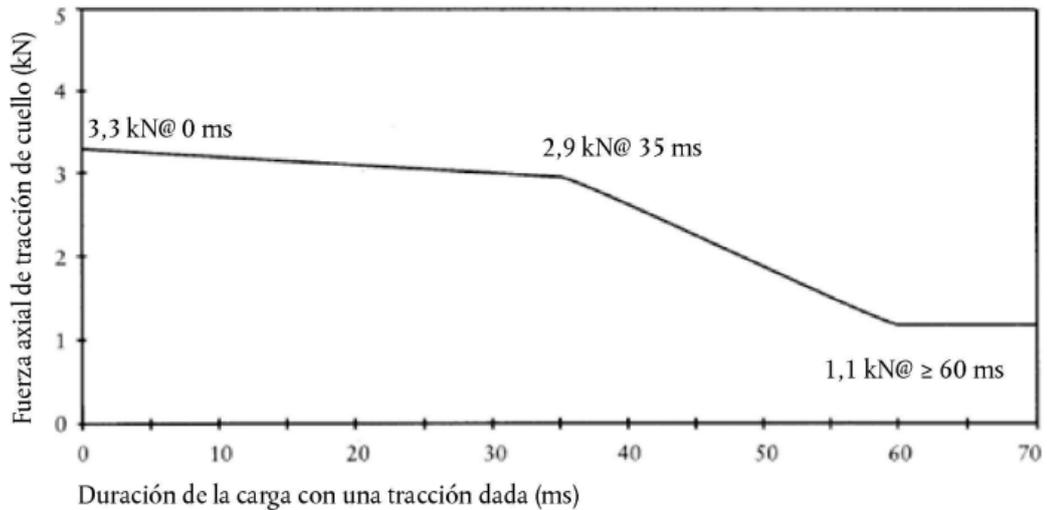
*2.8.2.1. Criterio de comportamiento de la cabeza R94*

El criterio de rendimiento de la cabeza (HPC, Head Performance Criterion) no debe exceder de 1000 y la aceleración resultante de la cabeza no debe superar los 80 g por más de 3 milisegundos. El cálculo del valor HPC se medirá mediante la siguiente ecuación (UNECE/CEPE, 2016).

$$(t_2 - t_1) \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5}$$

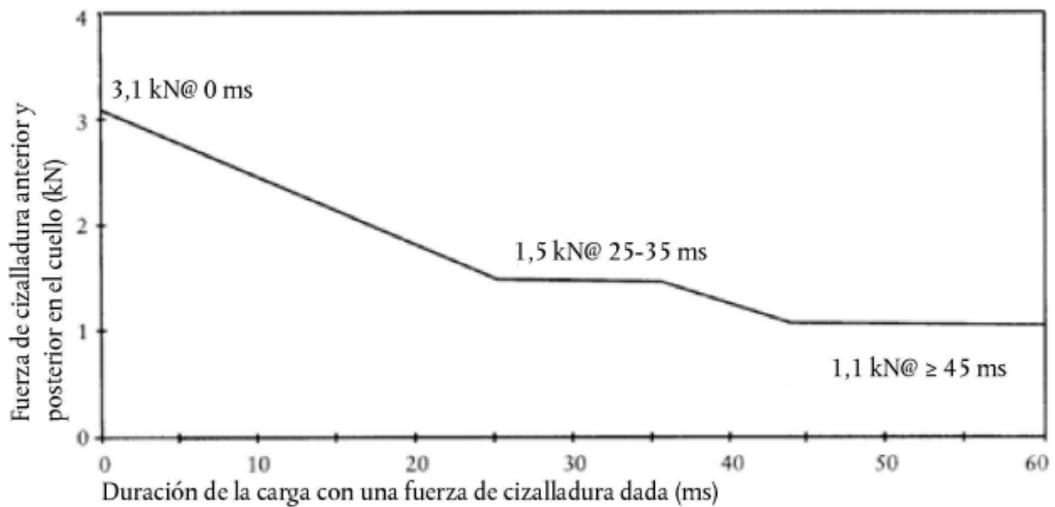
*2.8.2.2. Criterio de lesiones del cuello R94*

Los criterios de lesión del cuello (NIC, Neck Injury Criterial) no superará los valores mostrados en la figura 2-14 y 2-15. (UNECE/CEPE, 2016).



**Ilustración 2-14:** Criterio de tracción del cuello.

Fuente: (UNECE/CEPE, 2016).



**Ilustración 2-15:** Criterio de cizalladura del cuello.

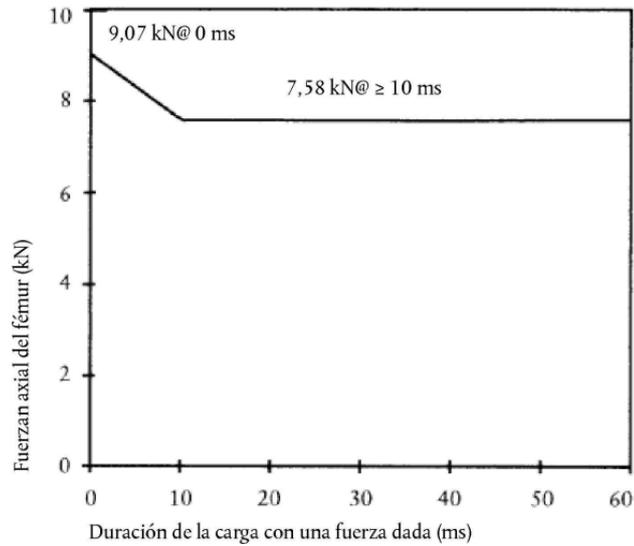
Fuente: (UNECE/CEPE, 2016).

#### 2.8.2.3. Criterio de comportamiento del tórax R94

El criterio de compresión del tórax (ThCC, Thorax Compression Criterion) no será superior a 42 mm. (UNECE/CEPE, 2016).

#### 2.8.2.4. Criterio de la fuerza del fémur R94

El criterio de fuerza del fémur (FFC, Femur Force Criterion) no será superior al criterio de comportamiento fuerza-tiempo que se muestra en la figura 2-16 (UNECE/CEPE, 2016).



**Ilustración 2-16:** Criterio de fuerza del fémur.

Fuente: UNECE/CEPE, 2016

#### 2.8.2.5. Criterio de aceleraciones en la pelvis R95

El criterio de comportamiento de la pelvis solo se encuentra en el reglamento R95 y será: fuerza máxima sobre la sínfisis púbica inferior o igual a 6 kN.

**Tabla 2-2:** Criterios de impacto frontal según UNECE/CEPE y EURONCAP

1	<p><b>Criterio de comportamiento de la cabeza (HIC)</b></p> <p>Máx. 1000 según UNECE/CEPE</p> <p>Máx. 700 según EURONCAP</p>
2	<p><b>Criterios de lesiones en el cuello (NIC)</b></p> <p>Fuerza máx. 3.3 kN según UNECE/CEPE</p> <p>Momento medido condyle occipital máx. 57 kNm según EURONCAP</p>
3	<p><b>Criterio del comportamiento del tórax (CSI)</b></p> <p>Máx. 42 mm según UNECE/CEPE</p> <p>Máx. 60 mm según EURONCAP</p>
4	<p><b>Aceleraciones en la pelvis</b></p> <p>Fuerza máx. de 6 kN según UNECE/CEPE</p> <p>Fuerza máx. de 4.1 kN según EURONCAP</p>
5	<p><b>Fuerzas en el fémur</b></p> <p>Máx. 9.07 kN a 7.58 kN UNECE/CEPE</p>

Fuente: UNECE/CEPE, 2016

Realizado por: Aguirre, 2024

## **2.9. Método de elementos finitos**

Según, Vázquez & López (2001), manifiesta que, debido a la complejidad de las ecuaciones de gobierno de las estructuras continuas y, en general, de la mayoría de las estructuras se hace imprescindible la utilización del método de los elementos finitos o MEF. Este método determina el comportamiento de una estructura ante las cargas, sustituyendo la solución continua, exacta y en la mayoría de los casos imposible del sistema de ecuaciones diferenciales que conforman el problema elástico por una solución discontinua o discreta y, por tanto, aproximada. Para ello discretiza la estructura, es decir, la divide en elementos no diferenciales, o elementos finitos, interconectados entre sí a través de un determinado número de puntos, que se denominará nodos. Luego de un análisis de cada componente de forma individual, se reconstruye la integridad estructural restaurando tanto el equilibrio como la coherencia en los desplazamientos de los nodos, creando así un conjunto de ecuaciones algebraicas. La resolución del sistema de ecuaciones permite encontrar desplazamientos de los nodos, y a partir de ello, las demás incógnitas de la estructura. Se denomina un método aproximado cuyo grado de proximidad incrementa su precisión a medida que la estructura se divide en un mayor número de elementos, siempre y cuando se aplique de manera correcta (Vázquez & López, 2001, p. 39).

## **2.10. Análisis explícito**

Este tipo de análisis en el método de elemento finito determina la solución de un problema no lineal sin iterar, la solución se da en función del tiempo de manera explícita, es decir, avanza en el tiempo de manera gradual, de modo que la solución en un momento dado se base en la solución del momento anterior. Esto resulta útil para abordar problemas transitorios de cambios rápidos, aunque en ciertas ocasiones pueda llegar a ser inestable o poco eficiente en situaciones donde se requiera una precisión alta, o el intervalo de tiempo sea muy corto (Aguas, 2023).

## **2.11. Análisis no lineal**

Este análisis indica que las ecuaciones que caracterizan el sistema es no lineal, debido a diversos factores como deformaciones considerables, comportamiento no lineal de materiales, condiciones de carga no lineales. Para alcanzar la solución en este tipo de análisis, se necesitan métodos numéricos iterativos en lugar de álgebra lineal (Aguas, 2023).

## **2.12. Mallado**

Al abordar la fase de discretización en el Método de Elementos Finitos (MEF), independientemente de la técnica de mallado empleada, surge un desafío crucial; distribuir los grados de libertad de manera óptima a lo largo del dominio del problema, priorizando las zonas con variaciones eléctricas más abruptas. La distribución efectiva debe garantizar la precisión de la solución con el menor número de incógnitas posible. Una estrategia para lograr la distribución es mediante enfoque adaptativo, que implica generar una malla con pocos elementos, resolver el

problema, estimar el error en la solución obtenida, y reiterar el proceso hasta lograr alcanzar la precisión deseada (Díaz, 2011, p. 2,3).

Para resolver este problema, es necesario utilizar herramientas del MEF clásico y desarrollar estimadores de error para detectar las zonas con mayor error debido a la discretización insuficiente del medio continuo. Posteriormente, se deben diseñar estrategias de refinamiento de esas zonas, y pueden ser de tres tipos (Díaz, 2011, p. 2,3):

h: modifica el tamaño de los elementos de la malla, es decir crea nuevos elementos en donde el error es más pronunciado.

p: modifica el orden del polinomio de la función de interpolación de los elementos.

hp: combina las estrategias h y p.

Para la verificación de calidad de mallado se ha tomado el criterio Jacobiano, que ofrece diversos parámetros para el control de mallado, permitiendo la evaluación de valores que deben cumplir para ser aceptados o rechazados. La Tabla 2-3 muestra las estadísticas recomendadas para una buena calidad de malla.

**Tabla 2-3:** Recomendaciones de calidad de mallado.

	MINIMUM	MAXIMUM	AVERAGE	STANDARD DESVIATION	CORRECT
Element Quality	-4.58E-4	0.999	0.7570	0.2025	1
Aspect Ratio	1	94.942	2.3903	2.1655	1
Jacobian Ratio	1	38.141	1.0829	0.3531	1
Warping Factor	0	0.42	1.1475	0.01389	0
Parallet Desviation	0	135.56	2.4901	7.66	0
Maximum corner angle	62.228	178.71	94.101	9.4292	90 - cuadriláteros
skewness	1.30E-10	0.999	4.82E-2	0.11	0 – 0.25

Fuente: (Aquino et al., 2022)

Realizado por: Aguirre, 2024

### 2.13. Ls-Dyna

ANSYS LS-DYNA sobresale como principal software de simulación explícita en el ámbito industrial, es empleado en algunas aplicaciones tales como: pruebas de caída, análisis de impacto y penetración, simulación de choques y colisiones, así como también evaluar la seguridad de los

pilotos, entre otras. Este programa es esencial para la investigación presente, brindando la capacidad necesaria para explorar y analizar diferentes escenarios relacionados con la dinámica de impacto y seguridad (Ansys, 2023).

LS-DYNA es el principal software empleado en la industria automotriz para considerar los diseños de vehículos, ofrece una predicción del comportamiento de un automóvil durante una colisión. Permite en gran medida a las compañías automotrices evaluar y perfeccionar los prototipos virtualmente, agilizando de esta manera la aprobación en pruebas físicas y obtención de certificaciones, lo que implica un ahorro en tiempo y recursos, este programa además cuenta con una biblioteca que facilita la evaluación numérica de forma rápida como (Vetturazzi, 2020):

- Cinturones de seguridad
- Sensores
- Acelerómetros
- Airbags y
- Modelos de maniqués de pruebas.

### 2.13.1. Pautas para el cálculo mediante análisis MEF

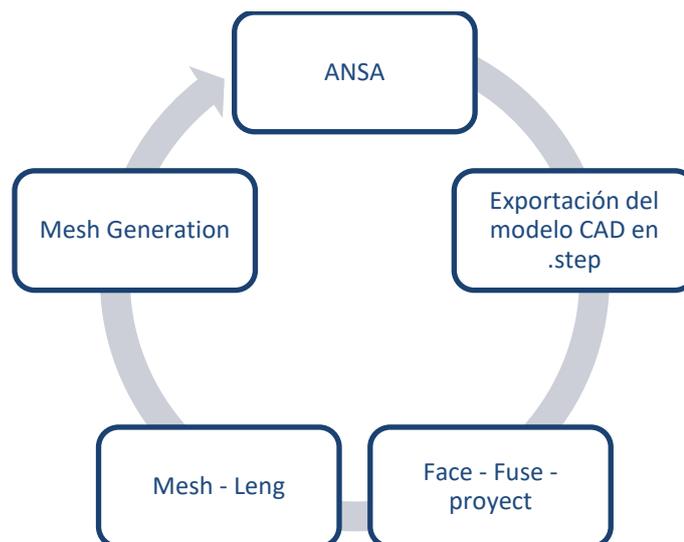
Se debe seguir ciertos pasos para lograr resolver cualquier estudio de impacto.

#### a. Generación del modelo de análisis

Mediante el software SolidWorks se ha realizado el diseño del go kart, el cual contiene elementos sólidos y sobre todo elementos Shell.

#### b. Preprocesamiento en ANSA

El apartado describe cada una de las selecciones para generar la malla de manera adecuada, que es crucial para el desarrollo de la simulación.



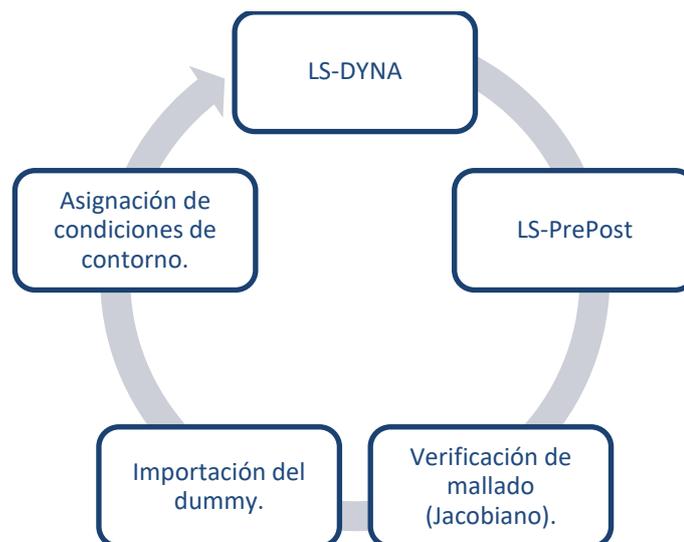
**Ilustración 2-17:** Flujograma de generación de malla mediante ANSA.

Realizado por: Aguirre, 2024

La Ilustración 2-17 permite visualizar los pasos a seguir para la obtención del mallado mediante el software ANSA, una vez generado el mallado de forma automática se verifica que no existan elementos que no se hayan mallado, caso contrario se corrige aquellos errores y se termina con el mallado.

**c. Preprocesamiento en LS-DYNA**

Aquí se requiere ciertos pasos para lograr una simulación adecuada de los tres casos de impactos frontales, para ello se importa el modelo go kart por lo cual es crucial la verificación de calidad de mallado mediante el criterio de Jacobiano, una vez comprobado la calidad y sea eficiente se procede a la asignación condiciones de contorno.

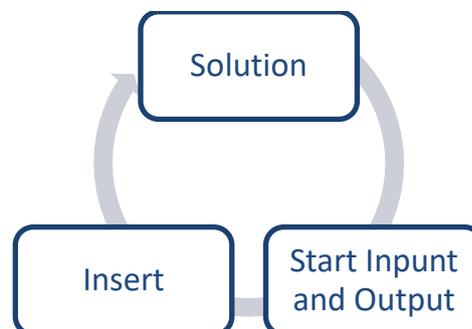


**Ilustración 2-18:** Flujograma del proceso a realizar en LS-DYNA

Realizado por: Aguirre, 2024

**d. Post procesamiento**

Permitió conocer tanto de forma numérica como gráfica los resultados obtenidos a partir de la simulación de los distintos impactos frontales.



**Ilustración 2-19:** Flujograma para el ingreso de soluciones.

Realizado por: Aguirre, 2024

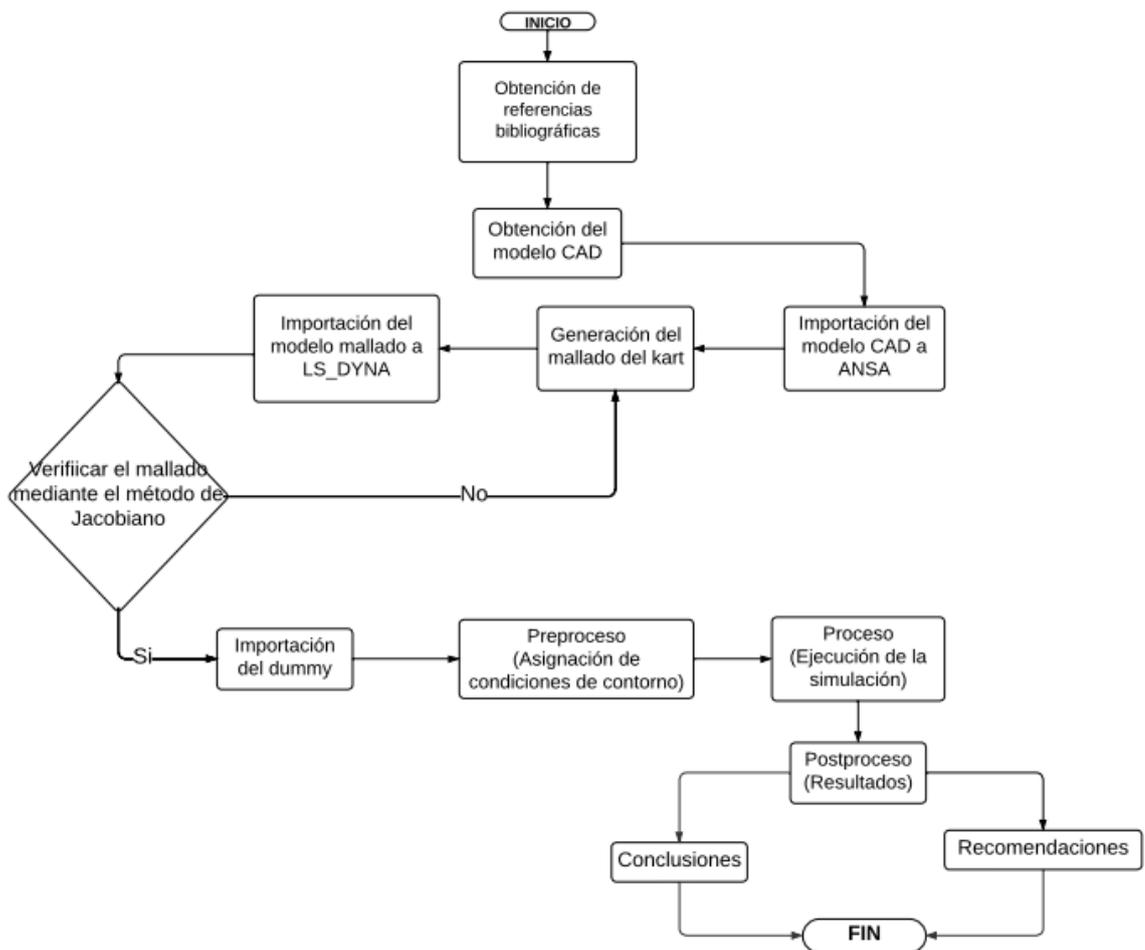
La Ilustración 2-19, es la encargada de explicar la forma en la que se ingresa el tipo de resultados, estos pasos son repetitivos ya que son distintos análisis que se ingresan para obtener resultados.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Ingeniería asistida por computador aplicada al go kart.

El modelo de go kart se realizó mediante el programa de SolidWorks 2022, software especializado en diseño mecánico CAD 2D/3D, mediante el cual permite representar de manera virtual los distintos componentes que conforma la parte mecánica del go kart como es el chasis, neumáticos, volantes, etc. Los componentes están formados por partes tipo superficies (Shell) y sólidos (beam), esto permite obtener resultados de esfuerzos y deformaciones bastante cercanos a la realidad.



**Ilustración 3-1:** Estructura del proyecto.

Realizado por: Aguirre, 2024

### 3.2. Etapas de simulación

Para realizar el análisis computacional se llevó a cabo cuatro etapas:

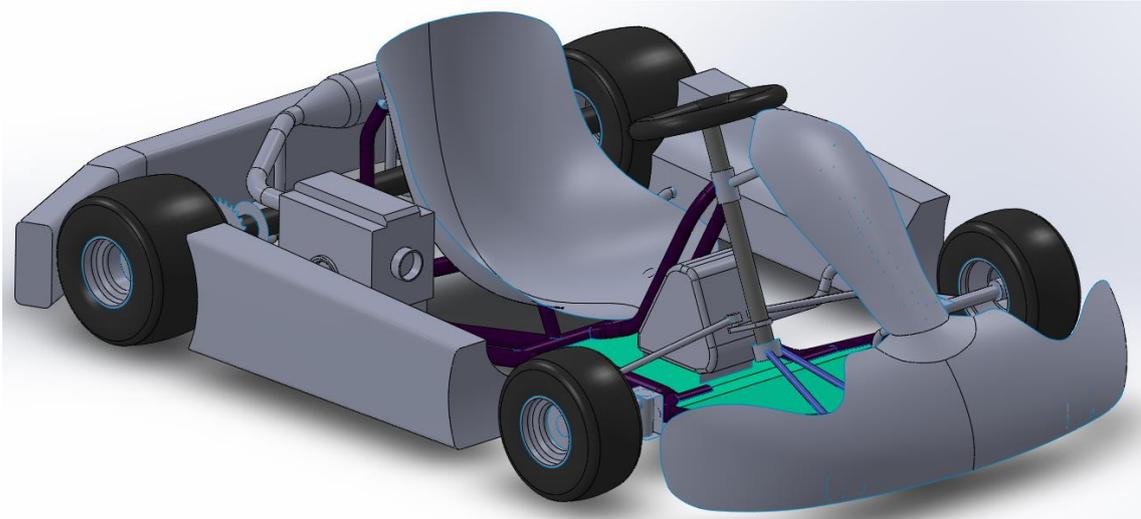
**Tabla 3-1:** Etapas de simulación

Modelado CAD	Se utilizó información de medidas estándar de go karts de la facultad de Mecánica como base para crear un modelo del go kart.
Pre procesamiento	<p>El mallado del go kart se basó en elementos tipo Shell con una distancia entre nodos de 20 mm teniendo en cuenta el criterio de Jacobiano donde no superará un valor de 0.4. Las implementó condiciones de contorno como materiales, velocidad, gravedad, etc.</p> <p>El modelo de dummy utilizado corresponde a un híbrido III – percentil 50 masculino, proporcionado por LSTC para LS_DYNA, el modelo ya pre-mallado y equipado con acelerómetros, posibilitará la evaluación del comportamiento del maniquí de manera precisa.</p> <p>El resto de las condiciones de contorno como velocidad, gravedad, etc., que permite replicar el ensayo se encuentra en la sección 3.2.2 del documento.</p>
Solución del código K	Para dar solución al código K, se ejecutó desde el manager, en donde se sube el documento en extensión .K que posee el documento discretizado.
Post procesamiento	<p>Finalizada la simulación en manager, se obtuvo los resultados en LS-DYNA en donde involucró la interpretación de graficas.</p> <p>Esta última etapa se ve reflejada en el capítulo IV Análisis de resultados.</p>

Realizado por: Aguirre, 2024

#### 3.2.1. Etapa 1: Modelado CAD

El modelado del go kart se llevó a cabo fundamentado en medidas obtenidas de go karts pertenecientes a la Facultad de Mecánica. Estas medidas, recopiladas y analizadas, sirvieron como base para diseñar un chasis que no solo incorpora la experiencia y la calidad de estos go kart, buscando optimizar el rendimiento y la eficiencia del nuevo modelo desarrollado.



**Ilustración 3-2:** Modelado del go kart en SolidWorks

Realizado por: Aguirre, 2024.

**Tabla 3-2:** Dimensiones globales del go kart

Dimensiones	[mm]
Distancia entre ejes	1100 mm
Largo total	2005 mm
Ancho	1376 mm
Altura	627 mm

Realizado por: Aguirre, 2024

### 3.2.2. Etapa 2: Preprocesamiento

Las simulaciones que se realizó fueron de choque frontal contra una pared rígida, contra un la parte frontal de un go kart en posición rígida, y contra la parte posterior del go kart en posición rígida, en donde se aplicó una velocidad teórica de 50 Km/h para las respectivas colisiones. Esta velocidad se ha tomado en cuenta de acuerdo a dos investigaciones previas obtenidas, en donde Grzebieta et. al., (2014) reconstruyó dos accidentes y de acuerdo a ello realizó las pruebas de choque a 50 Km/h, mientras que Sinchi (2023), realizó pruebas con kart mecánico y eléctrico que mediante un dispositivo llamado VBOX sport determinó potencia, torque, velocidad, aceleración, entre otras, en donde la velocidad promedio radica en 59,90 Km/h. De esta manera se ha considerado una velocidad de choque de 50 Km/h.

Es imprescindible definir previamente las unidades, puesto que LS-DYNA, al igual que la mayoría de los programas de elementos finitos, no trabaja con unidades, sólo con números, por este motivo hay que ser coherente con ellas. Las unidades empleadas en este modelo se muestran en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3 :** Unidades de medida del modelo.

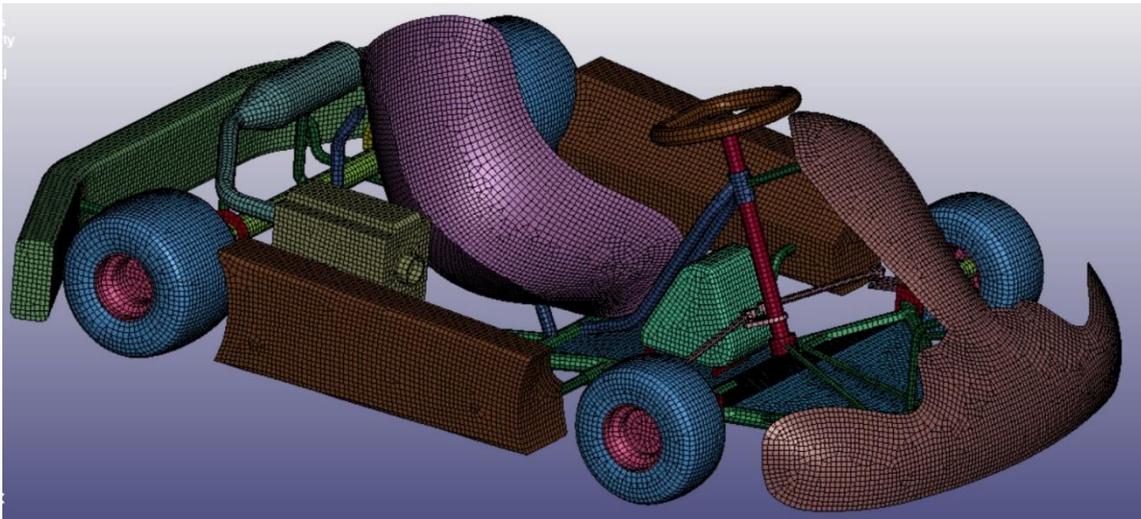
Magnitud	Unidad en medida
Longitud	mm
Masa	Kg
Tiempo	s
Fuerza	KN

Realizado por: Aguirre, 2024

### 3.2.2.1. Generación de malla

La generación del mallado se llevó a cabo utilizando el software ANSA Prepost. La elección de esta herramienta se basó en la capacidad para proporcionar facilidad y sobre todo eficiencia en la creación del mallado, este software brindó flexibilidad óptima para realizar un mallado preciso y detallado del go kart, permitiendo de esta manera una representación óptima para el análisis y simulación de este proyecto.

Además se debe tomar en cuenta que el tamaño del mallado es muy importante, entre menor sea el tamaño de elementos mayor será la calidad y sobre todo el costo computacional.

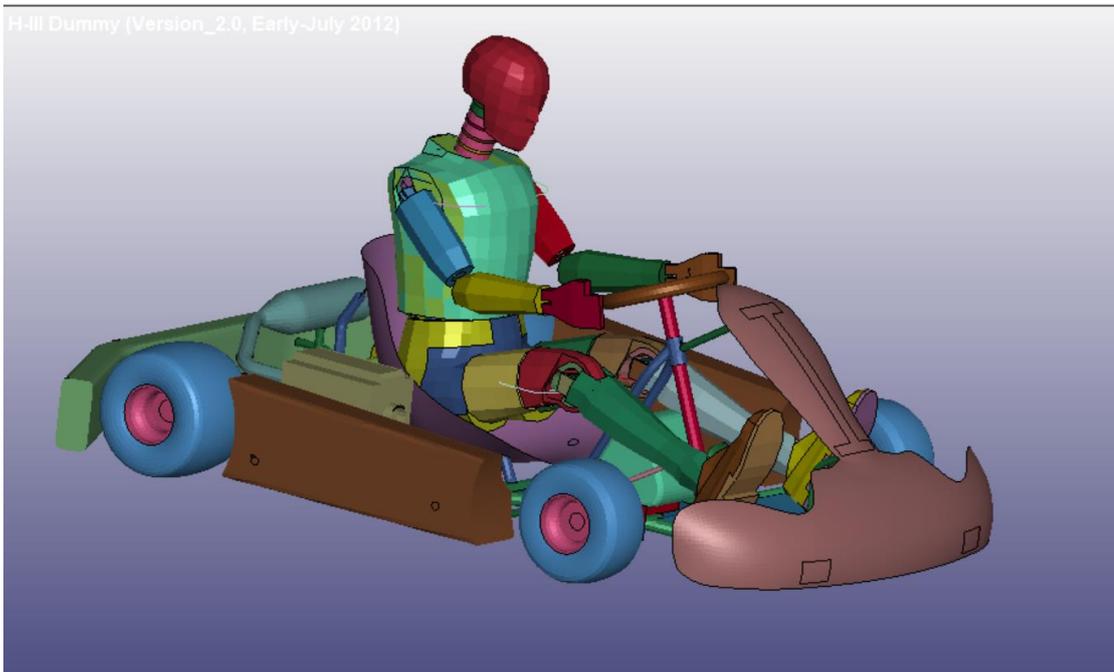


**Ilustración 3-3:** Generación del mallado en ANSA Prepost

Realizado por: Aguirre, 2024

### 3.2.2.2. Ingreso del dummy

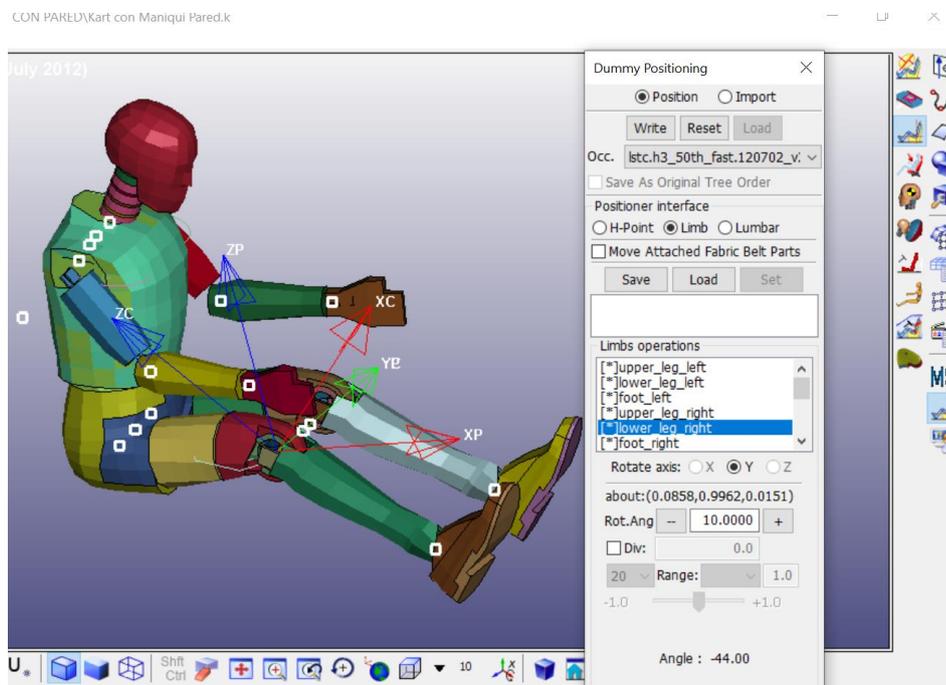
El dummy puede moverse en distintas direcciones como: horizontal, vertical o diagonal e incluso posee facilidades de movimiento corporal, para colocarlo con mayor facilidad dentro del go kart, las coordenadas evita que el dummy choque o tenga problemas con la estructura del go kart.



**Ilustración 3-4:** Posicionamiento del dummy en el go kart en LS-Prepost.

Realizado por: Aguirre, 2024

Las características del movimiento que pueden ser modificables del dummy son la posición y rotación de la cabeza como de sus partes superiores e inferiores permitiendo que adquiera una postura natural similar o igual a la del piloto real.

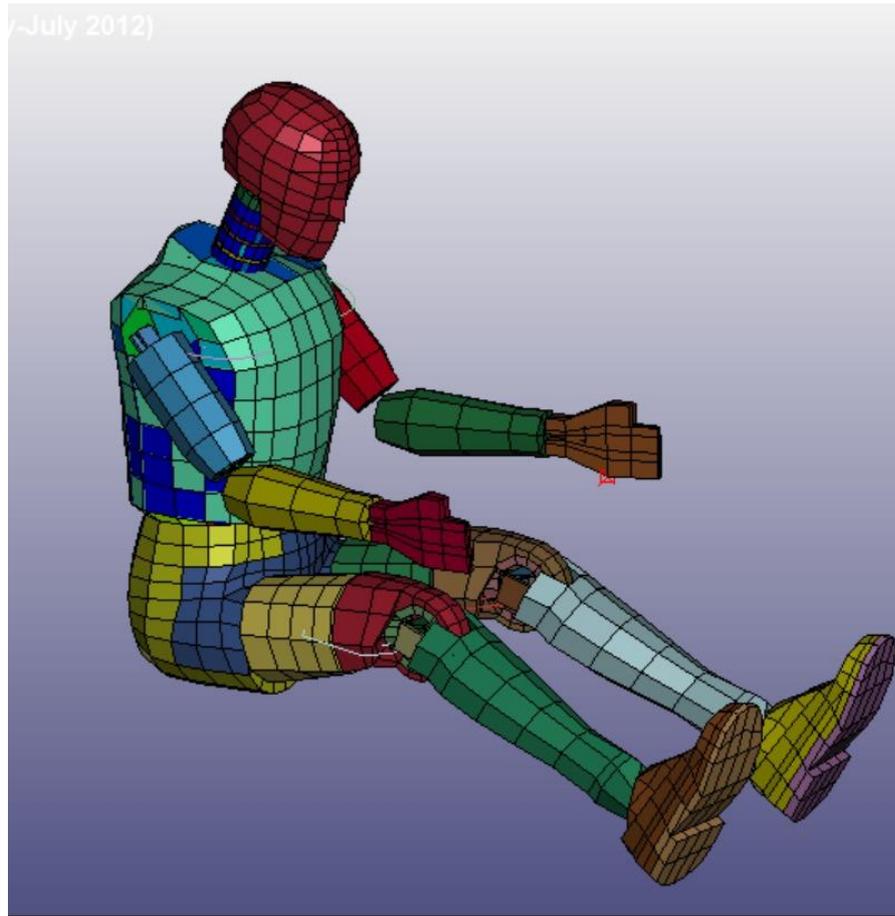


**Ilustración 3-5:** Selección de movimientos del dummy LS-Prepost.

Realizado por: Aguirre, 2024

### 3.2.2.3. *Mallado del dummy*

El dummy posee algunos tipos de malla para imitar conexiones reales firmes, incluyendo conexiones elásticas similares a resortes que representan condiciones naturales del dummy, además cuenta con sensores de aceleración colocados en áreas vulnerable como la cabeza, el pecho, el abdomen y la pelvis, cruciales para medir aceleraciones, fuerzas, y deformaciones en zonas propensas a lesiones. El mallado del dummy masculino híbrido III de percentil 50 es el resultado de una colaboración entre el Centro Nacional de Análisis de Choques (NCAC) de la Universidad de George Washington y LSTC distribuido por LS\_DYNA.



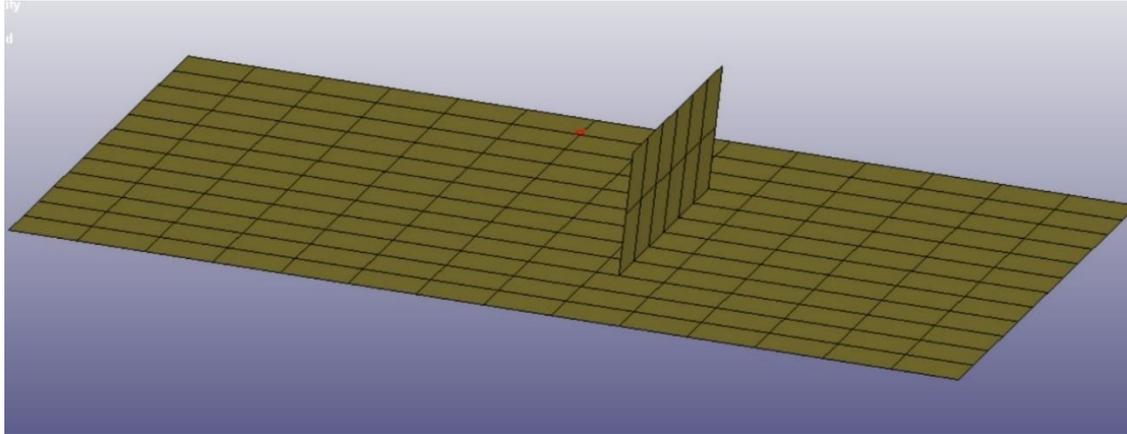
**Ilustración 3-6:** Mallado del dummy en LS-Prepost.

**Fuente:** Ansys LSTC, 2023

**Realizado por:** Aguirre, 2024

### 3.2.2.4. *Mallado de la pared de impacto*

En la pared se utilizó el tamaño de malla adecuado permitiendo eliminar el costo computacional innecesario, mejorando de esta manera el tiempo de respuesta de la simulación, la pared cuenta con una altura de 1.5 metros y cubre el ancho del go kart.

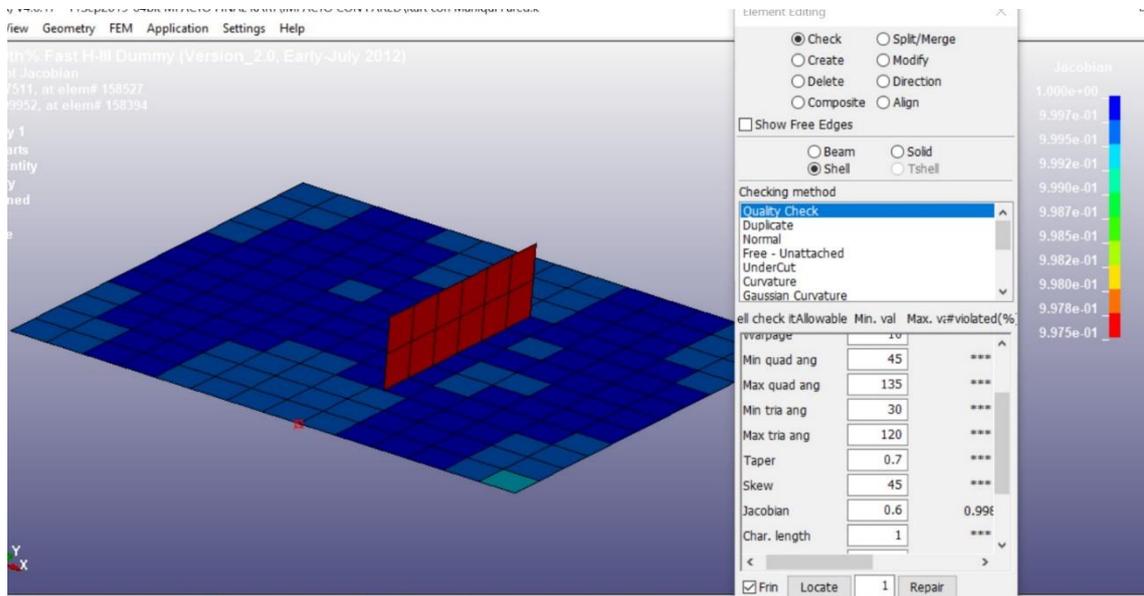


**Ilustración 3-7:** Malla de la pared de impacto en LS-Prepost.

Realizado por: Aguirre, 2024

### 3.2.2.5. Calidad de malla

El empleo del criterio de Jacobian permitió asegurar la fiabilidad de la calidad de la malla, una malla de buena calidad es crucial ya que garantiza que el estudio realizado se aproxime más a la realidad. Con este criterio se establece un valor mínimo de 0,3 para aceptar el mallado, recomendado especialmente por LS DYNA. De esta manera, se verifica que el diseño cumple con el estándar, asegurando un mallado de alta calidad.



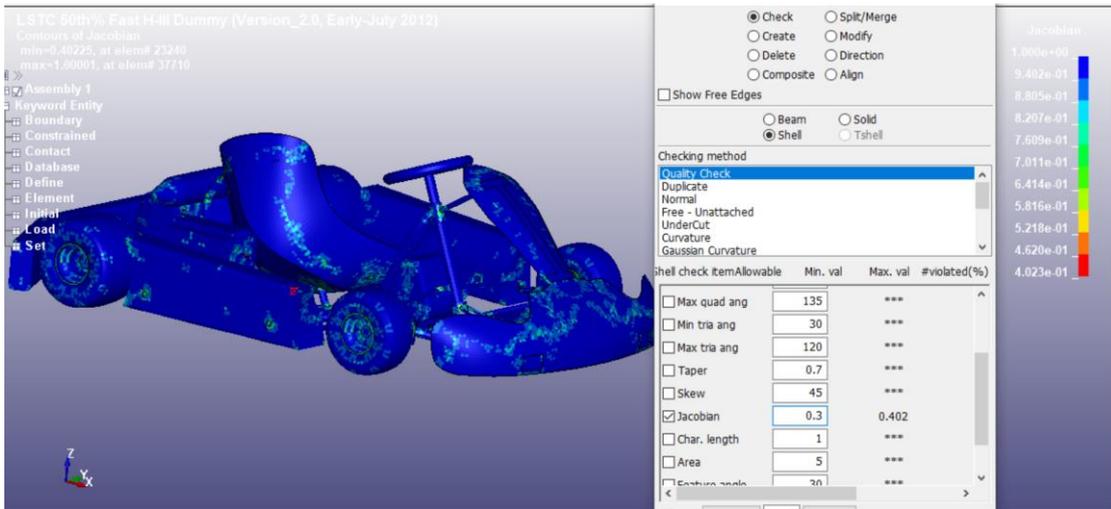
**Ilustración 3-8:** Calidad de mallado de la pared de impacto en LS-Prepost.

Realizado por: Aguirre, 2024

**Tabla 3-4:** Propiedades del mallado de la pared de impacto.

Propiedad	Cantidad o descripción
Número de elementos	180
Índice de calidad de jacobiano	0.9
Tipo de elemento	Shell 2D cuadrilátero y rectangular

Realizado por: Aguirre, 2024



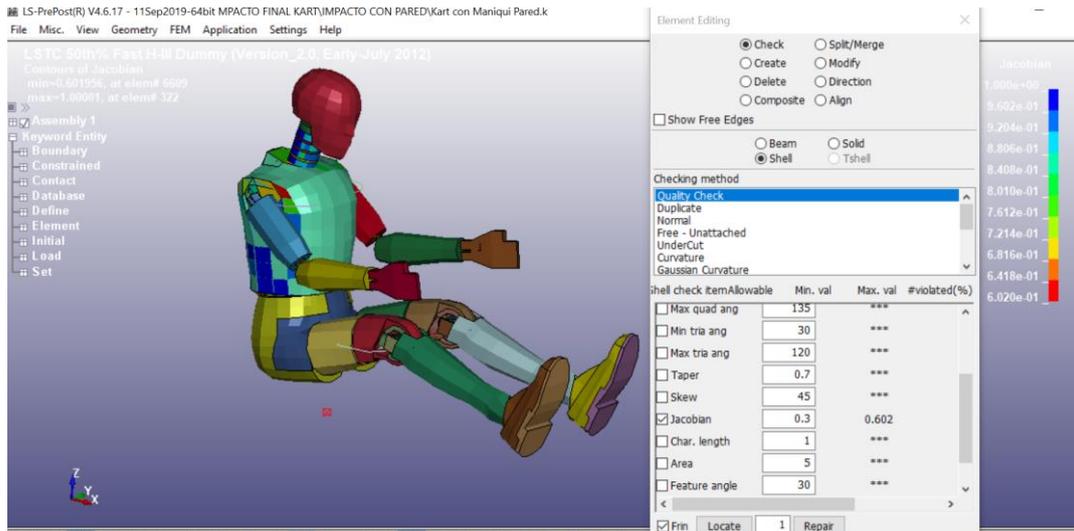
**Ilustración 3-9:** Calidad del mallado del go kart en LS-Prepost.

Realizado por: Aguirre, 2024

**Tabla 3-5:** Propiedades del mallado del go kart.

Propiedad	Cantidad o descripción
Número de elementos	68685
Índice de calidad de jacobiano	0.402
Tipo de elemento	Shell 2D cuadrilátero y rectangular

Realizado por: Aguirre, 2024



**Ilustración 3-10:** Calidad de mallado del dummy en LS-Prepost.

Realizado por: Aguirre, 2024

**Tabla 3-6:** Propiedades del mallado del dummy.

Propiedad	Cantidad o descripción
Número de elementos	4278
Índice de calidad de jacobiano	0.602
Tipo de elemento	Shell 2D cuadrilátero y rectangular

Realizado por: Aguirre, 2024

### 3.2.2.6. Cartas de control para materiales

El material utilizado tanto en las partes mecánicas como la carrocería se encuentra como: PIECEWISE LINEAR PLASTICITY, el cual presenta un comportamiento elástico – plástico, donde la tensión aumenta proporcionalmente a la deformación hasta alcanzar un límite elástico, más allá de este punto, el material entra en una etapa plástica, perdiendo la relación lineal entre tensión y deformación. Durante la colisión este material presenta altas concentraciones de energía cinética que se traduce en deformaciones.

En la Tabla 3-7, se muestra las características del material incluidas en el modelo.

**Tabla 3-7:** Materiales designados a distintas partes del modelo.

Carta de control	Características del material	Elemento
024-PIECEWISE LINEAR PLASTICITY	Densidad: 1.415E-06 kg/mm <sup>3</sup> Módulo de elasticidad: 1 GPa Relación de poisson: 0.3 Esfuerzo de fluencia: 0.02 GPa	Guardachoque
	Densidad: 2.25E-06 kg/mm <sup>3</sup> Módulo de elasticidad: 1 GPa Relación de poisson: 0.3 Esfuerzo de fluencia: 0.02 GPa	Tanque
	Densidad: 7.83E-06 kg/mm <sup>3</sup> Módulo de elasticidad: 207 GPa Relación de poisson: 0.3 Esfuerzo de fluencia: 0.27 GPa	Chasis

Realizado por: Aguirre, 2024

### 3.2.2.7. Carta de control para velocidad

La velocidad se define en LS- DYNA de algunas maneras, pueden ser aplicando directamente sobre nodos, aplicándola sobre partes del go kart, etc. En este caso se ha definido la velocidad de una manera sencilla, aplicándola sobre todos los nodos, ya que de esta manera se pueden tomar en cuenta los nodos exteriores del dummy. El comando usado en LS-DYNA es INITIAL-VELOCITY. (Gálvez, 2011)

Como ya se ha indicado en la parte inicial de este trabajo se ha determinado realizar a una velocidad de 50 Km/h para impactos frontales.

The image shows a screenshot of the 'Keyword Input Form' in LS-Prepost. At the top, there are buttons for 'NewID', 'Draw', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these are checkboxes for 'Use \*Parameter' and 'Comment', and a 'Setting' button. The main area displays the command '\*INITIAL\_VELOCITY (1)'. Below the command, there are two rows of input fields. The first row contains fields for 'NSID' (value: 179), 'NSIDEX' (value: 0), 'BOXID' (value: 1), 'IRIGID' (value: -1), and 'ICID' (value: 0). The second row contains fields for 'VX' (value: 13.800000), 'VY' (value: 0.0), 'VZ' (value: 0.0), 'VXR' (value: 0.0), 'VYR' (value: 0.0), and 'VZR' (value: 0.0).

**Ilustración 3-11:** Velocidad de 50 Km/h para impactos frontales en LS-Prepost.

Realizado por: Aguirre, 2024

#### 3.2.2.8. *Fuerza gravitacional*

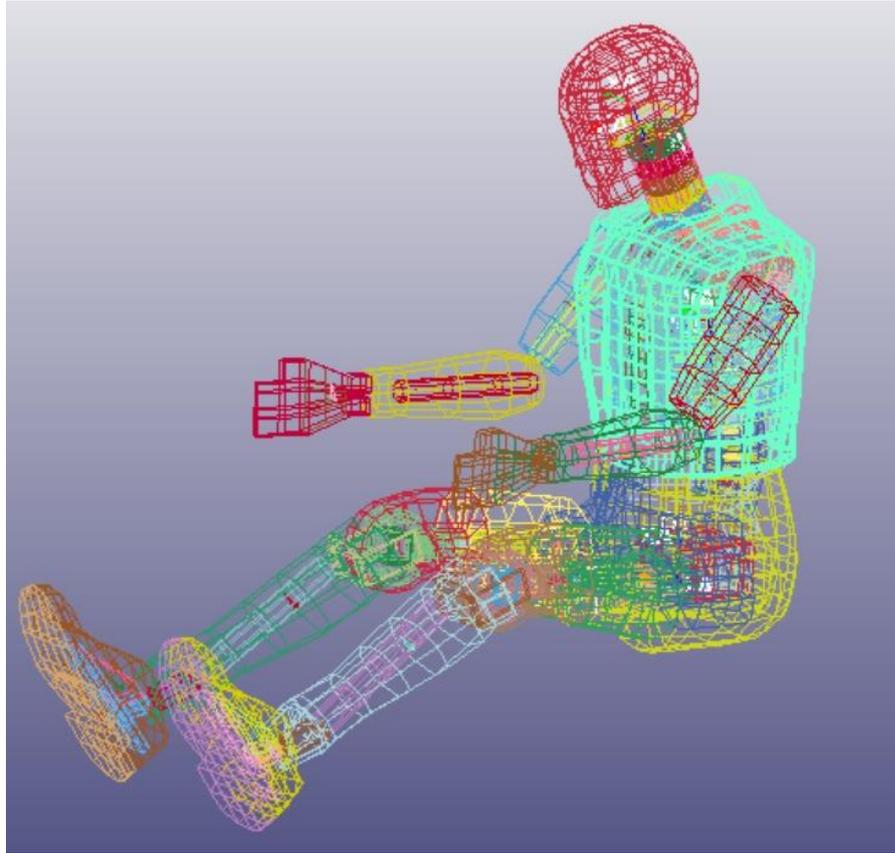
El valor de la gravedad es muy importante en esta investigación ya que actúa directamente tanto sobre el go kart como del dummy, esta gravedad se introdujo como una aceleración en dirección vertical y sentido hacia abajo, y el comando utilizado es: LOAD-BODY-Z.

Es crucial identificar los signos, ya que en este software una aceleración positiva vertical causa que los cuerpos caigan hacia el suelo, lo que implicaría que la aceleración de  $9.81 \text{ m/s}^2$  causara que los cuerpos caigan a la tierra, de igual manera ocurre para las aceleraciones de los otros ejes. Entonces, se estable la aceleración como una constante con un valor positivo de  $0.00981 \text{ mm/ms}^2$ , manteniendo coherencia con las unidades utilizadas, esta constante se aplica a todos los nodos tanto del go kart como del dummy. (Gálvez, 2011)

#### 3.2.2.9. *Acelerómetros*

Los acelerómetros son dispositivos que permiten la medición de aceleraciones y fuerzas en diferentes partes del maniquí, se instalan en varias secciones de su estructura con el fin de registrar las aceleraciones y fuerzas particulares de cada área. Por lo general, se sitúan en la cabeza, el tórax y la pelvis.

En el LS – DYNA los acelerómetros se encuentran en forma de cubo proporcionada por la herramienta ELEMENT\_SEATBELT\_ACCELEROMETER por lo que lleva asociado un eje de coordenadas local definido por los ejes XA, YA y ZA y un origen. Estos acelerómetros virtuales, que se modelan en forma de cubo, recogen la información necesaria durante la simulación, para después, en el postproceso, obtener la variación de la aceleración con respecto al tiempo. (Gálvez, 2011)



**Ilustración 3-12:** Designación de acelerómetros del dummy en LS-Prepost.

Realizado por: Aguirre, 2024

#### 3.2.2.10. Carta de control de contactos definidos

Para generar los contactos, en primer lugar se creó un set de partes.

- CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE. Este tipo de contacto es automático define la unión entre las diferentes partes del go kart. Los contactos automáticos se recomiendan para la mayoría de las simulaciones explícitas.
- CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE. Define el contacto entre el go kart y el dummy. En cada uno de los componentes del modelo, se ha generado un grupo de elementos que contiene las partes que estarán en contacto con el otro componente del modelo en el momento de la colisión.

#### 3.2.2.11. Condiciones utilizadas en el modelo

Las condiciones utilizadas en todo el modelo desde el kart e incluido la incorporación del dummy se especifica en la Ilustración 3-13.

Keyword Manager ✕

Keyword Edit Keyword Search

Edit:  Edit

Model  All RefBy

Name	Count
BOUNDARY	1
CONSTRAINED	380
CONTACT	39
CONTROL	13
DATABASE	30
DEFINE	252
ELEMENT	147800
HOURGLASS	22
INITIAL	2
KEYWORD	1
LOAD	1
MAT	264
NODE	150213
PART	335
SECTION	272
SET	174
TITLE	1

**Ilustración 3-13:** Cartas de control utilizadas en el modelo.

**Tabla 3-8:** Condiciones utilizadas para los distintos impactos.

CONDICIONES	DETALLE
CONSTRAINED_JOINT	Utilizado para formar juntas
CONSTRAINED_NODAL RIGID BODY	Utilizado para la unión de las partes
HOURGLASS	Control de expansión de energía de los elementos
DEFINE_CURVE	Define la curva del material utilizado
INITIAL	Asigna la velocidad al elemento
KEYWORD_	Comando que inicia la simulación

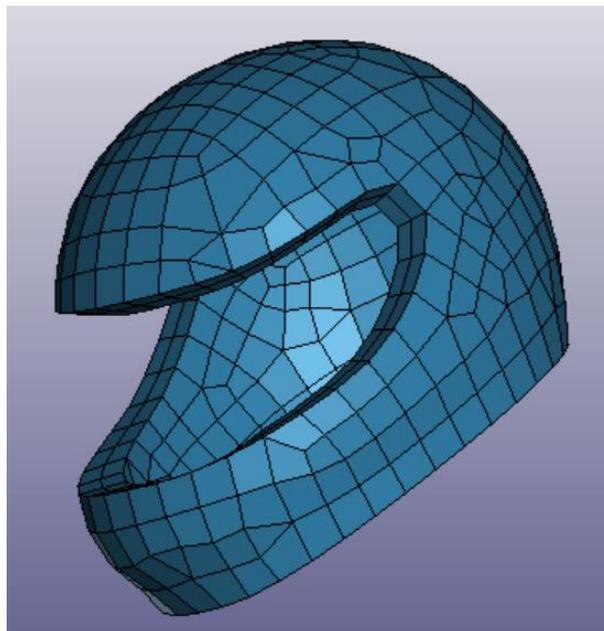
TIMESTEP	Controla los pasos de tiempo y los ciclos de solución de los modelos
NODE	Genera nodos
BOUNDARY SPC	Restringe desplazamiento y rotación de todos los ejes.
PART	Asigna partes para proporcionarles propiedades
SECTION	Asigna propiedades a las partes
SET	Asigna conjunto de nodos, partes y segmentos
TITLE	Asigna título al modelo de la simulación

Fuente: LS- DYNA. Keyword User's Manual

Realizado por: Aguirre, 2024

### 3.2.2.12. Incorporación de casco

El modelado de elementos finitos del casco bajo impacto incluye cuatro componentes: la carcasa exterior del casco, la espuma del casco, la forma de la cabeza y los yunques (bordillo y plano). No se consideró el forro de confort en el modelo, ya que se estima que no afecta la respuesta de la cabeza durante un impacto.



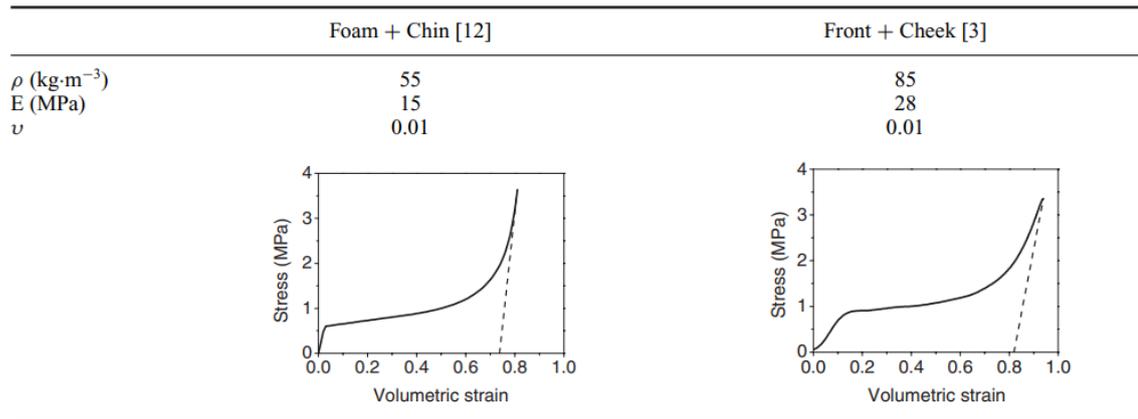
**Ilustración 3-14:** Casco utilizado para simulaciones.

Realizado por: Aguirre, 2024

La geometría de la carcasa exterior del casco fue diseñada en un archivo de diseño asistido por computadora (CAD). La carcasa exterior se malló con 1144 elementos de carcasa, la espuma se malló con 746 elementos de ladrillo, con un grosor de 10 mm. Se prestó especial atención a la malla de la espuma debido a su geometría compleja.

### Material

En el casco en cuestión, la espuma está compuesta por EPS de dos densidades diferentes. Según se ilustra en la Ilustración 3-14, la densidad en el frente y las mejillas es de  $85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , mientras que en otras partes es de  $55 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .



**Ilustración 3-15:** Propiedades mecánicas de la espuma del casco.

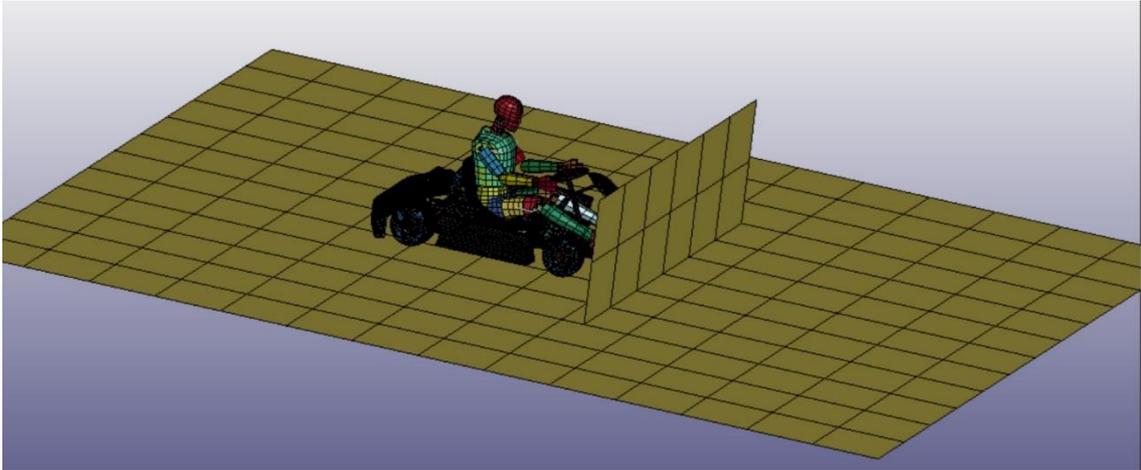
**Fuente:** Tinard, Deck y Willinger, 2012

El modelo de material fue implementado en LS-DYNA utilizando “MAT CRUSHABLE FOAM”. Las funciones de esfuerzo versus deformación volumétrica para ambos tipos de poliestireno expandido (EPS) fueron introducidas. Las propiedades mecánicas de los EPS considerados provienen de experimentos documentados.

### 3.3. Estudios de casos

#### 3.3.1. CASO 1: Impacto frontal contra pared rígida

Durante esta simulación, se recreó un escenario donde un go kart colisiona frontalmente contra una pared rígida. El objetivo principal fue determinar las lesiones que sufre el piloto en caso de un impacto de esta naturaleza. Utilizando el modelo de simulación detallado, se obtuvo la respuesta del kart y las fuerzas involucradas en el choque. Este análisis permitió determinar las posibles lesiones y los puntos críticos de impacto que podrían afectar al conductor en una situación real.

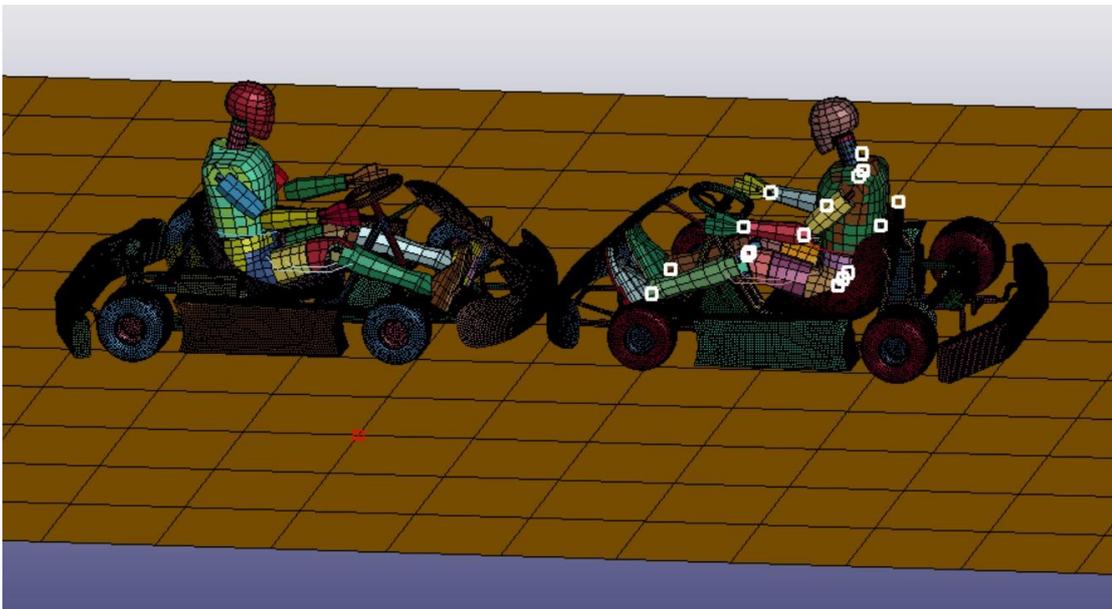


**Ilustración 3-16:** Representación de choque frontal con pared rígida.

**Realizado por:** Aguirre, 2024

### 3.3.2. CASO 2: *Impacto frontal – frontal estático con piloto*

En este caso, se llevó a cabo una simulación específica que involucra el choque frontal de un kart contra la parte trasera de otro kart en una posición estática, utilizando un dummy para presentar al piloto. El objetivo era evaluar las fuerzas y las lesiones resultantes en una colisión de este tipo. A través de esta simulación, se examinaron los efectos del impacto en el dummy, permitiendo analizar las lesiones potenciales en una situación similar en la realidad.

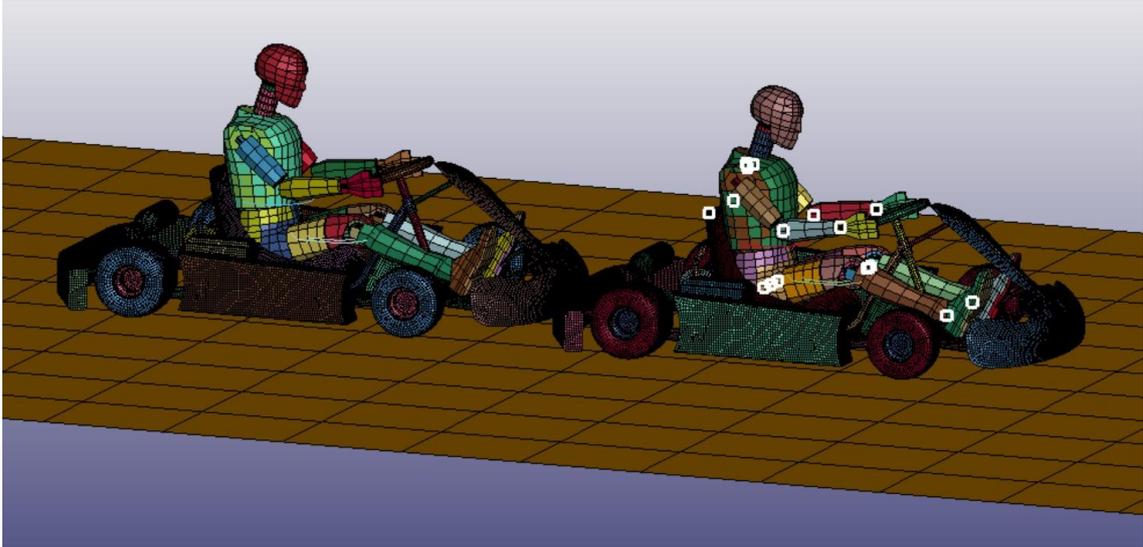


**Ilustración 3-17:** Go kart contra la parte frontal de un go kart con pasajero estático.

**Realizado por:** Aguirre, 2024

### 3.3.3. CASO 3: Impacto frontal – posterior estático con piloto

Esta simulación se enfocó en recrear un escenario donde un kart impacta frontalmente contra la parte posterior de otro kart, utilizando un dummy para representar al piloto. El propósito fue evaluar las posibles lesiones y los efectos de un choque de este tipo en términos de fuerzas aplicadas y áreas de impacto críticas. Al analizar detalladamente esta situación mediante simulación, se pudo determinar con mayor precisión las lesiones que podrían sufrir los pilotos en una colisión frontal – posterior entre karts.

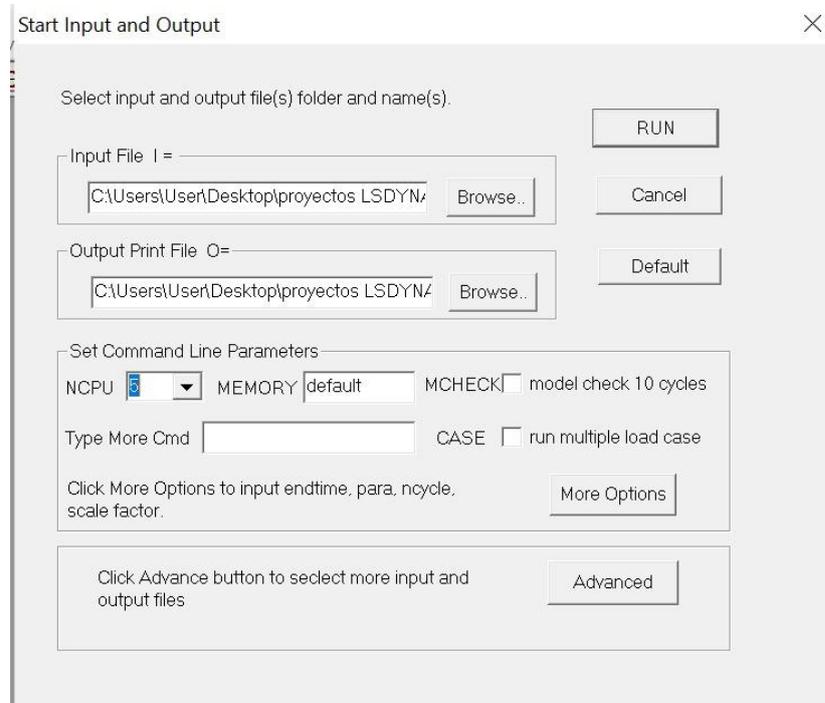


**Ilustración 3-18:** Go kart contra la parte posterior de un go kart con pasajero estático.

**Realizado por:** Aguirre, 2024

### 3.3.4. Etapa 3: Solución código K

Desde el manager de LS-DYNA, se cargó los códigos en extensión .K, en donde el Input File se carga el código discretizado y en Set Command Line Parameters NCPU se colocó los cores disponibles de acuerdo a la computadora, en este caso se colocó 5, ver Ilustración 3-15.



**Ilustración 3-19:** LS-DYNA Program Manager Solver.

**Realizado por:** Aguirre, 2024

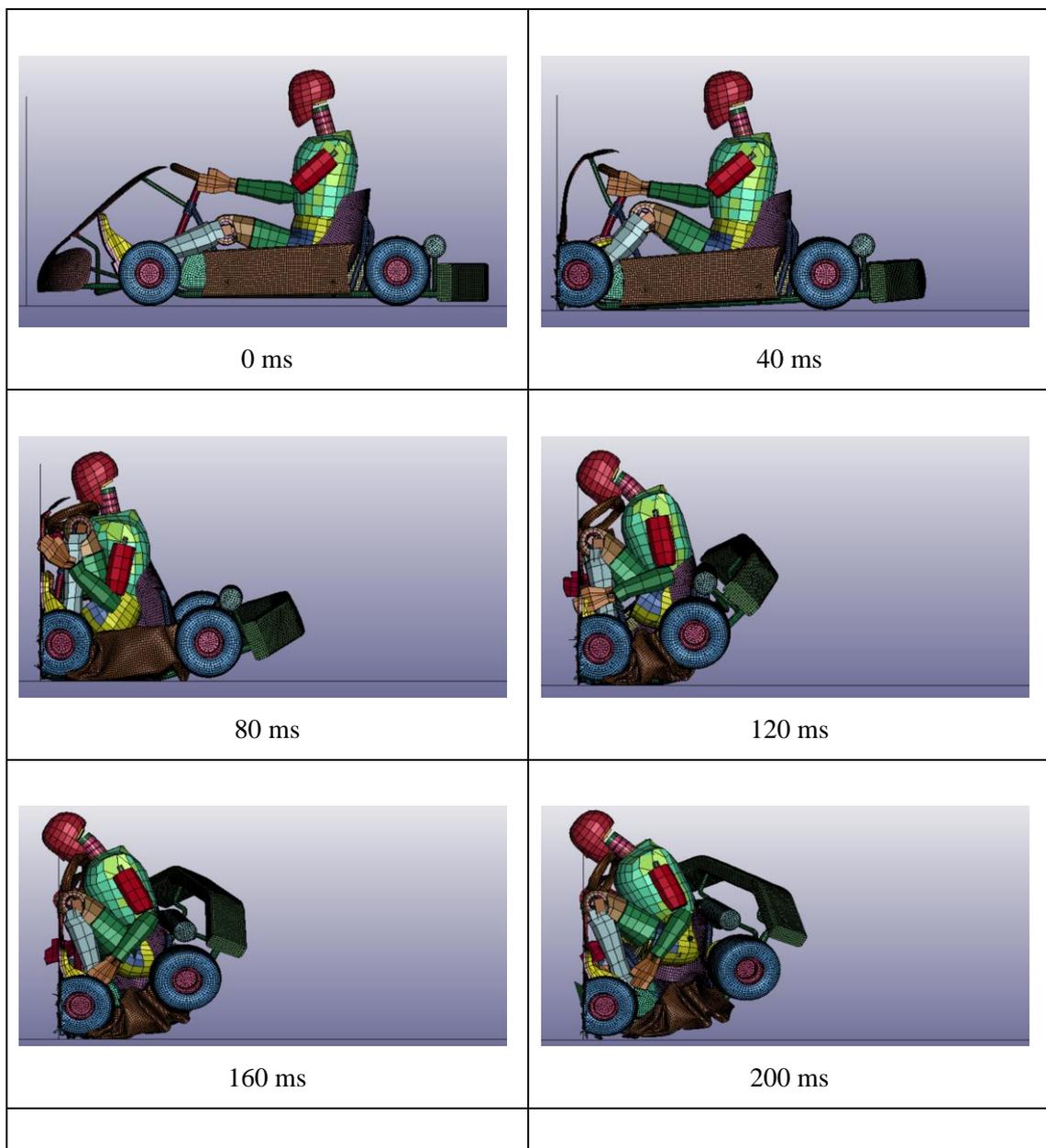
## CAPÍTULO IV

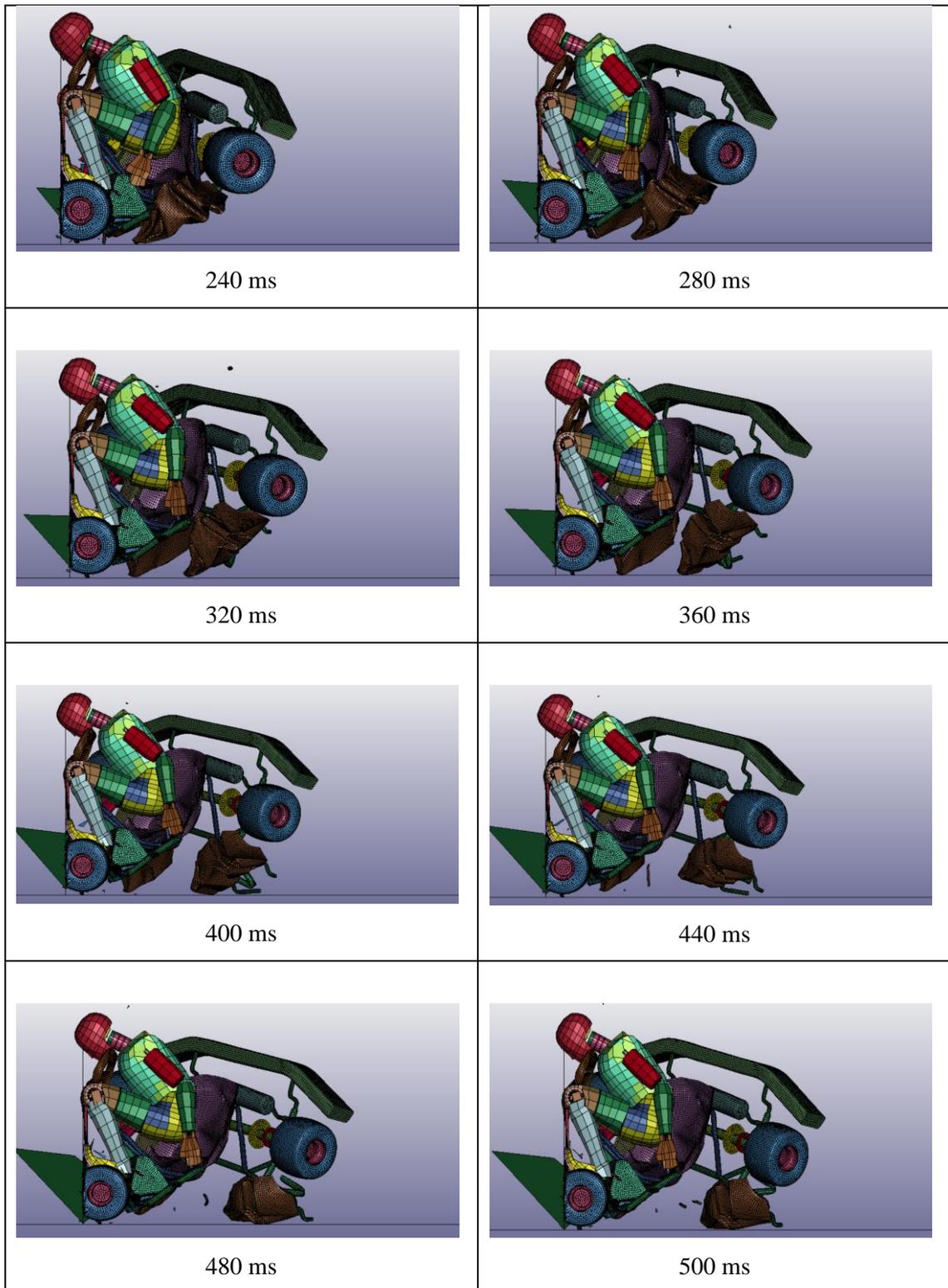
### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Resultados caso 1: Impacto frontal contra pared rígida

Los resultados se muestran gracias al procesamiento de datos del paquete informático LS-DYNA permitiendo controlar las variables independientes y dependientes interactuantes en la simulación, de esta manera se puede observar la interacción del impacto para medir el nivel de lesiones del dummy masculino híbrido III, se realizó la simulación del impacto contra una barrera a una velocidad de 50 km/h, obteniendo lesiones de tipo leves y graves en el cuello y cabeza, que podrían ser permanentes o no y requerirán rehabilitación física; estos datos se compararan con el criterio R94 para determinar la existencia de estas lesiones.

**Tabla 4-1:** Secuencia del impacto frontal contra barrera a 50 Km/h.





Realizado por: Aguirre, 2024

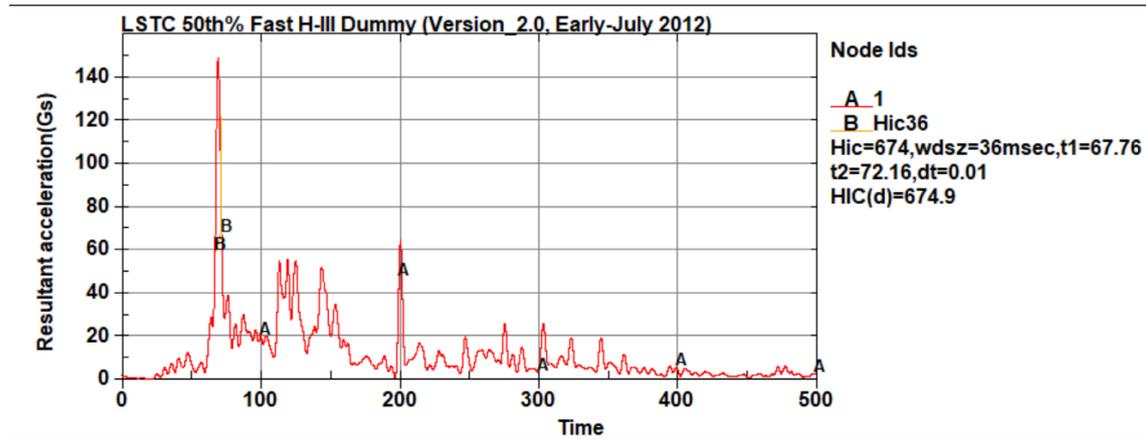
#### 4.1.1. Criterios de lesiones del dummy a 50 km/h, según R94.

Se analizó los criterios de lesiones establecidos en las normas donde se presenta un rango de medición del índice de lesiones, por lo tanto, se describe y compara los datos obtenidos con los reglamentos CEPE, R94, a continuación.

#### 4.1.1.1. Criterio de lesiones en la cabeza HIC según R94.

Según el reglamento R94, el comportamiento de la cabeza (HPC, head performance criterion) no será superior a 1000 y la aceleración resultante de la cabeza no superará los 80 g durante más de 3 ms.

Se obtuvo un valor máximo de HIC de 674 con una aceleración de 144 g como se muestra en la Ilustración 4-2, a continuación, por lo que se deduce que existe lesiones graves en la parte frontal de la cabeza.



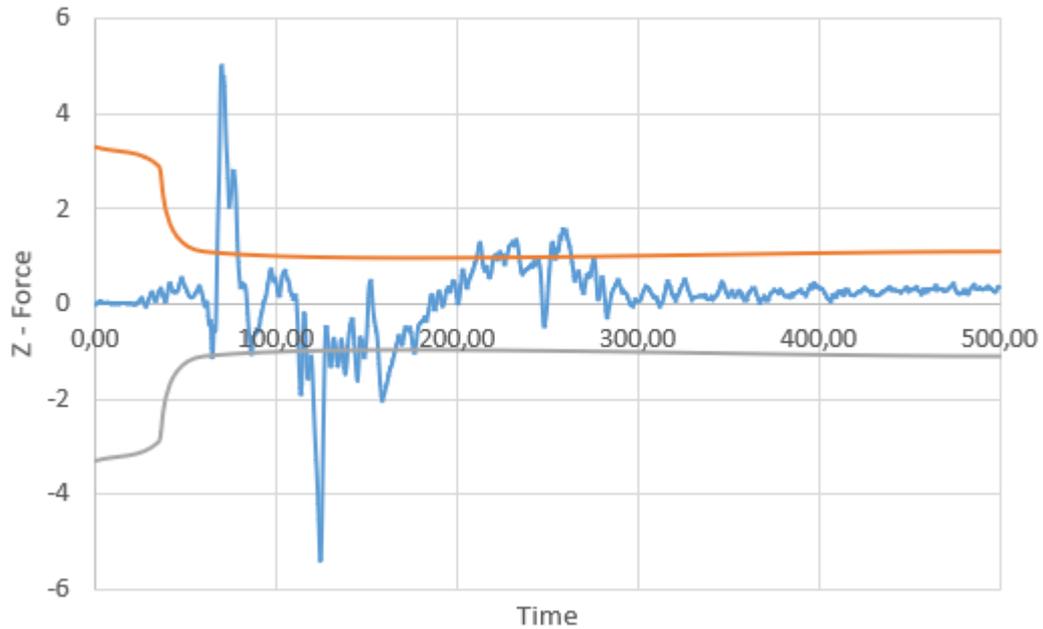
**Ilustración 4-1:** HPC, en la cabeza del dummy a 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

#### 4.1.1.2. Criterio de lesiones del cuello según R94.

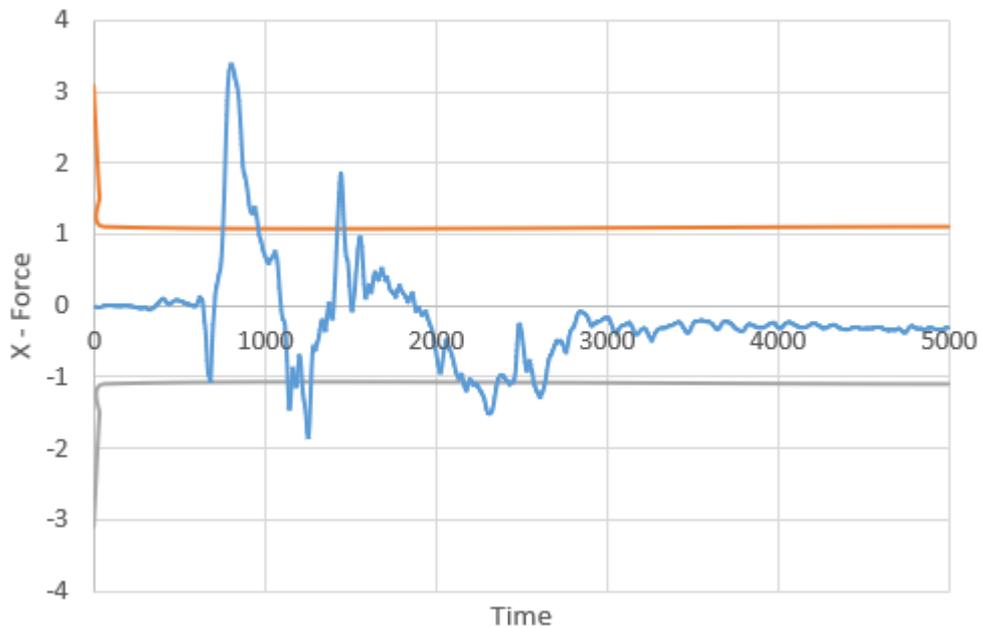
De acuerdo al reglamento R94, el criterio de lesión del cuello (NIC, Neck Injury Criteria) no superará los valores mostrados en las Ilustraciones 2-14, 2-15.

Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza en Z la cual según LSTC Hybrid III 50th Fast Dummy Positioning & Post-Processing indica la fuerza de tracción del cuello, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el cuello sale de los límites permitidos, indicando que las lesiones son de tipo graves.



**Ilustración 4-2:** Fuerza de tracción en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.  
 Realizado por: Aguirre, 2024

Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza en X la cual según LSTC Hybrid III 50th Fast Dummy Positioning & Post-Processing indica la fuerza de cizalladura del cuello, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el cuello sale de los límites permitidos, indicando que las lesiones son de tipo graves.

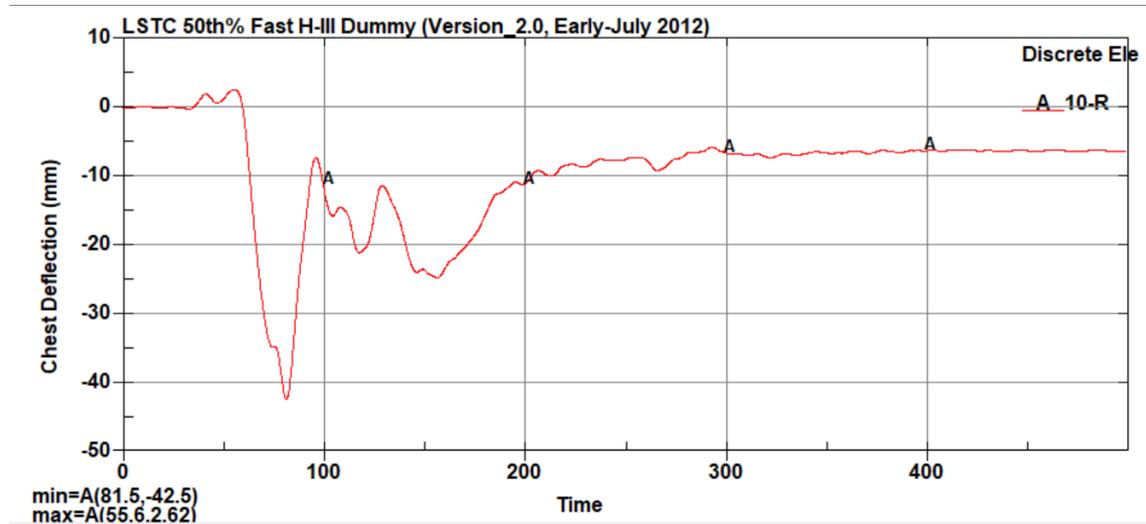


**Ilustración 4-3:** Fuerza de corte en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.  
 Realizado por: Aguirre, 2024

#### 4.1.1.3. Criterio de lesiones del tórax según R94.

Según el reglamento R94, el criterio de compresión del tórax (ThCC, Thorax Compression Criterion) no será superior a 42 mm.

El valor máximo obtenido de la simulación fue de 42.5 mm como se muestra en la Ilustración 4-5, a continuación, por lo que se deduce que no existe lesiones en el tórax.



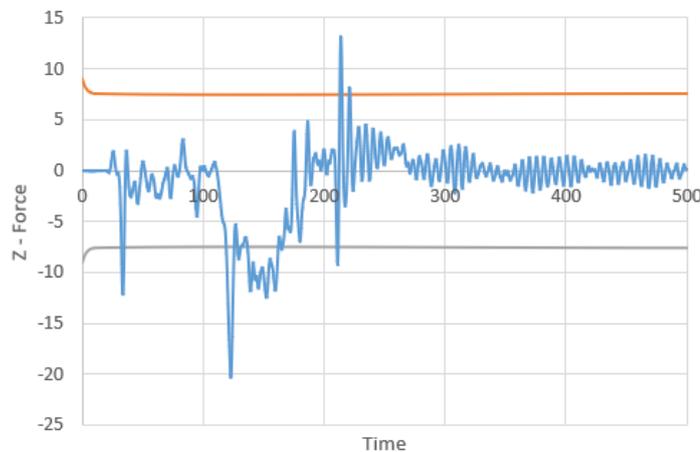
**Ilustración 4-4:** ThCC, en la tórax del dummy a 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

#### 4.1.1.4. Criterio de fuerza del fémur según R94.

De acuerdo al reglamento R94, el criterio de fuerza del fémur (FFC, Femur Force Criterion) no será superior al criterio de comportamiento fuerza-tiempo que muestra la Ilustración 2-16.

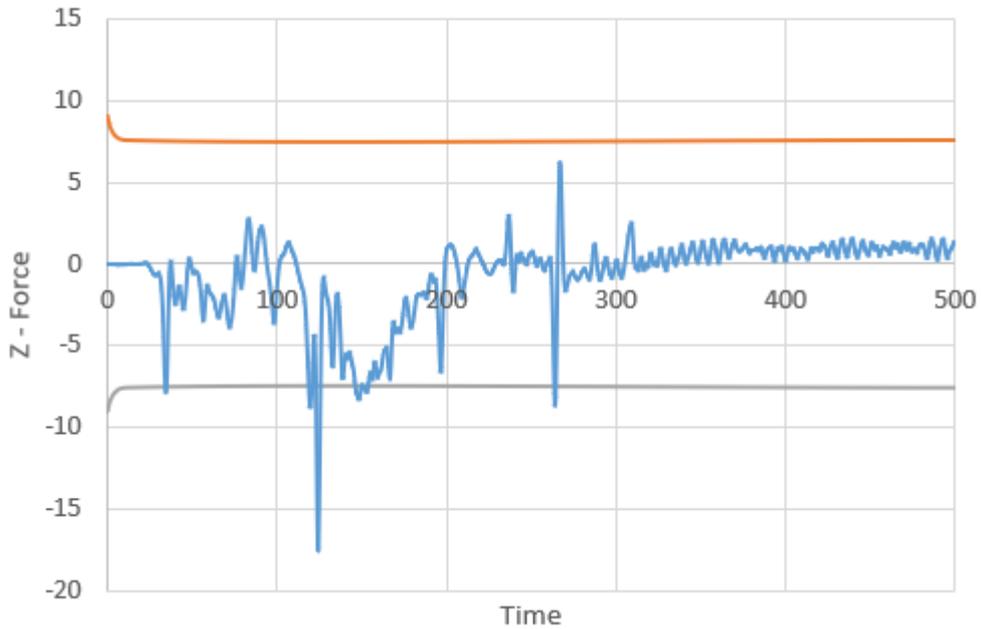
Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el fémur izquierdo sale de los límites permitidos, indicando que las lesiones son de tipo graves.



**Ilustración 4-5:** Fuerza del fémur izquierdo a velocidad de 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el fémur derecho sale de los límites permitidos, indicando que las lesiones son de tipo graves.



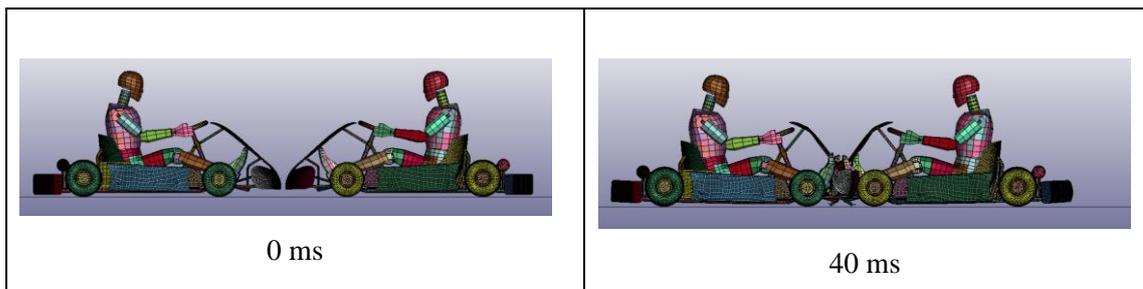
**Ilustración 4-6:** Fuerza del fémur derecho a velocidad de 50 Km/h.

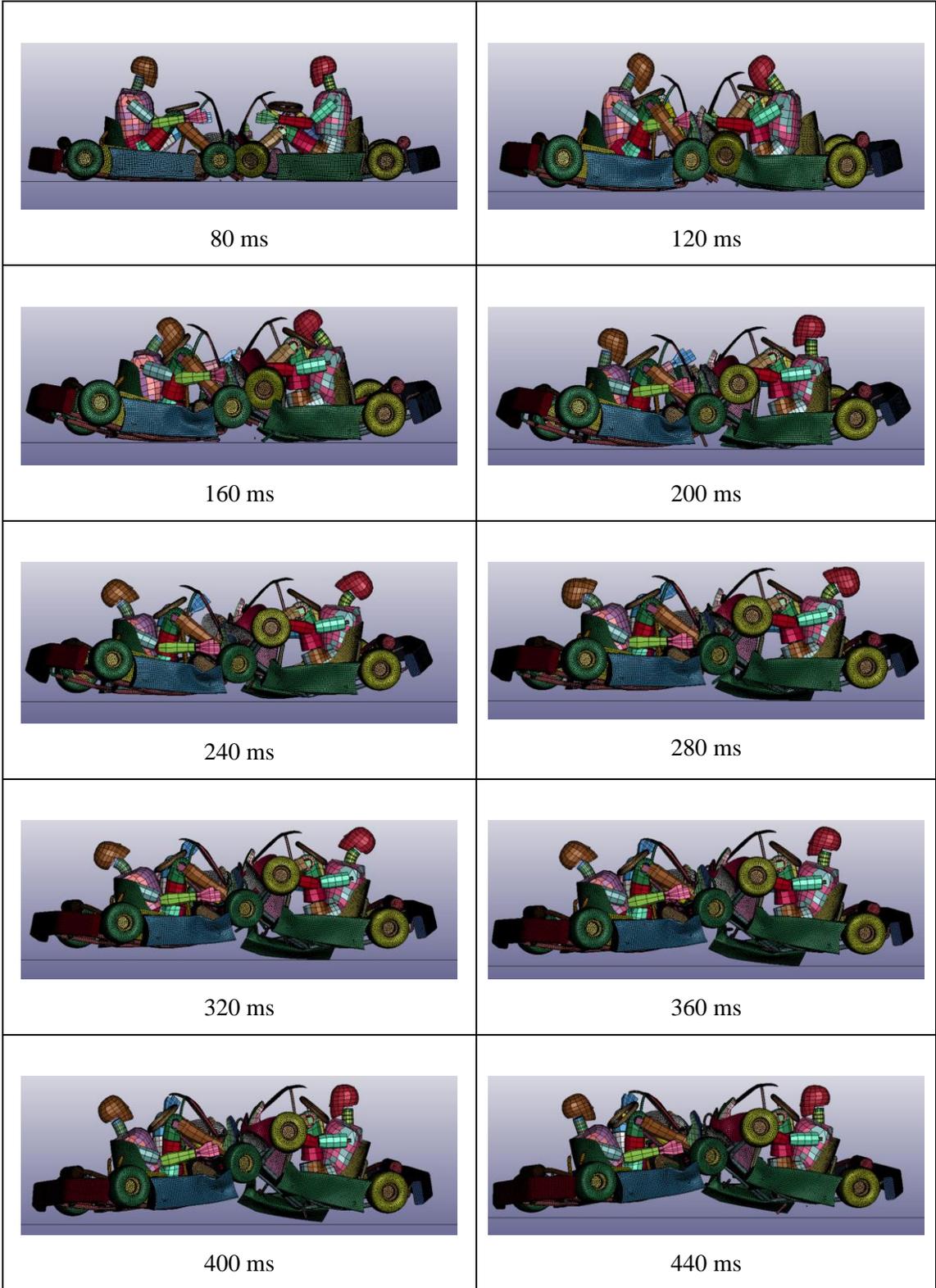
Realizado por: Aguirre, 2024

#### 4.2. Resultados caso 2: Impacto frontal - frontal

Los resultados se muestran gracias al procesamiento de datos del paquete informático LS-DYNA permitiendo controlar las variables independientes y dependientes interactuantes en la simulación, de esta manera se puede observar la interacción del impacto para medir el nivel de lesiones del dummy masculino híbrido III, se realizó la simulación del impacto contra un go kart con pasajero estático a una velocidad de 50 km/h, obteniendo lesiones de tipo leves y graves en la cabeza y cuello, que podrían ser permanentes o no y requerirán rehabilitación física; estos datos se compararan con el criterio R94 para determinar la existencia de lesiones.

**Tabla 4-2:** Secuencia del impacto frontal - frontal a 50 Km/h.







Realizado por: Aguirre, 2024

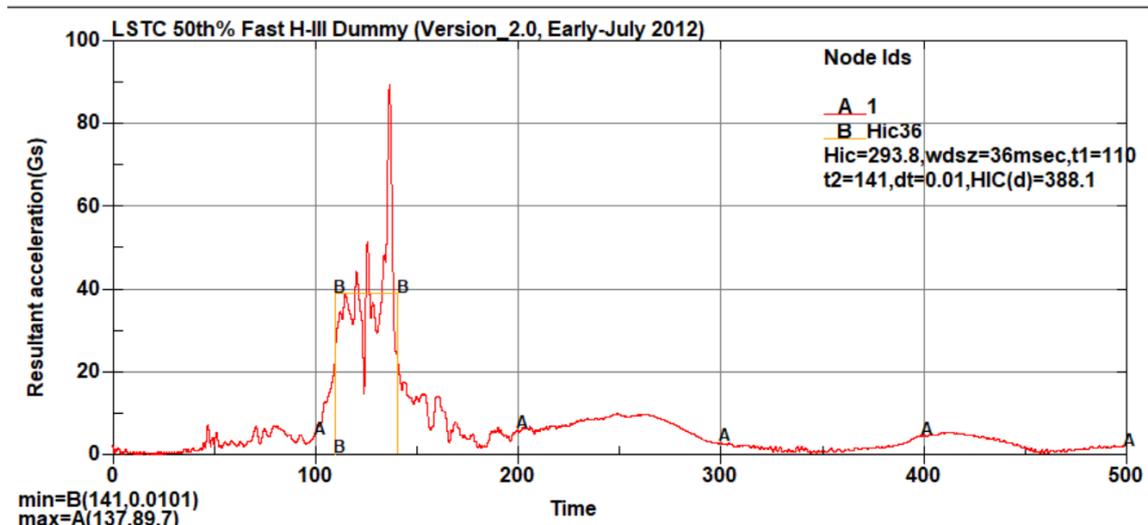
#### 4.2.1. Criterios de lesiones del dummy híbrido III a 50 km/h.

Se analizó los criterios de lesiones establecidos en las normas donde se presenta un rango de medición del índice de lesiones, por lo tanto, se describe y compara los datos obtenidos con los reglamentos CEPE, R94, a continuación.

##### 4.2.1.1. Criterio de lesiones en la cabeza HIC según R94.

Según el reglamento R94, el comportamiento de la cabeza (HPC, head performance criterion) no será superior a 1000 y la aceleración resultante de la cabeza no superará los 80 g durante más de 3 ms.

Se obtuvo un valor máximo de HIC de 293,8 con una aceleración de 89.7 g como se muestra en la Ilustración 4-10, a continuación, por lo que se deduce que existe lesiones en la parte frontal de la cabeza.



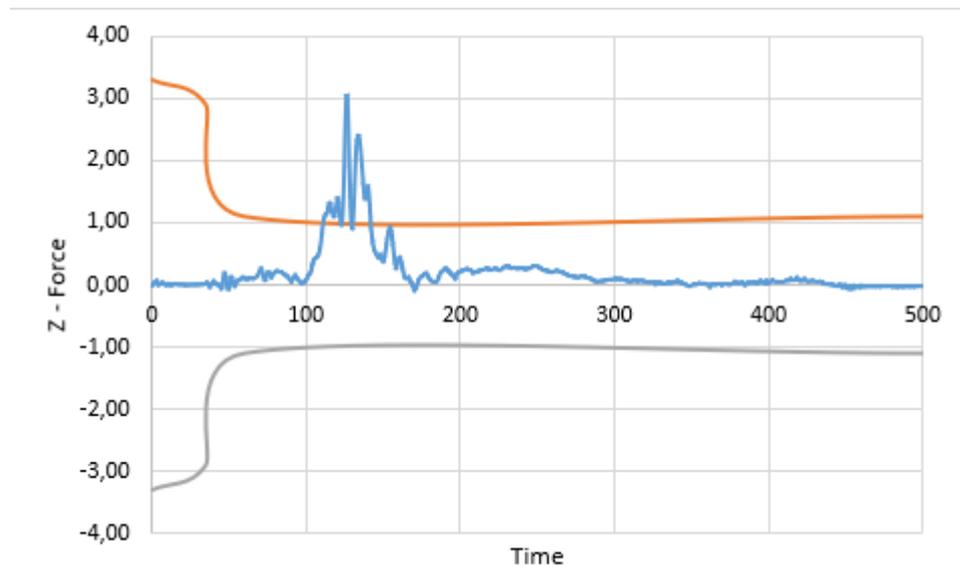
**Ilustración 4-7:** HPC, de la cabeza del dummy a 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

##### 4.2.1.2. Criterio de lesiones del cuello según R94.

De acuerdo al reglamento R94, el criterio de lesión del cuello (NIC, Neck Injury Criterial) no superará los valores mostrados en las Ilustraciones 2-14, 2-15.

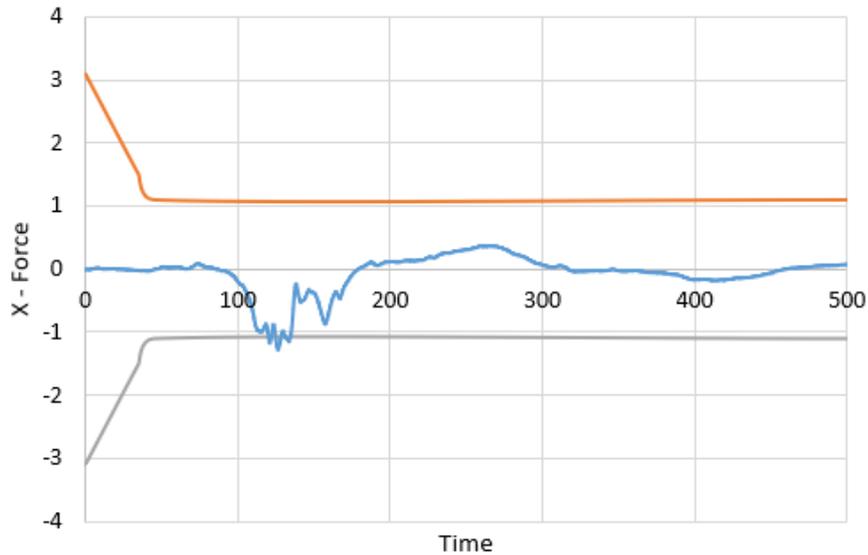
Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza en Z la cual según LSTC Hybrid III 50th Fast Dummy Positioning & Post-Processing indica la fuerza de tracción del cuello, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el cuello sale de los límites permitidos, indicando que las lesiones son de tipo graves.



**Ilustración 4-8:** Fuerza de tracción en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza en X la cual según LSTC Hybrid III 50th Fast Dummy Positioning & Post-Processing indica la fuerza de cizalladura del cuello, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el cuello sale de los límites permitidos con un valor de 1,25 KN, teniendo en cuenta que para tiempos mayores a 45 ms la fuerza de cizalladura no será superior a 1,1 KN, de acuerdo a esto se determina que existe leves lesiones en el cuello debido a la cizalladura.



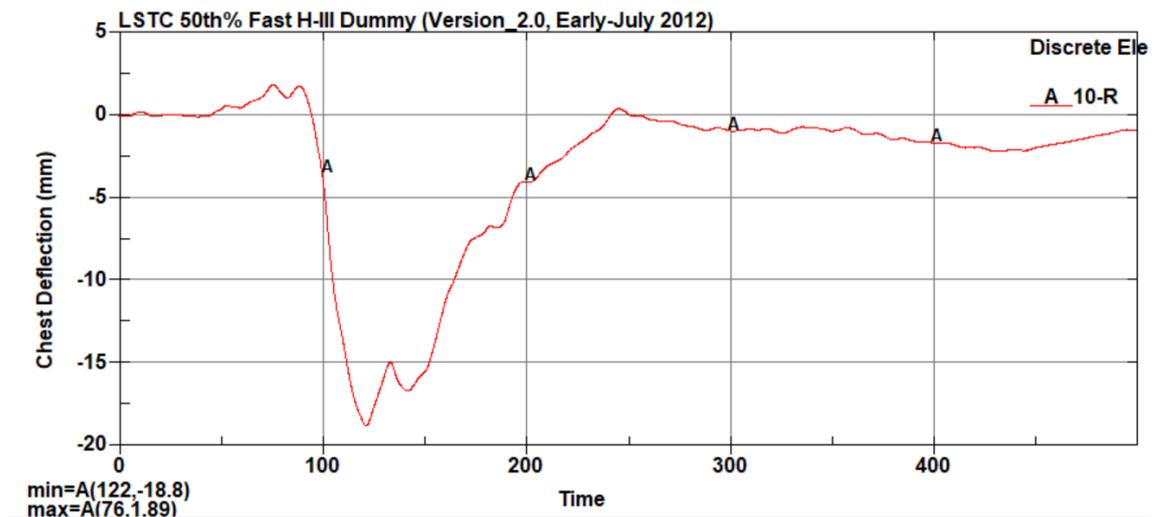
**Ilustración 4-9:** Fuerza de cizalladura en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

4.2.1.3. *Criterio de lesiones del tórax según R94.*

Según el reglamento R94, el criterio de compresión del tórax (ThCC, Thorax Compression Criterion) no será superior a 42 mm.

El valor máximo obtenido de la simulación fue de 18.8 mm como se muestra en la Ilustración 4-13, a continuación, por lo que se deduce que no existe lesiones en el tórax.



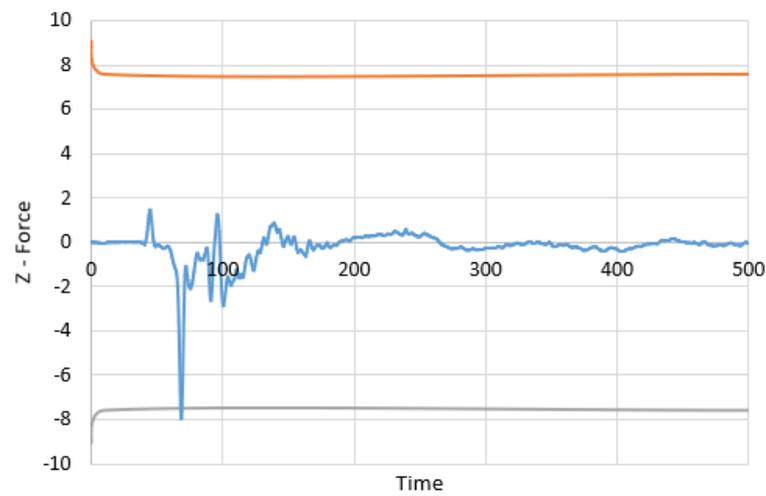
**Ilustración 4-10:** ThCC, en la tórax del dummy a 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

4.2.1.4. *Criterio de fuerza del fémur según R94.*

De acuerdo al reglamento R94, el criterio del fuerza del fémur (FFC, Femur Force Criterion) no será superior al criterio de comportamiento fuerza-tiempo que muestra la Ilustración 2-16.

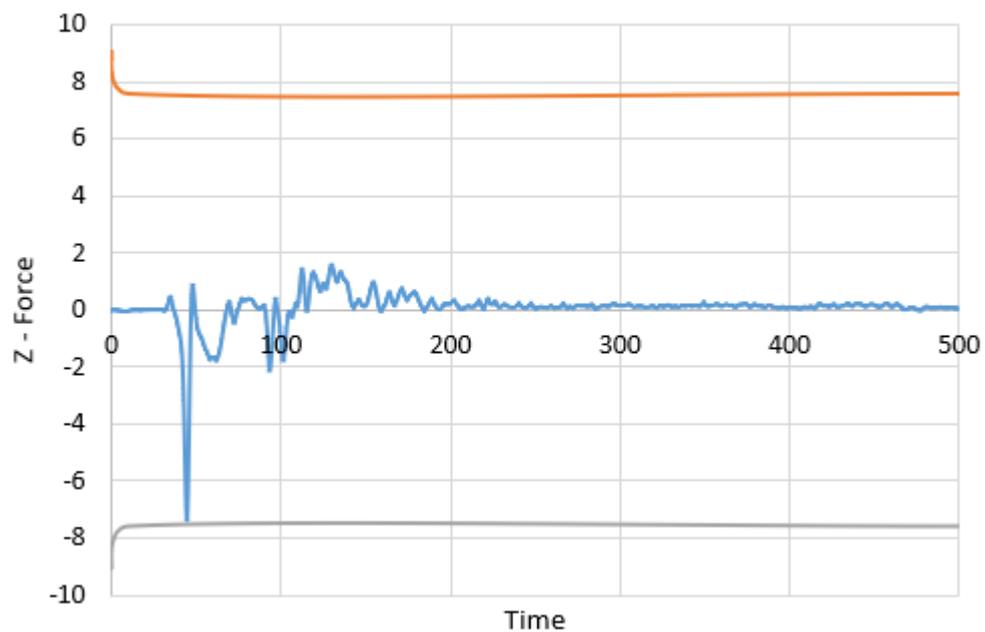
Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el fémur izquierdo sale de los límites permitidos, indicando que las lesiones son de tipo graves.



**Ilustración 4-11:** Fuerza del fémur izquierdo a velocidad de 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el fémur derecho no sale de los límites permitidos, indicando que existen lesiones sobre este fémur.



**Ilustración 4-12:** Fuerza del fémur derecho a velocidad de 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

#### 4.2.1.5. Evaluación de resultados de piloto móvil – piloto fijo

Se presenta una comparativa entre el piloto a una velocidad de 50 Km/h contra un piloto fijo. En la Tabla 4-3 se presenta una comparación de resultados de las lesiones tanto para el dummy en movimiento como para el dummy inmóvil.

**Tabla 4-3:** Comparativa de resultados piloto móvil – piloto fijo frontal.

Tipo de lesión	Dummy piloto	Dummy estático	R94
Cabeza	293.8 - 89.7g	197.3 – 80g	1000 – 80g
Cuello	3.05 KN	0.807 KN	1.1 KN
	1.25 KN	1.13 KN	1.1 KM
Tórax	18.8 mm	17.7 mm	42 mm
Fémur	7.95 KN	6.71 KN	7.58 KN
	7.36 KN	6.64 KN	

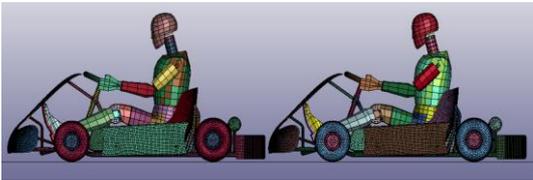
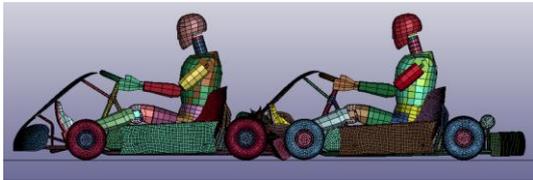
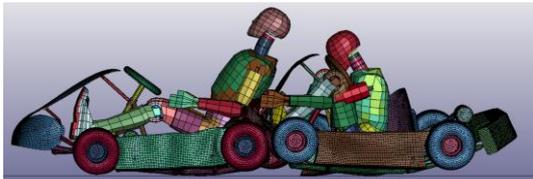
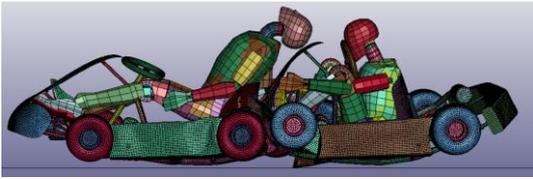
Realizado por: Aguirre, 2024

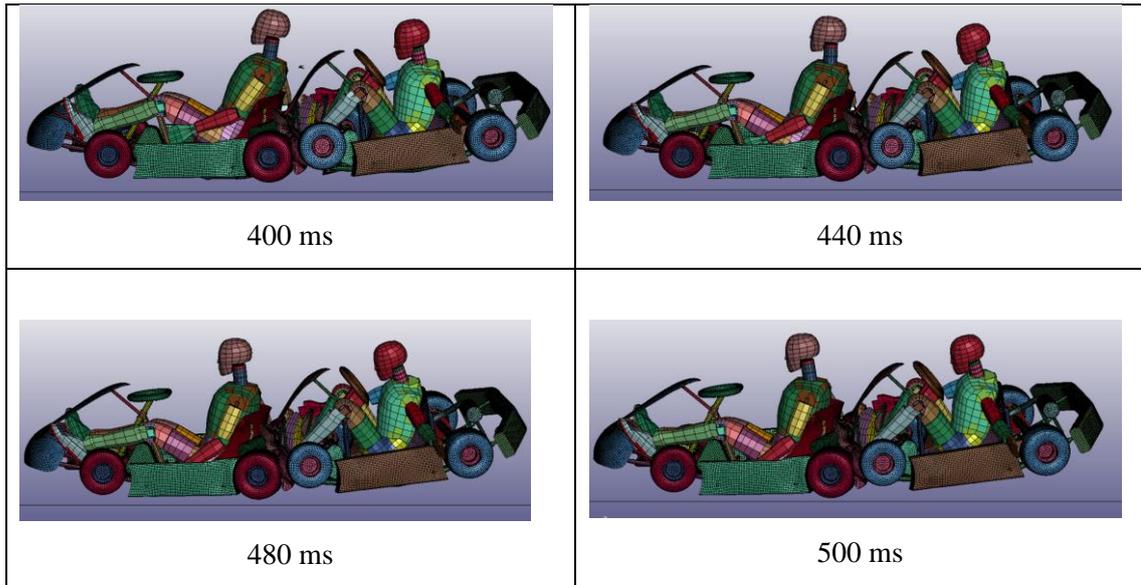
Según los datos de la Tabla 4-3, cuando el go kart está estacionado y recibe el impacto por la parte posterior, las lesiones registradas son menores que las sufridas por el piloto en movimiento. Además de acuerdo al reglamento R94, estas lesiones están por debajo de los límites establecidos, lo que sugiere que el piloto no sufrirá ninguna lesión.

### 4.3. Resultados caso 3: Impacto frontal- posterior

Los resultados se muestran gracias al procesamiento de datos del paquete informático LS-DYNA permitiendo controlar las variables independientes y dependientes interactuantes en la simulación, de esta manera se puede observar la interacción del impacto para medir el nivel de lesiones del dummy masculino híbrido III, se realizó la simulación del impacto contra un go kart posterior con pasajero estático a una velocidad de 50 km/h, obteniendo lesiones de tipo leves y graves en la cabeza y cuello, que podrían ser permanentes o no y requerirán rehabilitación física; estos datos se compararan con el criterio R94 para determinar la existencia de lesiones.

**Tabla 4-4:** Secuencia del impacto frontal- posterior a 50 Km/h.

 <p>0 ms</p>	 <p>40 ms</p>
 <p>80 ms</p>	 <p>120 ms</p>
 <p>160 ms</p>	 <p>200 ms</p>
 <p>240 ms</p>	 <p>280 ms</p>
 <p>320 ms</p>	 <p>360 ms</p>



Realizado por: Aguirre, 2024

#### 4.3.1. Criterios de lesiones del dummy híbrido III a 50 km/h.

Se analizó los criterios de lesiones establecidos en las normas donde se presenta un rango de medición del índice de lesiones, por lo tanto, se describe y compara los datos obtenidos con los reglamentos CEPE, R94, a continuación.

##### 4.3.1.1. Criterio de lesiones en la cabeza HIC según R94.

Según el reglamento R94, el comportamiento de la cabeza (HPC, head performance criterion) no será superior a 1000 y la aceleración resultante de la cabeza no superará los 80 g durante más de 3 ms.

Se obtuvo un valor máximo de HIC de 599.4 con una aceleración de 152 g como se muestra en la Ilustración 4-18, a continuación, por lo que se deduce que existe un lesiones de tipo grave en la parte frontal de la cabeza.

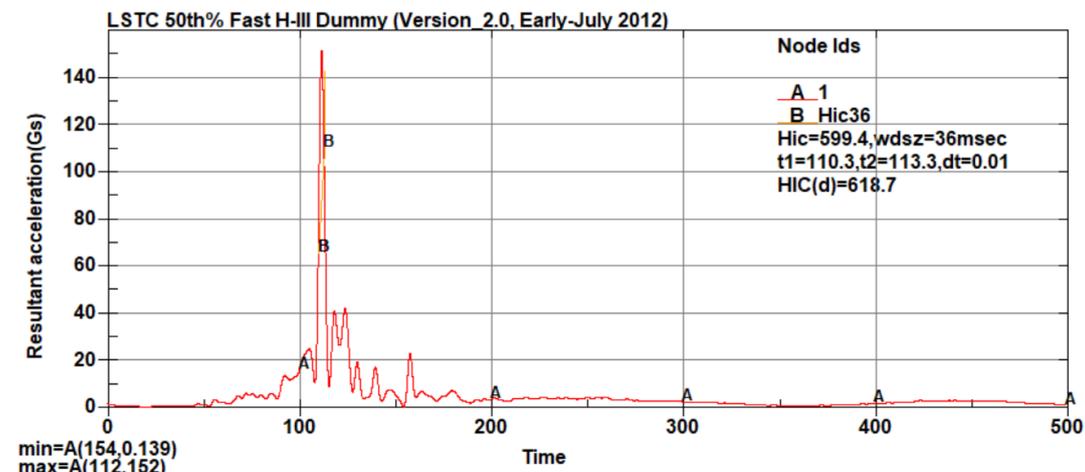


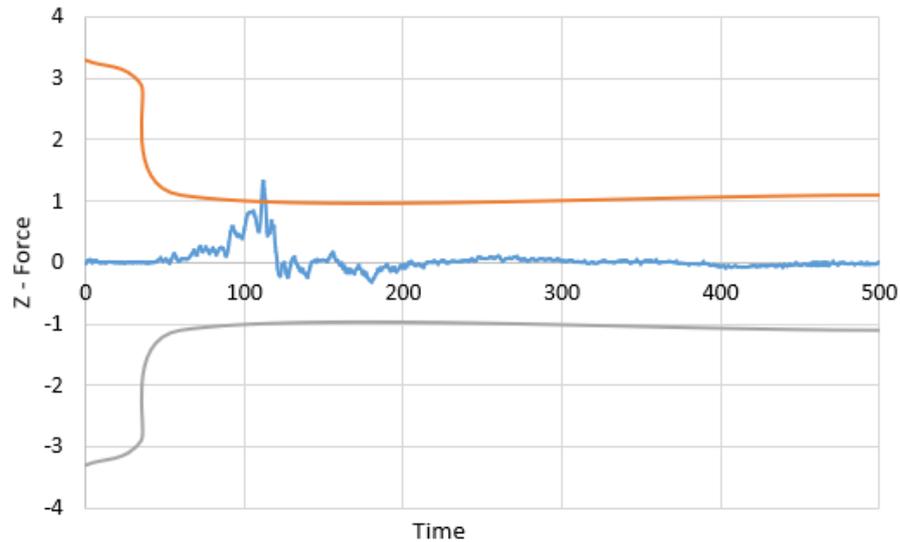
Ilustración 4-13: HPC, en la cabeza del dummy a 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

#### 4.3.1.2. Criterio de lesiones del cuello según R94.

De acuerdo al reglamento R94, el criterio de lesión del cuello (NIC, Neck Injury Criteria) no superará los valores mostrados en las Ilustraciones 2-14, 2-15.

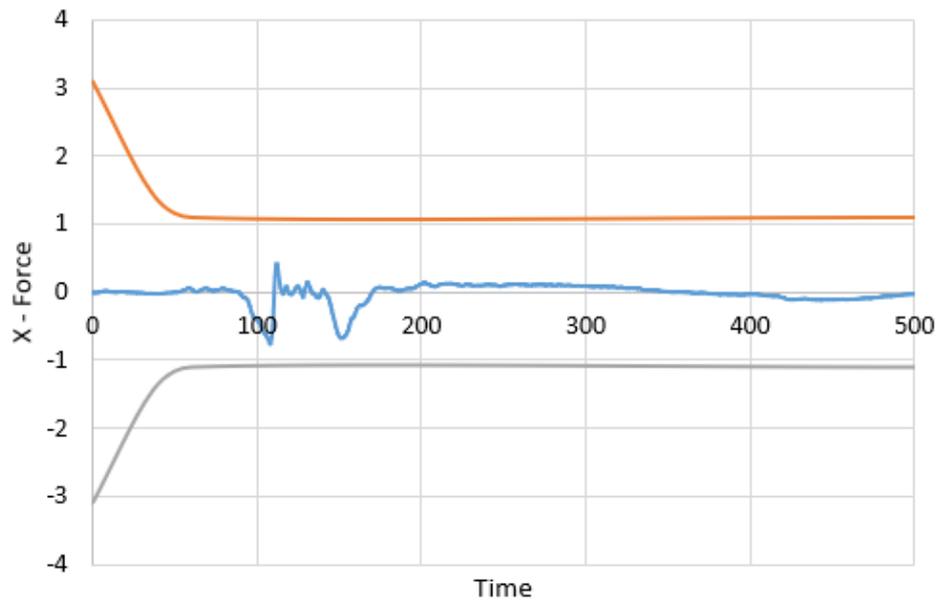
Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza en Z la cual según LSTC Hybrid III 50th Fast Dummy Positioning & Post-Processing indica la fuerza de tracción del cuello, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el cuello sale de los límites permitidos, indicando lesiones leves.



**Ilustración 4-14:** Fuerza de tracción en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza en X la cual según LSTC Hybrid III 50th Fast Dummy Positioning & Post-Processing indica la fuerza de cizalladura del cuello, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el cuello no sale de los límites, indicando que no existe lesiones por cizallamiento.



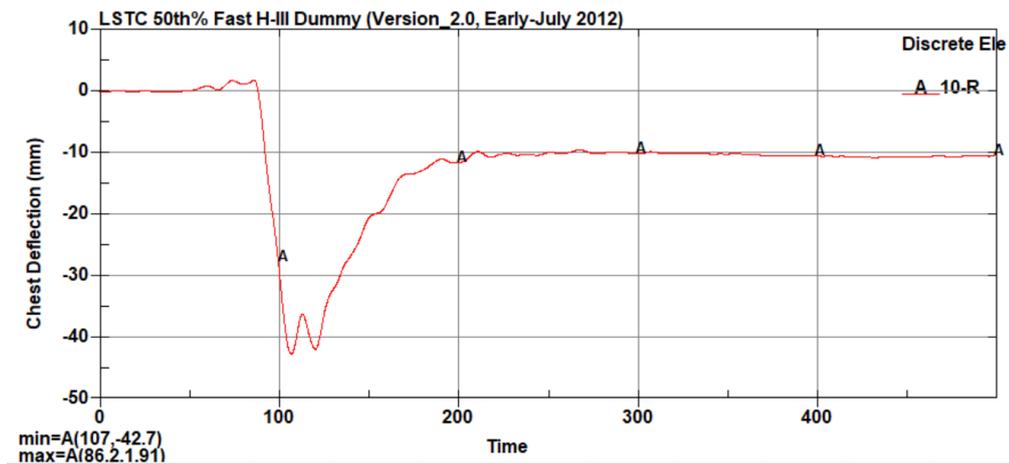
**Ilustración 4-15:** Fuerza de cizalladura en el cuello del dummy a velocidad de 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

4.3.1.3. *Criterio de lesiones del tórax según R94.*

Según el reglamento R94, el criterio de compresión del tórax (ThCC, Thorax Compression Criterion) no será superior a 42 mm.

El valor máximo obtenido de la simulación fue de 42.7 mm como se muestra en la Ilustración 4-20, a continuación, por lo que se deduce que existe lesiones leves en el tórax.



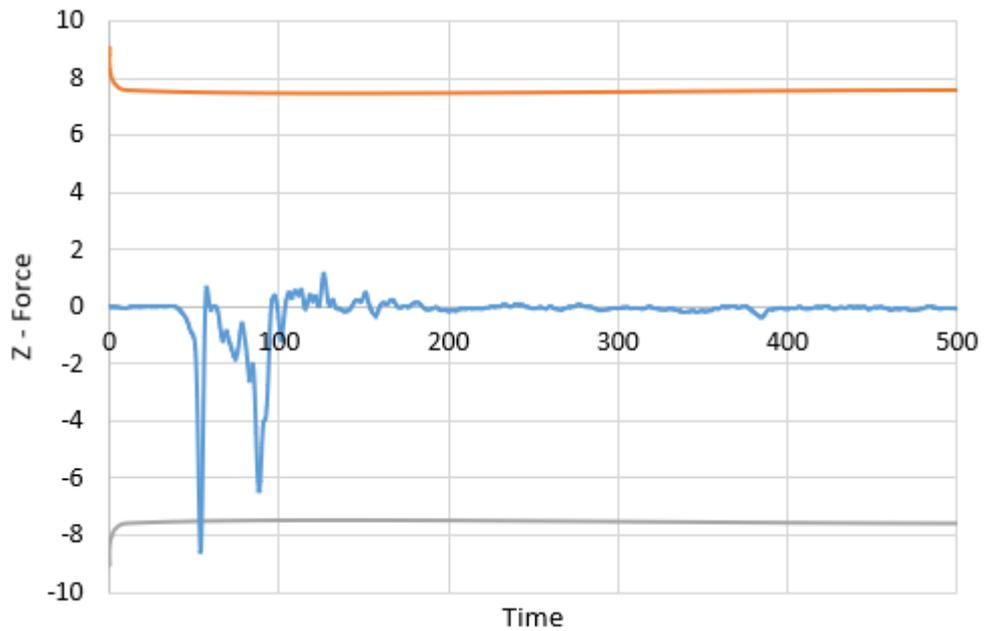
**Ilustración 4-16:** ThCC, en la tórax del dummy a 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

4.3.1.4. *Criterio de fuerza del fémur según R94.*

De acuerdo al reglamento R94, el criterio del fuerza del fémur (FFC, Femur Force Criterion) no será superior al criterio de comportamiento fuerza-tiempo que muestra la Ilustración 2-16.

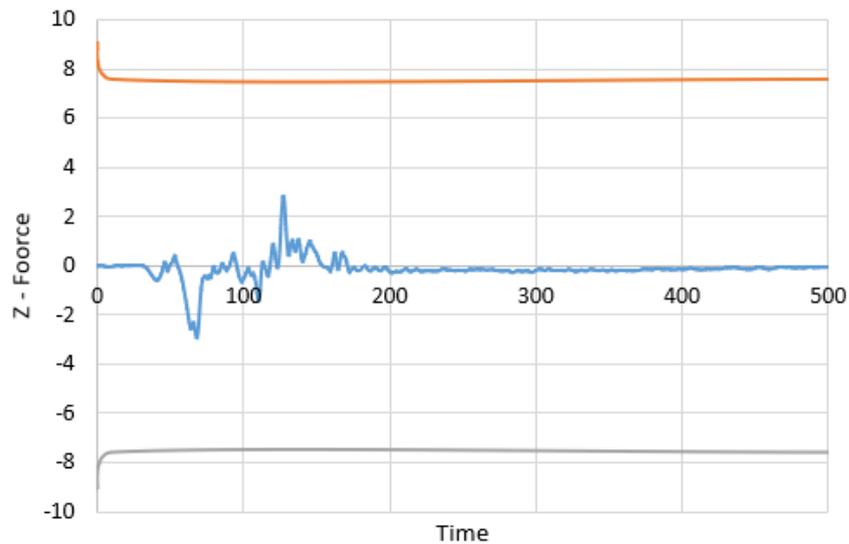
Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el fémur izquierdo sale de los límites permitidos, indicando que lesiones de tipo leves.



**Ilustración 4-17:** Fuerza del fémur izquierdo a velocidad de 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

Mediante comparación de imágenes se obtuvo los resultados de la fuerza, en donde se superpone los datos del reglamento y los resultados obtenidos, dando como consecuencia que la fuerza sobre el fémur derecho no sale de los límites permitidos, indicando que existen lesiones sobre este fémur.



**Ilustración 4-18:** Fuerza del fémur derecho a velocidad de 50 Km/h.

Realizado por: Aguirre, 2024

4.3.1.5. *Resultados piloto móvil – piloto fijo posterior*

En la Tabla 4-5 se presenta una comparación de resultados de las lesiones tanto para el dummy en movimiento como para el dummy inmóvil.

**Tabla 4-5:** Comparativa de resultados dummy piloto - dummy posterior inmóvil.

Tipo de lesión	Dummy piloto	Dummy posterior estático	R94
Cabeza	599.4 - 152g	62.16 – 53.5g	1000 – 80g
Cuello	1.32 KN	0.709 KN	1.1 KN
	0.739 KN	1.07 KN	1.1 KM
Tórax	42.7 mm	33.59 mm	42 mm
Fémur	8.59 KN	1.53 KN	7.58 KN
	2.89 KN	1.08 KN	

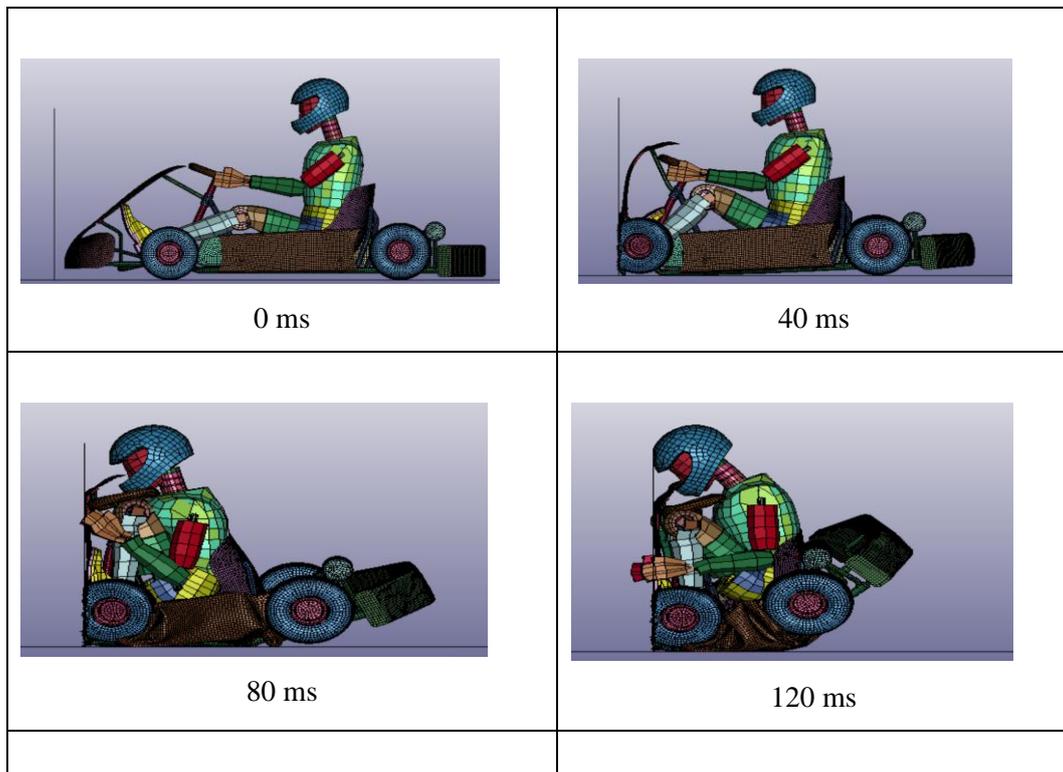
Realizado por: Aguirre, 2024

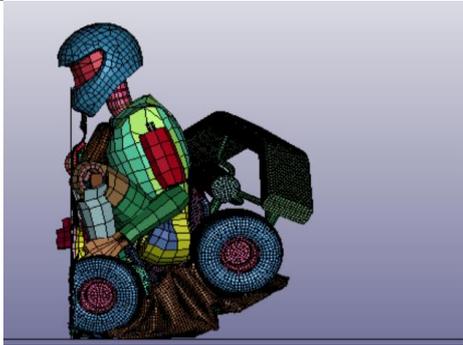
Según los datos de la Tabla 4-5, cuando el go kart está estacionado y recibe el impacto por la parte posterior, las lesiones registradas son menores que las sufridas por el piloto en movimiento. Además de acuerdo al reglamento R94, estas lesiones están por debajo de los límites establecidos, lo que sugiere que el piloto no sufrirá ninguna lesión.

**4.4. Análisis comparativo de los casos 1, 2 y 3 con y sin casco.**

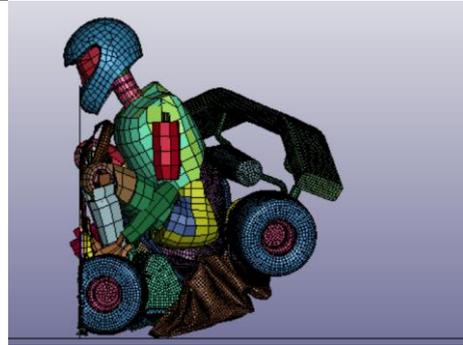
**4.4.1. Caso 1: Impacto frontal – pared rígida**

**Tabla 4-6:** Secuencia del impacto frontal- pared con casco.

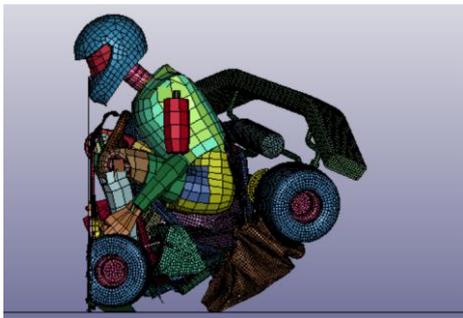




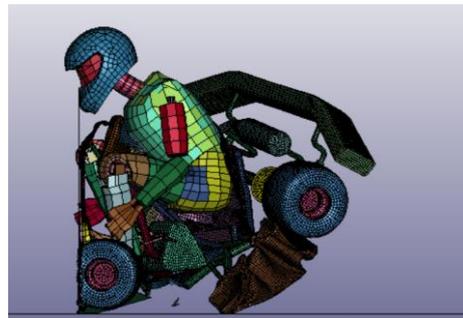
160 ms



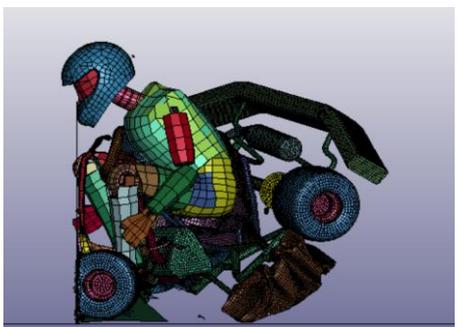
200 ms



240 ms



280 ms



320 ms



360 ms



400 ms



440 ms



Se presenta una comparación del estudio de impacto contra pared rígida en donde el dummy se analiza con y sin casco, dando como resultado la Tabla 4-7, a continuación.

**Tabla 4-7:** Comparación entre piloto sin casco – con casco

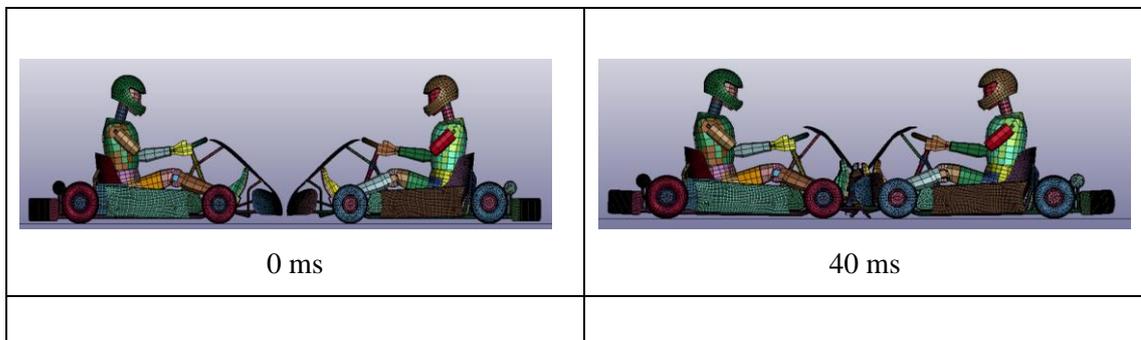
Tipo de lesión	Dummy sin casco	Dummy con casco	R94
Cabeza	674 – 144g	649.4 – 106g	1000 – 80g
Cuello	5.4 KN	3.91 KN	1.1 KN
	3.37 KN	4.24 KN	1.1 KN
Tórax	42.5 mm	46.2 mm	42 mm
Fémur	20.3 KN	7.51 KN	7.58 KN
	17.6 KN	18.7 KN	

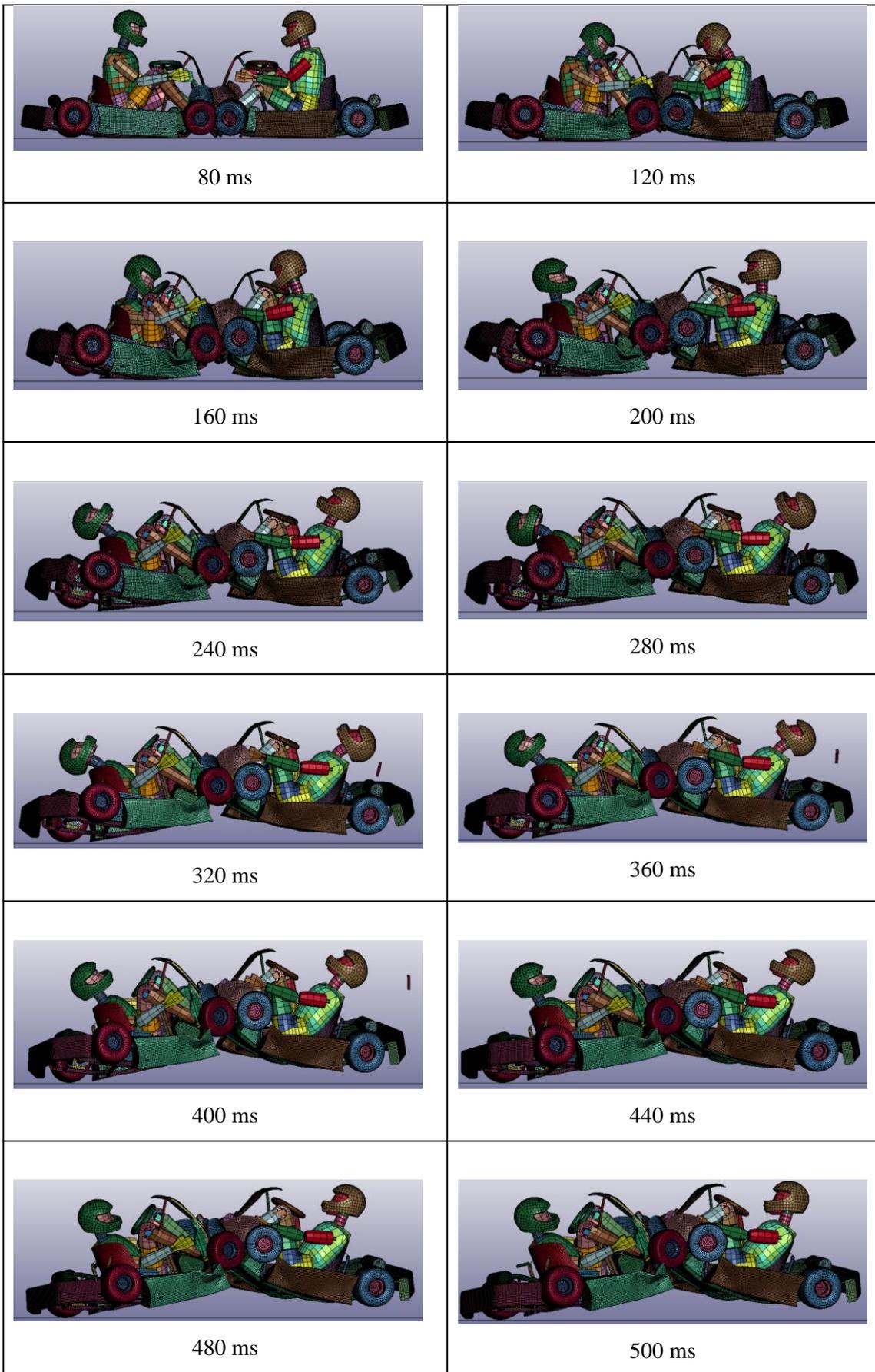
Realizado por: Aguirre, 2024

El uso del casco en el dummy ha permitido reducir las fuerzas g en un 26.39% , reduciendo las lesiones en la zona craneal.

#### 4.4.2. Caso 2: Impacto frontal – frontal

**Tabla 4-8:** Secuencia del impacto frontal- frontal con casco.





Se presenta una comparación del estudio de impacto frontal - frontal en donde el dummy se analiza con y sin casco, dando como resultado la Tabla 4-9, a continuación.

**Tabla 4-9:** Comparación entre piloto sin casco – con casco

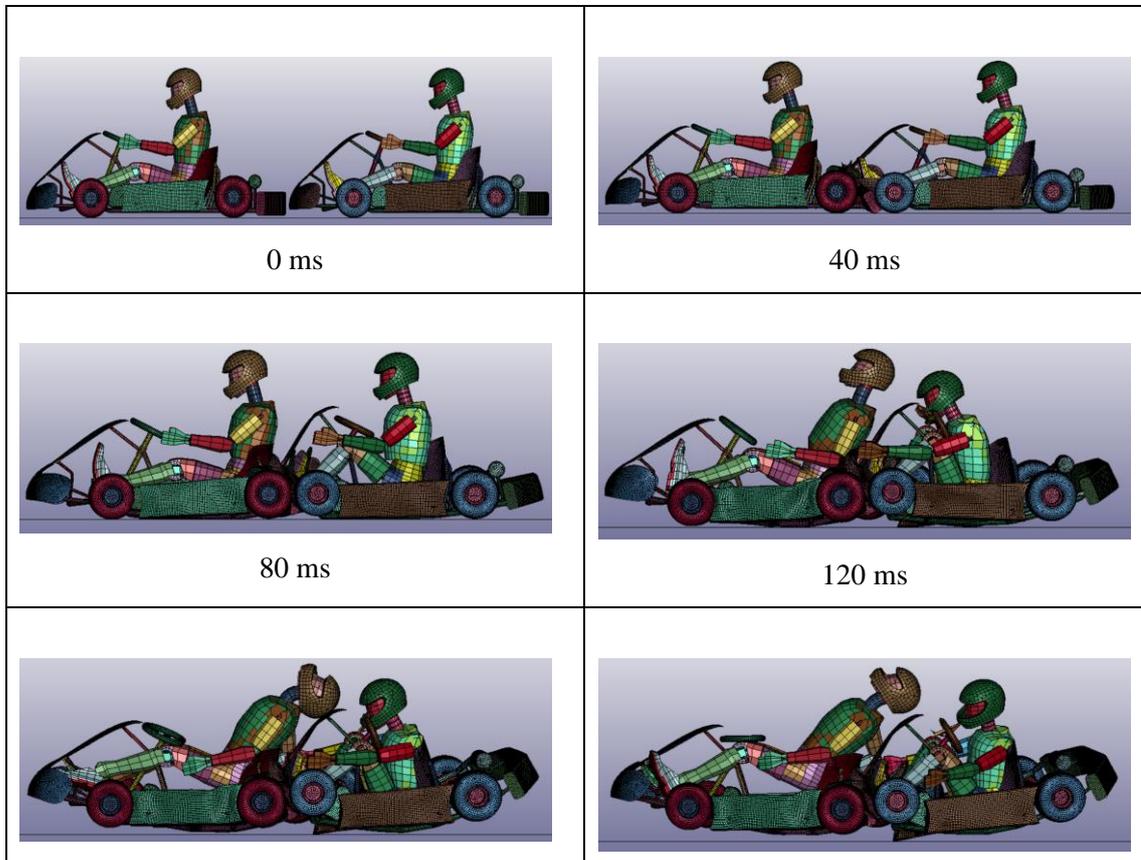
Tipo de lesión	Dummy sin casco	Dummy con casco	R94
Cabeza	293.8 - 89.7g	293.8 – 62.2g	1000 – 80g
Cuello	3.05 KN	1.14 KN	1.1 KN
	1.25 KN	0.83 KN	1.1 KN
Tórax	18.8 mm	24.1 mm	42 mm
Fémur	7.95 KN	6.2 KN	7.58 KN
	7.36 KN	6.75 KN	

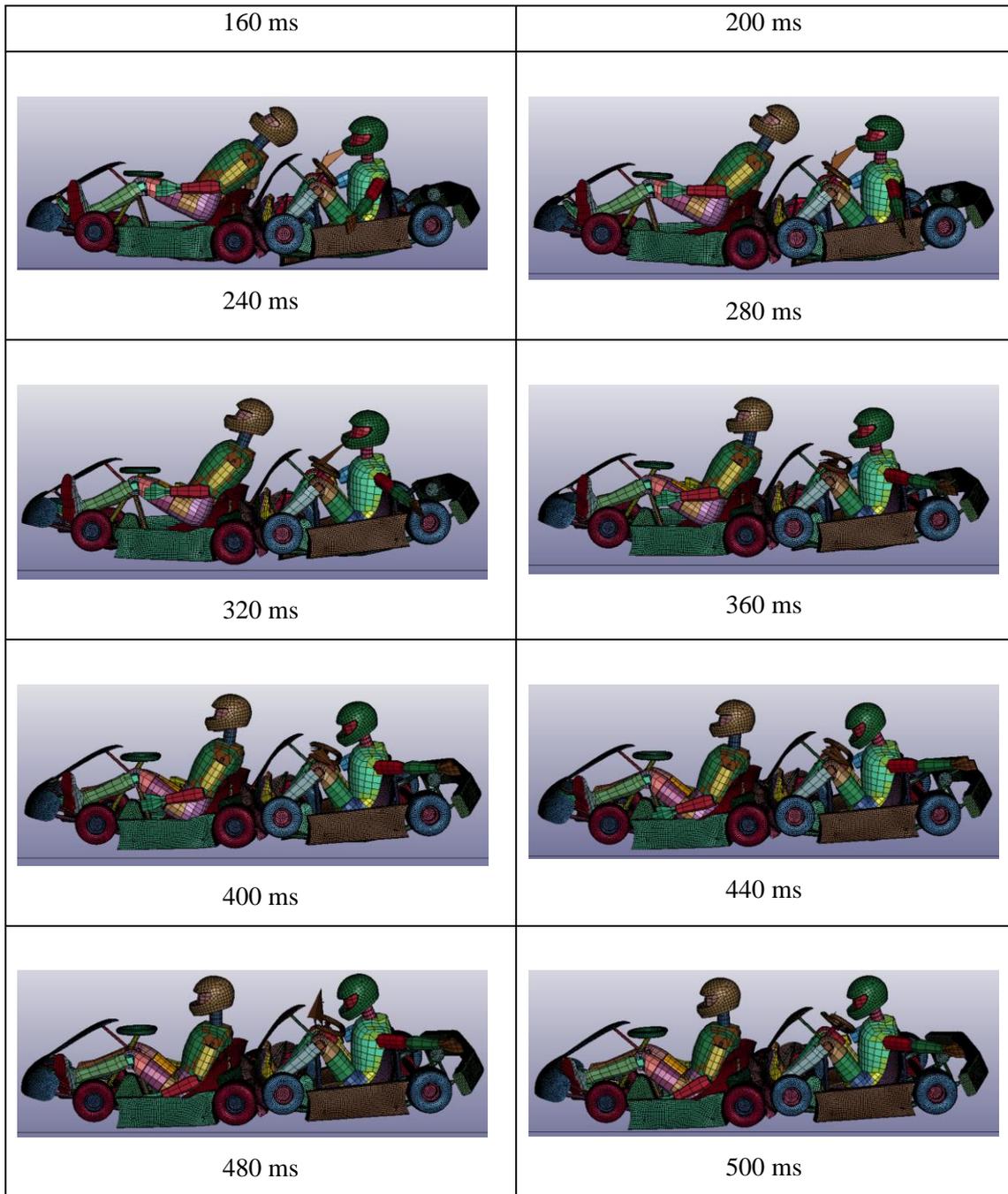
Realizado por: Aguirre, 2024

El uso del casco en el dummy ha permitido reducir las fuerzas g en un 59,07% , reduciendo las lesiones en la zona craneal considerablemente.

#### 4.4.3. Caso 3: Impacto frontal – posterior

**Tabla 4-10:** Secuencia del impacto frontal- posterior con casco.





Se presenta una comparación del estudio de impacto frontal - posterior en donde el dummy se analiza con y sin casco, dando como resultado la Tabla 4-11, a continuación.

**Tabla 4-11:** Comparación entre piloto sin casco – con casco

<b>Tipo de lesión</b>	<b>Dummy sin casco</b>	<b>Dummy con casco</b>	<b>R94</b>
Cabeza	599.4 - 152g	208.3 – 75.8g	1000 – 80g
Cuello	1.32 KN	1.52 KN	1.1 KN
	0.739 KN	0.62 KN	1.1 KN
Tórax	42.7 mm	45.2 mm	42 mm
Fémur	8.59 KN	8.68 KN	7.58 KN
	2.89 KN	3.5 KN	

Realizado por: Aguirre, 2024

El uso del casco en el dummy ha permitido reducir las fuerzas g en un 50,13% , reduciendo las lesiones en la zona craneal.

## CONCLUSIONES

- Caso1: Frontal – Pared rígida, Durante el análisis del primer escenario de impacto frontal contra pared rígida, se observaron lesiones en múltiples regiones anatómicas del cuerpo, desde la cabeza con un índice de HIC de 674 y 144g, fuerza de tracción del cuello de 5.4 KN, y fuerza del fémur izquierdo de 20.3 y fuerza de fémur derecho de 17.6, estos valores superan lo establecido en el reglamento R94. Estas lesiones se registraron en un entorno experimental donde el go kart alcanzó una velocidad de 50 Km/h. Vale la pena destacar que los resultados obtenidos mediante simulaciones de ingeniería asistida por computadora (CAE).
- Caso 2: Frontal – Frontal, se identificaron lesiones en varias regiones críticas, específicamente en la cabeza con un índice de HIC de 599.4 y 152g, fuerza de tracción del cuello de 1.32 KN y fuerza de fémur izquierdo de 8.59 KN, estos valores superan los parámetros establecidos por el reglamento CEPE R94. Las lesiones fueron examinadas en un entorno experimental donde se propuso una velocidad de 50 Km/h .
- Caso 3: Frontal – Posterior, se evidenciaron lesiones que afectaron diversas áreas críticas del cuerpo humano incluyendo la cabeza con un HIC de 599.4 y 152g, fuerza de tracción en el cuello de 1.32 KN y fuerza del fémur izquierdo de 8.59 KN, superando en conformidad con los parámetros establecidos por el reglamento CEPE R94, estos va. Estas lesiones fueron observadas en un entorno experimental donde el go kart alcanzó una velocidad de 50 Km/h.
- Las simulaciones revelaron índices de lesiones que superaban los límites establecidos por el reglamento CEPE R94, lo que destaca la necesidad de llevar a cabo una evaluación integral de las medidas de seguridad existentes y de los estándares de diseño aplicable. Esto es esencial para garantizar una protección efectiva de los ocupantes del vehículo en distintos escenarios.
- La implementación del uso de casco revela una medida fundamental para mitigar las lesiones en la cabeza. Algunos estudios biomecánicos han demostrado que el uso adecuado de cascos puede reducir el riesgo y la gravedad de las lesiones en la cabeza y cuello durante colisiones a velocidades similares a las evaluadas en este estudio. La protección proporcionada por los cascos al absorber y disipar la energía del impacto contribuye a limitar el daño biomecánico y a minimizar el riesgo de lesiones traumáticas.
- Las simulaciones realizadas por el software de ingeniería asistida por computadora LS\_DYNA permitió obtener resultados efectivos en la recolección de datos que verifican las lesiones que se producen en el dummy.

## RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de impactos laterales como un componente esencial para enriquecer el proyecto centrado en la seguridad de los pilotos ante impactos frontales.
- Con respecto a la obtención del modelo CAD y simulación CAE se recomienda llevar a cabo teniendo en cuenta las restricciones del caso y siguiendo las normas correspondientes, esto permitirá la obtención de resultados fiables y comparables en los análisis posteriores.
- En cuanto al go kart se recomienda implementar un cinturón de seguridad de al menos dos puntos para mejorar la seguridad del piloto y reducir el riesgo de lesiones.
- Con respecto a la evaluación de los índices de velocidad se sugiere llevar a cabo pruebas a velocidades superiores con el objetivo de determinar los límites de seguridad de la resistencia del go kart y la protección del piloto. Estas pruebas permitirán establecer con mayor precisión en que rangos de velocidad existe un riesgo significativo para la integridad del piloto.
- Implementar un arco de seguridad en el diseño del go kart para mitigar los riesgos de expulsión del piloto durante impactos frontales y consecuentemente volcadura. Este componente adicional, estratégicamente ubicado detrás del asiento del piloto, proporciona un punto de anclaje resistente que no solo refuerza la estructura del go kart, sino que también actúa como una barrera protectora en caso de impacto.

## **GLOSARIO**

**CAD:** Diseño Asistido por Computador

**CAE:** Ingeniería Asistida por Computadora

**CEPE:** Comisión Económica Para Europa

**DUMMY:** Maniquí de pruebas de impacto

**HIC:** Criterio de lesiones de la cabeza

**CCI:** Criterio de lesiones del cuello

**FFC:** Criterio de fuerza del fémur

**LSTC:** Corporación de Tecnología de Software de Livermore

**MEF:** Método de los Elementos Finitos

**THCC:** Criterio de compresión del tórax

**UNECE:** Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas los reglamentos

**SAE:** Sociedad de Ingenieros Automotrices

**LS-DYNA:** Software de simulación explícita en el ámbito industrial.

## BIBLIOGRAFIA

1. **AGUADO SEBATIAN, Diego.** Diseño y análisis de un chasis de kart de competición [en línea]. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Universidad Carlos III de Madrid. Madrid-España. 2014. Pág. 25. [consulta: 27 octubre 2023]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/44311395.pdf>.
2. **AGUAS LUCIO, Carlos Andrés.** Análisis de la eficiencia del sistema de airbags mediante simulación computacional para la reducción de lesiones del conductor en condiciones de vuelco, de acuerdo con la norma FMVSS. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Proyecto Técnico. Facultad Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2015. pág. 14.
3. **ANDRADE ARCOS, Erick Miguel.,** Rediseño de la carrocería y chasis de un go-kart híbrido [en línea]. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil-Ecuador. 2016. Págs.6-7. [consulta: 22 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/93822/D-CD88287.pdf>.
4. **ANSYS.** *Ansys LS-DYNA Multiphysics Solver.* [blog]. [consulta: 5 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna>.
5. **ANSYS LSTC.** *Dummy Models Overview and Downloads.* [blog]. [consulta: 11 agosto 2023]. Disponible en: <https://lsdyna.ansys.com/lstc-dummy-models-overview/>.
6. **AQUINO, Miguel; et al.** “Análisis de Impacto Frontal, Lateral y Posterior de un Chasis Tubular Tipo Formula Sae, para Determinar los Niveles de Seguridad”. *Polo del Conocimiento* [En línea], 2022, (Ecuador). vol. 66, n° 1, págs. 1243-1246. [consulta: 13 agosto 2023]. ISSN: 2550 - 682X. Disponible en: DOI: 10.23857/pc.v7i1.3540
7. **ASENCIO ZURITA, Manuel Bryan.** Estudio del comportamiento estructural por impacto frontal sobre un chasis de kart a través del método de elementos finitos [en línea]. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Arizona State University. Guayaquil-Ecuador. 2023. Págs. 17-22. [consulta: 11 octubre 2023]. Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/5827>.

8. **CASTRO LOBO, Gabriel & JIMENEZ ARIAS, Alejandro.** Diseño de chasis tubular con sistemas pasivos de seguridad para vehículo recreativo. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Universidad de Costa Rica. Rodrigo Fabio-Costa Rica. 2018 pág. 21. [consulta: 14 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/78378>.
9. **CEND INGENIERÍA.** *Investigación*. [blog]. Ambato: 2024.[consulta: 21 diciembre 2023]. Disponible en: <https://cendingenieria.com/>.
10. **DÍAZ MORCILLO, Alejandro.** Método de mallado y algoritmos adaptativos de dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de los elementos finitos.[en línea]. (Trabajo de titulación) (Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia-España. 2011. Págs. 2-3. [consulta: 5 diciembre 2023]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/39745508\\_Metodo\\_de\\_mallado\\_y\\_algoritmos\\_adaptativos\\_de\\_dos\\_y\\_tres\\_dimensiones\\_para\\_la\\_resolucion\\_de\\_problemas\\_electromagneticos\\_cerrados\\_mediante\\_el\\_metodo\\_de\\_los\\_elementos\\_finitos](https://www.researchgate.net/publication/39745508_Metodo_de_mallado_y_algoritmos_adaptativos_de_dos_y_tres_dimensiones_para_la_resolucion_de_problemas_electromagneticos_cerrados_mediante_el_metodo_de_los_elementos_finitos).
11. **DMC.** *Manual Trans Frame De Lorean Motor Company*. [blog]. Canadá, 2023. [consulta: 5 diciembre 2023]. Disponible en: <https://store.delorean.com/108273-manual-trans-frame.html>
12. **FIA KARTING.** *FIA Karting Season 2023 RGMMC*. [blog]. París. 2024. [en línea], [consulta: 24 septiembre 2023]. Disponible en: <https://www.fiakarting.com/page/home>.
13. **GÁLVEZ ROMÁN, Raquel.** Simulación de un atropello mediante LS-DYNA. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Universidad Carlos II de Madrid. 2011. Págs. 74-83. [consulta: 1 enero 2024]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/30044249.pdf>.
14. **GODINO, Paola.** Lesiones Más Frecuentes En Karting. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Universidad FaSta. Buenos Aires-Argentina. 2015. Págs. 7-8. [consulta: 22 noviembre 2023]. Disponible en: <http://redi.ufasta.edu.ar:8082/jspui/handle/123456789/213>.

15. **GONZA VALLE, Rovinson Efren.** Diseño y construcción de un vehículo tipo Go-Kart con estructura tubular [en línea]. . (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Instituto Superior Tecnológico Vida Nueva. Quito-Ecuador. 2023. Págs. 16-19. [consulta: 11 noviembre 2023]. Disponible en: <http://dspace.istvidanueva.edu.ec/xmlui/handle/123456789/300>.
16. **GRZEBIETA, Raphael; et al.** “development of proposed dynamic crash tests and performance criteria for the australian concession go-karts standard” *Indersciencie Online* [en línea]. 2014. (United State of America), vol 2 (1), págs. 3-5. [consulta: 27 noviembre 2023]. ISSN: 1943-9962. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/264441821\\_Reconstruction\\_of\\_a\\_go-karting\\_fatality](https://www.researchgate.net/publication/264441821_Reconstruction_of_a_go-karting_fatality).
17. **MALDONADO JAZZÁN, Raymundo.** Investigación acerca de los dummies [en línea]. . (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Universidad de las Américas Puebla. Cholula Puebla. Puebla de Zaragoza-Mexico. 2004. págs 6-9 [consulta: 20 enero 2024]. Disponible en: <http://catarina.udlap.mx/tales/index.html>
18. **MARTÍNEZ SÁEZ; et. al.** “Optimización de Modelos en Elementos Finitos de los Maniqués Hybrid-III Percentiles 50% y 95% para su Aplicación en Transporte Ferroviario”. *Asociación Española de Ingeniería Mecánica*. [en línea], 2016. (España). Pág. 804 [consulta: 5 diciembre 2023]. Disponible en: [https://oa.upm.es/46704/1/INVE\\_MEM\\_2016\\_253816.pdf](https://oa.upm.es/46704/1/INVE_MEM_2016_253816.pdf).
19. **MEJÍA BOLAÑOS, Kamila Valeria.** Diseño de soportes para la implementación de un tren de potencia eléctrico sobre un chasis de karting homologado bajo la norma CIK – FIA 30/ca/14 y análisis estructural mediante elementos finitos. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2022. págs. 40-47.
20. **OCHOA GREGORIO, David.** Diseño y análisis de un vehículo tipo kart. 2013. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel) Universidad Zaragoza. Zagan. Zaragoza-España págs. 10-13. [consulta: 5 diciembre 2023]. Disponible en: <http://zagan.unizar.es>.
21. **POMA QUEZADA, Pablo Andrés.** Diseño y fabricación del chasis para un kart KF4 según la normativa CIK/FIA. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Universidad

- Politécnica Salesiana. Cuenca-Ecuador. 2018. págs. 9-14. [consulta: 5 noviembre 2023]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15766/1/UPS-CT007735.pdf>.
22. **ROSS, H.E; et al.** “Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway features” *National cooperative highway research program*. [en línea]. 1993, (Washington, D.C), vol. 127 (92), págs. 199-205. [consulta: 4 noviembre 2023]. ISSN 0077-5614. Disponible en: [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_350-a.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_350-a.pdf).
23. **SINCHI SINCHI, Victor Patricio & TORO AGUAVIL, Luis Alverto.** Estudio e implementación de un tren eléctrico para un go kart para la carrera de ingeniería automotriz. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba- Ecuador. 2023 págs. 27-28
24. **TINARD, V; et al.** “Modelling and validation of motorcyclist helmet with composite shell”. *International Journal of Crashworthiness*, [En línea], 2012. (France), vol. 17 (2), págs. 3-4. [consulta: 3 diciembre 2023]. ISSN 13588265. Disponible en: DOI 10.1080/13588265.2011.648465.
25. **UNECE/CEPE.** Reglamento n. 94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas — Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal [2018/178]. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html>.
26. **VÁZQUEZ, Manuel & LÓPEZ, Eloisa.** *El método de los elementos , finitos aplicado al análisis estructural* [en línea]. Madrid-España. Noela. 2001. [consulta: 4 diciembre 2023]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/83570224.pdf>.
27. **VETTURAZZI, Rafael.** *Ventajas de la integración de LS-DYNA con las herramientas de Ansys.* [blog]. Brasil. 2020. [consulta: 5 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/ventajas-de-la-integracion-de-ls-dyna-con-las-herramientas-de-ansys/>.

## ANEXOS

### Anexo A: Contrato de licencia de programas



Riobamba 07 de Septiembre del 2023

Estimado

Srta.

Aguirre Sánchez Evelyn Brigitt (solicitante), con el número de cédula 060515856-7 estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, reciba un cordial saludo y en contestación a la solicitud ingresada de su parte el 04 de Septiembre del 2023, por medio de este documento **ACEPTAMOS** la propuesta para brindarle nuestra cooperación en el tema de investigación **ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LAS LESIONES DEL CONDUCTOR DE UN VEHÍCULO DE KARTING DE COMPETENCIAS INTERUNIVERSITARIAS EN UN IMPACTO FRONTAL POR MEDIO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL.** (Nota el tema de investigación podría cambiar en forma debido a revisiones dadas en el proceso de aprobación).

Para el desarrollo de esta investigación CENDINGENIERIA S.A. facilitará al solicitante los siguientes recursos:

Licenciamiento y el material necesario para el manejo del software ANSYS LS-DYNA para el periodo Octubre 2023 / Octubre 2024

Licenciamiento y el material necesario para el manejo del software SOLIDWORKS para el periodo Octubre 2023 / Octubre 2024

Seguimiento técnico

CENDINGENIERIA S.A. a través de su representante legal Milton Mario Brito Palma declara:

Que la presente colaboración al ser un tema de investigación realizado por parte de la solicitante no vincula de ninguna manera al CENDINGENIERIA S.A. sino que se convierte únicamente en un medio de difusión comercial del software LS-DYNA, por lo que los derechos de autor de la investigación realizada pertenecerán al autor del tema de tesis y a la universidad que pertenece la misma.

Las partes convienen de mutuo acuerdo respetar los principios de confidencialidad e imparcialidad de la información generada en la investigación y documentación suministrada por CENDINGENIERIA S.A. al solicitante.

Para finalizar recalcamos el interés de la elaboración de este tema de investigación el cual tiene un alto impacto en seguridad vehicular y vial.

Atentamente



Ing. Milton Mario Brito Palma

Gerente General

CENDINGENIERIA S.A.

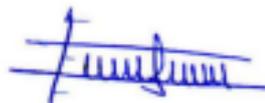
Dirección:

Oficina 205 Edificio Plaza Ficoa

Av. Rodrigo Pachano y Juan Montalvo

Teléfono: 032821170

[www.cendingenieria.com](http://www.cendingenieria.com)

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "Evelyn Brigitta Aguirre Sánchez".

Evelyn Brigitta Aguirre Sánchez

Estudiante de Ingeniería Mecánica

Teléfono: 0998253694

[evelyn.aguirres@epoch.edu.ec](mailto:evelyn.aguirres@epoch.edu.ec)

II

(Actos no legislativos)

## ACTOS ADOPTADOS POR ÓRGANOS CREADOS MEDIANTE ACUERDOS INTERNACIONALES

Sólo los textos originales de la CEPE surten efectos jurídicos con arreglo al Derecho internacional público. La situación y la fecha de entrada en vigor del presente Reglamento deben verificarse en la última versión del documento de la CEPE (TRANS/WP.29/143), que puede consultarse en:

<http://www.uneeo.org/trans/main/wp29/wp29wg1/wp29gen/wp29docx.html>

**Reglamento n.º 94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas — Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal [2018/178]**

Incorpora todo el texto válido hasta:

serie 03 de enmiendas. Fecha de entrada en vigor: 18 de junio de 2016

### ÍNDICE

#### REGLAMENTO

1. *Ámbito de aplicación*
2. *Definiciones*
3. *Solicitud de homologación*
4. *Homologación*
5. *Especificaciones*
6. *Instrucciones para los usuarios de vehículos equipados con airbags*
7. *Modificaciones y extensión de la homologación del tipo de vehículo*
8. *Conformidad de la producción*
9. *Sanciones por no conformidad de la producción*
10. *Cese definitivo de la producción*
11. *Disposiciones transitorias*
12. *Nombre y dirección de los servicios técnicos encargados de realizar los ensayos de homologación y de las autoridades de homologación de tipo*

#### ANEXOS

1. *Comunicación*
2. *Ejemplos de marcas de homologación*
3. *Procedimiento de ensayo*
4. *Criterio de comportamiento de la cabeza (HPC) y criterios de rendimiento de aceleración de la cabeza de 3 ms*
5. *Disposición e instalación de los maniqués y ajuste de los sistemas de retención*

## **Anexo C:** Planos de go kart