



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**“EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE CASCOS DE  
MOTOCICLETAS MEDIANTE MÉTODO FEM Y PRUEBAS  
ESTANDARIZADAS NTE INEN 2669:2013”**



**AUTORES:** Cangás Morillo Jaime Noé

Solis Velarde Bryan Santiago

**DIRECTOR:** Rosero Añazco Ramiro Andrés

Ibarra - Ecuador

2024

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**  
**IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1050218674		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	CANGAS MORILLO JAIME NOE		
<b>DIRECCIÓN:</b>	IBARRA, Urb. Fepcomi Calle H y Calle B N 2-22.		
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:cangasjaime@gmail.com">cangasjaime@gmail.com</a>		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	-	<b>TELF. MÓVIL</b>	0987435826

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1005046352		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	SOLIS VELARDE BRYAN SANTIAGO		
<b>DIRECCIÓN:</b>	IBARRA, Ana Luisa Leoro y José Ignacio Canelos 1-24.		
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:solisbryantgt@gmail.com">solisbryantgt@gmail.com</a>		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	-	<b>TELF. MÓVIL</b>	0987435826

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO:</b>	EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE CASCO DE MOTOCICLETAS MEDIANTE MÉTODO FEM Y PRUEBAS ESTANDARIZADAS NTE INEN 2669:2013
<b>AUTOR (ES):</b>	CANGAS MORILLO JAIME NOE SOLIS VELARDE BRYAN SANTIAGO
<b>FECHA: AAAA/MM/DD</b>	2024/10/15
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
<b>CARRERA/PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	INGENIERO AUTOMOTRIZ
<b>DIRECTOR:</b>	Ing. Rosero Añazco Ramiro Andrés MSc.

## **AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD**

Yo, Cangás Morillo Jaime Noé, con cédula de identidad Nro. 1050218674, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 15 días del mes de octubre de 2024

**EL AUTOR:**



Jaime Cangás

## **AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD**

Yo, Solis Velarde Bryan Santiago, con cédula de identidad Nro. 1005046352, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 15 días del mes de octubre de 2024

**EL AUTOR:**



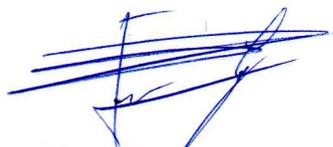
Santiago Solis

## CONSTANCIAS

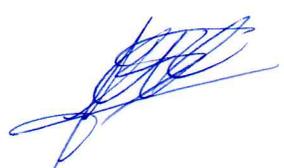
Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 15 días del mes de octubre de 2024

### LOS AUTORES:



Jaime Cangás



Santiago Solis

# CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 15 de octubre de 2024

Ing. Rosero Añazco Ramiro Andrés MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

  
ING. ROSERO AÑAZCO RAMIRO ANDRÉS MSC.

C.C.: 1718193616

## APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

Ibarra, 15 de octubre de 2024

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Evaluación de la resistencia de cascos de motocicletas mediante método FEM y pruebas estandarizadas NTE INEN 2669:2013” elaborado por Cangás Morillo Jaime Noé; Solis Velarde Bryan Santiago previo a la obtención del título de ingeniero automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

  
ING. ROSERO AÑAZCO RAMIRO ANDRÉS MSC.

C.C.: 1718193616

  
ING. MONTENEGRO SIMANCAS VÍCTOR JAVIER MSC.

C.C.: 1717035149

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía y darme la sabiduría en cada paso de este camino.

A mi madre, Maribel Morillo, cuyo amor incondicional y sacrificios han sido el corazón de mi vida personal y académica. Su ejemplo de fortaleza y dedicación no solo me ha guiado, sino que ha sido mi mayor fuente de inspiración y motivación para seguir.

A mi padre, Lenin Cangás, cuya orientación constante ha sido la base de mi vida académica y personal. Su dedicación diaria y su guía me inspiran a superarme cada día para ser la mejor versión de mí mismo.

A mis hermanos, Soledad Cangás, mi mejor amiga y mi mayor apoyo. Su fortaleza y determinación me han enseñado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Y a Ángel Santiago, que, aunque partió demasiado pronto, siempre ha vivido en mi corazón, dándome consuelo y refugio para continuar cuando más lo necesito.

A mis abuelos, Marlene Báez, Jaime Cangás, Victoriano Báez, Alfonso Morillo y Estela Quespaz, por ser pilares fundamentales en mi vida. Sus enseñanzas y su ejemplo han inspirado y guiado mi camino desde siempre.

Finalmente, a mi amada Melany, por impulsarme a seguir adelante cuando el camino parecía más incierto. Con su amor y compañía ha sido mi apoyo incondicional durante cada etapa de este proceso.

**Jaime Cangás**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de investigación se lo dedico a Dios, a mis padres Lorena Velarde y Ramiro Solis, a mi hermano Miguel Solis, a mis abuelos Miguel Velarde, Carmelina Cruz y Aida Montalvo

Le dedico este logro a mis padres con el fin de que sientan orgullosos de su hijo y demostrarles que sus enseñanzas me sirvieron y me continuarán sirviendo durante toda mi vida. Dedico este esfuerzo también a mi hermano, que sepa que siempre me tendrá para apoyarlo y guiarlo en cualquier problema que tenga o cualquier objetivo que quiera cumplir.

Dedico este trabajo a mis familiares y amigos y les deseo mucho éxito para que Dios les devuelva mucho más de lo que me ayudaron en el transcurso de esta etapa.

## AGRADECIMIENTO

Primero, agradezco a Dios, por ser mi guía a lo largo de este proceso, permitiéndome culminar esta importante etapa de mi vida. A mis padres, y mis hermanos, quienes con su amor incondicional y su apoyo constante me brindaron la motivación para superar cada desafío. Gracias a ellos por creer siempre en mí y acompañarme en este camino hacia la finalización de esta etapa de mi formación académica.

Asimismo, expreso mi profundo agradecimiento a toda mi familia y amigos quienes han sido partícipes de esta fase académica, especialmente a mi abuela Marlene Báez, su cariño y ejemplo me han dado la fuerza para seguir adelante.

También quiero agradecer a mi amigo y colega de investigación Santiago Solís, por su invaluable apoyo y colaboración durante todo este proyecto. Su compromiso y dedicación han sido fundamentales para el éxito de este trabajo.

Finalmente, a la Universidad Técnica del Norte, por la educación brindada y por ser el espacio donde adquirí los conocimientos y habilidades necesarias para desarrollarme profesional y personalmente. Mi sincero agradecimiento al director, Ing. Ramiro Rosero, cuyo apoyo, paciencia y orientación técnica fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo

**Jaime Cangás**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por brindarme la determinación para culminar este objetivo junto con mi compañero y coautor Jaime Cangás que siempre demostró apoyo y dedicación.

Agradezco también a mis padres por darme la fuerza y motivación en todo momento de mi carrera y servirme de ejemplo de vida inculcándome valores indispensables para cumplir mis metas. Agradezco también de forma general a mi familia y amigos por la ayuda prestada en los momentos difíciles y que sin ellos no habría podido cumplir con mi trabajo de titulación.

Por último, agradezco a la Universidad Técnica del Norte por darme los conocimientos y habilidades necesarias para culminar mi carrera universitaria, y doy mérito también al director In. Ramiro Rosero que me sirvió de guía para desarrollar este trabajo de investigación.

**Santiago Solis**

## RESUMEN

Este trabajo evalúa la resistencia estructural de cascos de motocicleta utilizando el Método de Elementos Finitos (FEM) y pruebas estandarizadas de acuerdo con la normativa NTE INEN 2669:2013. El estudio busca optimizar el proceso de homologación de cascos de gama baja en Ecuador, donde no existen laboratorios acreditados para realizar estas pruebas. Se comparan los requisitos de normativas internacionales como ECE 22.05 y FMVSS 218, y se propone un protocolo de pruebas basado en ensayos experimentales y simulaciones FEM.

La metodología empleada involucra la construcción de dos equipos experimentales: uno para los ensayos de rigidez longitudinal y transversal y otro para la absorción de impacto, ambos diseñados para someter a los cascos a condiciones normadas. El equipo de rigidez mide las deformaciones bajo cargas crecientes de hasta 630 N, mientras que el equipo de absorción utiliza impactadores semiesféricos y planos para evaluar la capacidad de los cascos de disipar la energía en impactos de velocidades de 7 m/s y 5.5 m/s.

En la simulación, el modelo del casco fue generado a partir de un escaneo 3D que luego se simplificó en SolidWorks y se exportó al software de simulación LS-DYNA. Las propiedades mecánicas de los materiales, como la carcasa de fibra de vidrio y la espuma protectora de EPS, se asignan siguiendo modelos de plasticidad lineal y deformación volumétrica. Los ensayos virtuales incluyen simulaciones de rigidez y absorción de impacto con velocidades y cargas que replican las condiciones experimentales. El análisis de los resultados incluyó la evaluación de las tensiones de Von Mises, la energía de Hourglass, y las deformaciones, con el fin de validar la resistencia estructural del casco bajo diferentes tipos de impacto.

El análisis comparativo entre los ensayos físicos y las simulaciones mostró que, aunque existen discrepancias en los valores absolutos, las tendencias generales en términos de deformación y absorción de energía son consistentes. Esto valida el uso del FEM como una herramienta preliminar para la evaluación de cascos, aunque se recomienda realizar ajustes en las propiedades de los materiales para mejorar la proporción entre las simulaciones y los resultados experimentales.

**Palabras Clave:** Simulación, Método FEM, Homologación de cascos, INEN 2669:2013

## ABSTRACT

This study evaluates the structural resistance of motorcycle helmets using the Finite Element Method (FEM) and standardized tests according to the NTE INEN 2669:2013 regulation. The research aims to optimize the homologation process of low-end helmets in Ecuador, where there are no accredited laboratories to perform these tests. A comparison is made with international regulations such as ECE 22.05 and FMVSS 218, and a test protocol is proposed based on experimental tests and FEM simulations.

The methodology involves the construction of two experimental setups: one for longitudinal and transverse rigidity tests and another for impact absorption, both designed to subject helmets to standardized conditions. The rigidity equipment measures deformations under increasing loads of up to 630 N, while the absorption equipment uses hemispherical and flat impactors to evaluate the helmets' ability to dissipate energy in impacts at speeds of 7 m/s and 5.5 m/s.

In the simulation, the helmet model was generated from a 3D scan, then simplified in SolidWorks and exported to the simulation software LS-DYNA. The mechanical properties of the materials, such as the fiberglass shell and EPS protective foam, were assigned following linear plasticity and volumetric strain models. The virtual tests include simulations of rigidity and impact absorption with speeds and loads replicating experimental conditions. The analysis of the results included the evaluation of Von Mises stresses, Hourglass energy, and deformations to validate the structural resistance of the helmet under different types of impacts.

The comparative analysis between the physical tests and the simulations showed that, although there are discrepancies in absolute values, the general trends in terms of deformation and energy absorption are consistent. This validates the use of FEM as a preliminary tool for helmet evaluation, though it is recommended to adjust material properties to improve the correlation between simulations and experimental results.

**Keywords:** Simulation, FEM Method, Helmet Homologation, INEN 2669:2013

## **LISTA DE SIGLAS**

**LOTTTSV.** Ley orgánica de transporte terrestre tránsito y seguridad vial.

**NTE.** Norma Técnica Ecuatoriana.

**INEN.** Servicio Ecuatoriano de Normalización.

**FMVSS.** Federal Motor Vehicle Safety Standards

**ECE.** Economic Commission for Europe

**FEM.** Método de Elementos Finitos

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>xii</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>xxvi</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>xxvii</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>xxviii</b>
Objetivo General.....	xxviii
Objetivos Específicos.....	xxviii
<b>Alcance .....</b>	<b>xxix</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Seguridad de las Motocicletas .....	1
1.1.1. Seguridad Pasiva.....	1
1.1.2. Cascos de Motocicletas.....	1
1.2. Accidentabilidad .....	4
1.2.1. Contexto Global.....	4
1.2.2. Estadísticas de Accidentes de Motocicletas.....	4
1.2.3. Factores Contribuyentes a la Accidentabilidad de las Motocicletas.....	5
1.2.4. Consecuencias de los Accidentes de Motocicletas. ....	5
1.2.5. Principales Lesiones por Accidentes de Motocicleta.....	6
1.3. Normativas y Reglamentos Técnicos.....	7
1.3.1. Reglamento Técnico Ecuatoriano. ....	7
1.3.2. Reglamento Europeo.....	11
1.3.3. Reglamento Norteamericano .....	13
1.3.4. Análisis de Requerimientos Técnicos.....	17
1.4. Método de Elementos Finitos .....	17

1.4.1.	Principios de Formulación del FEM.....	17
1.4.2.	Tipos de Elementos Finitos.....	18
1.4.3.	Herramientas de Software para FEM.....	19
1.4.4.	Tensión de Von Misses.....	21
1.4.5.	Efecto Hourglass.....	22
1.4.6.	Deformación Efectiva.....	22
<b>CAPÍTULO II .....</b>		<b>23</b>
<b>2.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
2.1.	Materiales y Métodos.....	23
2.2.	Materiales.....	23
2.2.1.	Casco de Motocicleta.....	23
2.2.2.	Horma .....	24
2.2.3.	Equipo de Absorción de Impacto.....	24
2.2.4.	Prensa Hidráulica .....	25
2.2.5.	Arduino Uno .....	26
2.2.6.	Celda de Carga 6001.....	27
2.2.7.	Modulo HX711 .....	27
2.2.8.	Acelerómetro MPU6050.....	28
2.2.9.	Protoboard.....	28
2.2.10.	Computador.....	29
2.2.11.	Scanner 3D.....	29
2.2.12.	Software CAD.....	30
2.2.13.	Software CAE.....	31
2.2.14.	Software para Obtención de Datos .....	31
2.2.15.	Software de Procesamiento de Datos Excel.....	31

2.3.	Proceso Metodológico .....	32
2.4.	Protocolo para Ensayos.....	33
2.4.2.	Acondicionamiento de Cascos.....	34
2.4.3.	Posicionamiento del Casco en la Máquina de Ensayo.....	35
2.4.4.	Ensayo de Rigidez.....	35
2.4.5.	Ensayo de Absorción de Impacto .....	36
2.5.	Diseño y Fabricación de Equipos de Ensayo.....	39
2.5.1.	Equipo 1: Rigidez .....	39
2.5.2.	Equipo 2: Absorción de Impacto .....	43
2.6.	Simulación .....	45
2.6.2.	Modelado CAD del Casco .....	46
2.6.3.	Ensayo de Rigidez.....	51
2.6.4.	Ensayo de Absorción de Impacto .....	55
2.7.	Análisis Comparativo.....	59
2.7.1.	Análisis de Graficas .....	59
2.7.2.	Precisión de los Modelos .....	60
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>61</b>
<b>3.</b>	<b>Resultados y Discusión.....</b>	<b>61</b>
3.1.	Ensayo de Rigidez.....	61
3.1.1.	Ensayos Físicos.....	61
3.1.2.	Ensayo Simulados.....	64
3.1.3.	Análisis comparativo y discusión .....	71
3.2.	Ensayo de Absorción de Impacto .....	76
3.2.1.	Ensayos Físicos.....	77
3.2.2.	Ensayos Simulados .....	79

3.2.3. Análisis Comparativo y Discusión.....	87
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>95</b>
<b>4. Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>95</b>
4.1. Conclusiones.....	95
4.2. Recomendaciones .....	97
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>98</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>104</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1. Clasificación de los cascos. ....</b>	<b>2</b>
<b>Tabla 1.2. Partes de casco de moto. ....</b>	<b>2</b>
<b>Tabla 1.3. Accidentes de tránsito en la Comunidad Andina. ....</b>	<b>5</b>
<b>Tabla 1.4. Comparación Normativas para homologaciones. ....</b>	<b>17</b>
<b>Tabla 1.5. Tipos de elementos finitos. ....</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 1.6. Comparación Cualitativa Software. ....</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 2.1. Características del computador. ....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 2.2. Características Técnicas Scanner Einstar 3D. ....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 2.3. Acondicionamiento de muestras. ....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 2.4. Materiales Equipo de rigidez. ....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 2.5. Materiales estructurales equipo de absorción de impacto. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 2.6. Conexiones Arduino UNO/MPU6050. ....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 2.7. Propiedades mecánicas carcasa de casco. ....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 2.8. Propiedades mecánicas espuma de protección. ....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 2.9. Propiedades mecánicas placas para ensayo. ....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 2.10. Unidades utilizadas para la simulación de rigidez. ....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 2.11. Detalle de malla para simulación de rigidez. ....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 2.12. Unidades utilizadas para la simulación de absorción de impactos. ....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 2.13. Detalle de malla para simulación de absorción de impactos. ....</b>	<b>57</b>
<b>Tabla 3.1. Deformaciones en el casco durante el ensayo de rigidez longitudinal. ....</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 3.2. Deformaciones en el casco durante el ensayo de rigidez transversal. ....</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 3.3. Deformaciones ensayo simulado vs ensayo de validación. ....</b>	<b>76</b>
<b>Tabla 3.4. Aceleraciones en la horma: Ensayo Físico vs Simulado. ....</b>	<b>90</b>
<b>Tabla 3.5. Fuerzas en la horma: Ensayo Físico vs Simulado. ....</b>	<b>90</b>

**Tabla 3.6. Aceleración transmitida a la horma ..... 93**

**Tabla 3.7. Fuerza en el centro de la horma ..... 93**

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1. Partes de casco de moto. ....</b>	<b>3</b>
<b>Figura 1.2. Siniestros de motocicletas año 2023. ....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 1.3. Trazado de la extensión mínima de protección. ....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 1.4. Horma para ensayo. ....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 1.5. Ensayo de penetración. ....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 1.6. Simulador cabeza - Plano lateral. ....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 1.7. Simulador de cabeza - plano sagital medio. ....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 1.8. Criterios de selección de software. ....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.1. Casco de motocicleta. ....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 2.2. Horma para ensayo ....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 2.3. Equipo Absorción de Impacto.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 2.4. Prensa Hidráulica.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 2.5. Arduino UNO.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 2.6. Celda de carga 6001 .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 2.7. Modulo HX711.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2.8. Modulo MPU6050.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2.9. Protoboard. ....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 2.10. Interfaz Software obtención de datos .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 2.11. Diagrama de flujo proceso metodológico. ....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 2.12. Diagrama de flujo para Ensayos Físicos. ....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 2.13. Diagrama de Flujo Ensayo de Rigidez. ....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 2.14. Plano longitudinal y transversal. ....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 2.15. Diagrama de flujo ensayo de absorción de impacto. ....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 2.16. Equipo Ensayo de Rigidez. ....</b>	<b>40</b>

<b>Figura 2.17. Diagrama eléctrico Celda de carga.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 2.18. Diagrama de flujo Arduino .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 2.19. Equipo de Absorción de Impactos. ....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 2.20. Diagrama Conexiones Arduino/MPU6050.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 2.21. Diagrama de Flujo para simulación. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 2.22. Ubicación de marcadores para escaneo.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 2.23. Casco para exportar en formato STL.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 2.24. Modelo 3D del casco.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 2.25. Curva de esfuerzo-deformación para material de carcasa de casco.....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 2.26. Curva de esfuerzo-deformación volumétrica para EPS .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 2.27. Casco y placas para simulación.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 2.28. Mallado de casco para ensayo de rigidez. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 2.29. Calidad de malla.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 2.30. Híbrido III percentil 50 masculino .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 2.31. Mallado de casco para ensayos de absorción de impactos.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 2.32. Calidad de malla en ensayos de absorción de impactos. ....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 3.1. Carga entre placas ensayo de rigidez eje transversal. ....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 3.2. Carga entre placas ensayo de rigidez eje longitudinal. ....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 3.3. Deformación ensayo de rigidez .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 3.4. Curva de aplicación de carga para ensayo de rigidez.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 3.5. Deformación ensayo de rigidez longitudinal.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 3.6. Deformación ensayo de rigidez transversal .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 3.7. Tensiones de Von Misses ensayo de rigidez .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 3.8. Energía de Hourglass: ensayo de rigidez .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 3.9. Curva de deformación: ensayo de rigidez longitudinal .....</b>	<b>71</b>

<b>Figura 3.10. Curva de deformación: ensayo de rigidez transversal.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 3.11. Deformaciones ensayo simulado vs ensayo de validación.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 3.12. Aceleración en la horma: impacto vertical imp. semiesférico.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 3.13. Aceleración en la horma: impacto vertical imp. plano.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 3.14. Aceleración en la horma: impacto lateral imp. plano.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 3.15. Aceleración en la horma del Dummy: impacto vertical imp. semiesférico.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 3.16. Aceleración en la horma del Dummy: impacto vertical imp. plano.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 3.17. Aceleración en la horma del Dummy: impacto lateral imp. plano.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 3.18. Tensiones de Von Misses ensayo de absorción de impacto.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 3.19. Energía de Hourglass ensayo de absorción de impacto.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 3.20. Curva de aceleración: impacto vertical imp. semiesférico.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 3.21. Curva de aceleración: impacto vertical imp. plano.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 3.22. Curva de aceleración: impacto lateral imp. plano.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 3.23. Aceleraciones Obtenidas en los impactos.....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 2.1. Cálculo de la fuerza.....</b>	<b>38</b>
<b>Ecuación 2.2. Ecuación de extrapolación de la aceleración. ....</b>	<b>38</b>
<b>Ecuación 2.3. Ecuación de la velocidad.....</b>	<b>39</b>

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo I. Cascos de gama baja. ....</b>	<b>104</b>
<b>Anexo II. Acondicionamiento en agua .....</b>	<b>104</b>
<b>Anexo III. Ensayo Experimental de Rigidez .....</b>	<b>105</b>
<b>Anexo IV. Ensayo Experimental Absorción de Impacto.....</b>	<b>106</b>
<b>Anexo V. Planos Equipo de Absorción de Impacto .....</b>	<b>107</b>

## INTRODUCCIÓN

En los años recientes, se ha evidenciado un incremento en el uso de motocicletas como medio de transporte, como lo demuestran las cifras de ventas totales de 94.350 motos en 2017 y 184.175 motos en 2022. Además, el mercado ha experimentado un aumento en la oferta de motocicletas y Scooter eléctricos, con ventas de 4.721 en 2017 y 11.627 en 2022 [1]. Además, aumentó el riesgo de accidentes y lesiones en la cabeza para conductores y pasajeros, por ejemplo, en 2017 hubo 2.414 accidentes, en cambio en 2022 los accidentes en motocicletas ocuparon el 30,86 % de siniestros en Ecuador con 6.709 accidentes [2].

Aunque existe la norma que regula los estándares mínimos de seguridad de los cascos de motocicleta, el proceso de certificación es netamente documental como se detalla en el RTE-086-1R, donde especifica que el certificado de conformidad de primera parte se aceptará para la aprobación (homologación) del producto hasta que existan laboratorios acreditados o designados en el país cuya acreditación sea reconocida por el SAE [3].

Esto ha permitido la disponibilidad en el mercado de cascos que no cumplen con los estándares de seguridad necesarios y ha contribuido al aumento del número de fallecidos en accidentes de motocicleta. En Quito había, hasta octubre del 2015, un promedio de ocho accidentes de motociclistas al día, en los casos más tristes, las víctimas no sobreviven al impacto y en el 70% de casos, el casco que usaron las víctimas no era el adecuado, no les protegió y se rompió al golpearse contra el pavimento [4]. En concreto, en 2017 se registraron 562 fallecimientos por accidentes de motocicleta, cifra que se incrementó a 750 en 2022 [2].

## Justificación

La [5] estipula que para circular en motocicletas es obligatorio usar cascos homologados regulados con la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2669:2013 la cual dictamina los requisitos mínimos y técnicas para los ensayos que se exige a los cascos para proteger la cabeza de motoristas y pasajeros. El casco es fundamental en la protección pasiva de la motocicleta, ya que debe actuar en caso de accidente. Un casco certificado puede disminuir significativamente en más del 80% la posibilidad de sufrir lesiones graves y reduce un 40% la posibilidad de fallecer en caso de un accidente [6].

Dentro del territorio ecuatoriano no existe aún un laboratorio acreditado o designado por el SAE que se capaz de realizar los ensayos determinados por la normativa NTE INEN 2669:2013 que certifiquen la homologación de los cascos de motocicletas [7]. En su ausencia, se estableció un proceso de certificación documental en el RTE-086-1R, donde especifica como requisito mínimo de homologación un certificado de conformidad con sello de calidad INEN, se trata de un escrito que se da a las compañías que buscan la aprobación de uno o más productos ofrecidos al público, asegurando que cumplen con los estándares establecidos en las regulaciones del país [4] . Sin embargo, al no tener la disponibilidad de un laboratorio para ejecutar los ensayos respectivos no es posible llevar a cabo este proceso de homologación con rigurosidad. De allí parte el problema de falta de control y evaluación de los cascos de motocicletas, con respecto a su resistencia a las pruebas que se especifican en la normativa.

La implementación de un laboratorio que cumpla con los requisitos generales, estructura, procesos y sistemas de gestión establecidos en la norma NTE INEN 17025 demanda una gran cantidad de recursos. Por otro lado, la propuesta de esta investigación es implementar una nueva metodología de ensayo para la certificación de homologación que implique mejorar la eficiencia de los procesos utilizando herramientas de simulación de elementos finitos y que a corto plazo permita mejorar el control y regulación de los cascos de gama baja comercializados en el territorio ecuatoriano.

El presente proyecto de investigación se enmarca en el Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 del Gobierno de Ecuador, específicamente en el eje de Políticas Regulatorias cumpliendo con el objetivo 14: Fortalecer las capacidades del Estado y menciona en la política 14.3: Fortalecer la implementación de las buenas prácticas regulatorias que garanticen la transparencia, eficiencia

y competitividad del estado [8]. Mediante el método FEM se pretende implicar procesos claros y accesibles con una implementación ágil y efectiva generando confianza en las políticas gubernamentales.

De igual manera, involucra el eje de seguridad integral mediante el objetivo 9: “Garantizar la seguridad ciudadana, orden público y gestión de riesgos” mediante la política 9.2 que dice “fortalecer la seguridad de los sistemas de transporte terrestre y aéreo, promoviendo ambientes seguros” y específicamente la meta 9.2.1 “Disminuir la tasa de mortalidad por accidentes de tránsito, in situ, de 12,62 a 11,96 por cada 100.000 habitantes” [8]. En este contexto, nuestra investigación busca optimizar el proceso regulatorio de los cascos de motocicletas filtrando del mercado aquellos productos que no cumplen con los requisitos mínimos de homologación y de forma indirecta minimizar el riesgo de lesiones en accidentes por cascos no homologados.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Evaluar los cascos de motocicleta de gama baja disponibles en el mercado, analizando la normativa vigente y desarrollando nuevos protocolos de ensayo para evaluar la resistencia estructural de cascos mediante el método FEM.

### **Objetivos Específicos**

- Analizar los requerimientos técnicos establecidos en la normativa nacional e internacional referentes a los ensayos mecánicos a través de una revisión bibliográfica para definir los requisitos que deben cumplir los cascos de motocicleta.
- Desarrollar un equipo para evaluar la resistencia estructural de los cascos según requerimientos de la normativa para validar los ensayos FEM.
- Definir un protocolo de pruebas usando el método FEM en función de los requerimientos técnicos de ensayos establecidos en la normativa nacional, americana y europea para evaluar los cascos más económicos existentes en el mercado.

- Establecer la viabilidad del método FEM como herramienta de ensayo comparando los resultados obtenidos para proponer una modificación al reglamento actual sobre el proceso de certificación de los cascos de motocicleta.

## **Alcance**

El alcance de esta tesis se establece para evaluar los cascos cerrados de motocicleta de gama baja disponibles en el mercado, centrándose en el análisis de su resistencia estructural. Para lograrlo, se realizará un análisis de la norma NTE INEN 2669:2013, así como de normativas internacionales DOT y ECE, para identificar los requisitos mínimos y los ensayos establecidos para los cascos de motocicleta.

En base a esta revisión bibliográfica, se pretende definir un protocolo de pruebas adecuado, basado en el método de Elementos Finitos (FEM), que permita evaluar de manera efectiva la resistencia estructural de los cascos de motocicleta de gama baja. Este protocolo se diseñará considerando los requisitos técnicos y ensayos establecidos en la normativa siendo estos: absorción de impacto y rigidez.

Para realizar las pruebas de resistencia estructural, se desarrollará un equipo de ensayo experimental, diseñado y construido según los requerimientos específicos establecidos en la normativa vigente. Este equipo permitirá realizar los ensayos necesarios y validar la eficacia del método FEM en la evaluación de la resistencia estructural de los cascos.

Se compararán los resultados obtenidos por el método FEM con los de los ensayos experimentales, para evaluar la viabilidad y la confiabilidad del FEM como herramienta de ensayo para la resistencia estructural de los cascos de motocicleta de gama baja. Se analizará proponer modificaciones al reglamento actual relacionado con el proceso de certificación de los cascos, según los resultados y la validez del método FEM, buscando así mejorar los estándares y la seguridad en el uso de los cascos de motocicleta.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Seguridad de las Motocicletas

Las motocicletas, debido a su configuración abierta y dimensiones reducidas, presentan mayores riesgos de lesiones para sus ocupantes en caso de accidente en comparación con los automóviles [9]. Por lo tanto, la seguridad es un aspecto crítico para considerar en estos vehículos, por ello nos centraremos en la seguridad pasiva que es responsable de la protección de los usuarios posterior a un siniestro de tránsito.

#### *1.1.1. Seguridad Pasiva*

Comprende los elementos orientados a minimizar las lesiones cuando un accidente es inevitable. Se establece el equipo de protección personal como cascos, chaquetas, guantes y botas especialmente diseñados para proteger luego del siniestro [10]. Pero el casco es el único equipo obligatorio según el reglamento nacional y protege a la cabeza, la parte del cuerpo más importante [11].

#### *1.1.2. Cascos de Motocicletas*

La historia de los cascos de motocicletas se remonta al año 1914 cuando el doctor Eric Garner sugirió que se usaran en pruebas deportivas y los cascos se estrenaron en el Tourist Trophy en la Isla de Man. Sin embargo, no fue hasta 1941 cuando se publicó un estudio que demostraba la necesidad de utilizar cascos de motocicleta, estudio publicado por el doctor Hugh Cairns y finalmente debido a las investigaciones de Charles F. Lombard se desarrolló un casco como se le conoce en la actualidad con un diseño rígido en el exterior y una zona acolchonada en el interior [12]. Los cascos pueden clasificarse por su diseño tal se indica en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Clasificación de los cascos.

<b>Tipo</b>	<b>Casco Abierto</b>	<b>Casco Cerrado</b>	<b>Casco Mixto</b>
<b>Descripción</b>	Cubre la parte superior, trasera y laterales de la cabeza, mientras que el rostro queda expuesto y no hay una barbilla.	Un casco integral cubre la cabeza y el cuello e incluye una barbilla.	Cubren la parte superior de la cabeza y el área desde la frente hasta las cejas, dejando el resto del rostro expuesto.

Fuente: [13].

Después, analizamos los componentes individuales que conforman un casco de moto, esenciales para su funcionalidad y seguridad. La Tabla 1.2 detalla las partes específicas de un casco de moto, incluyendo una descripción de cada componente y sus propiedades.

**Tabla 1.2.** Partes de casco de moto.

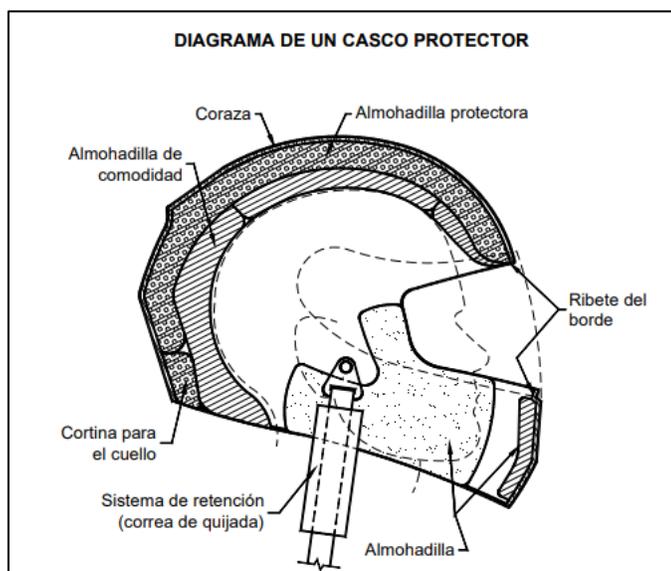
<b>Estructura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Propiedades</b>
<b>Carcasa</b>	La superficie exterior del casco, generalmente hecha de materiales compuestos de policarbonato o fibra de vidrio.	La carcasa debe tener una superficie lisa y soportar una fuerza mayor a 15 kN.
<b>Correas de Sujeción</b>	Un sistema de hebilla y anilla en D que asegura el casco a la cabeza del motociclista.	Deben resistir la abrasión, tener un ancho mínimo de 20 mm y soportar una carga mínima de 147 N.
<b>Visor</b>	Pantalla transparente de plástico que protege la cara y los ojos del motociclista del viento, polvo y escombros.	Debe tener un espesor de 0,8 mm, tener una buena transparencia y no astillarse ante un impacto
<b>Mecanismo de liberación</b>	Permite al personal médico retirar fácilmente el casco de un motociclista lesionado.	El color requerido es rojo y las dimensiones mínimas de 10 x 20 mm. El mecanismo de liberación no debe requerir una fuerza mayor a 60 N, y no debe desacoplarse cuando se apliquen fuerzas de tracción de hasta 2 kN de forma progresiva.

<b>Estructura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Propiedades</b>
<b>Protección Maxilar</b>	Acolchado que amortigua la mandíbula del motociclista en impactos.	No debe ser desmontable y ofrecer protección de las orejas
<b>Relleno Protector</b>	Forro interior de espuma EPS que amortigua y distribuye las fuerzas de impacto sobre la cabeza.	Espumas de poliuretano o polietileno, capacidad de absorción de energía.
<b>Relleno de Confort</b>	Almohadillas de espuma para proporcionar un ajuste cómodo para el motociclista.	Espumas suaves, transpirables y resistentes a la humedad.
<b>Protector de nuca</b>	Acolchado de espuma en la parte inferior trasera del casco para soportar el cuello y minimizar el latigazo cervical.	Espumas de poliuretano o polietileno, capacidad de absorción de energía.

Autor: [14], [15]

Las partes más importantes del casco de motocicleta se muestran en la Figura 1.1 para evidenciar de manera grafica cómo estos componentes están relacionados y cómo están posicionados en el casco.

**Figura 1.1.** Partes de casco de moto.



Autor: [14].

## **1.2. Accidentabilidad**

### ***1.2.1. Contexto Global.***

Según el último informe de la OMS, aunque la tasa de fallecimientos anuales por accidentes de tránsito ha disminuido ligeramente, sigue siendo significativa, con alrededor de 1,19 millones de muertes por año. Esto representa una muerte aproximadamente cada dos minutos, con más de 3.200 muertes diarias. Es crucial destacar que los accidentes de tránsito siguen siendo la principal causa de mortalidad en el grupo de personas con 5 a 29 años, lo que enfatiza la necesidad urgente de abordar este problema [16].

Es importante tener en cuenta que en un accidente de tránsito las personas involucradas sufren distintas lesiones en mayor o menor gravedad unas con otras. Pero es correcto afirmar que los usuarios de motocicletas tienden a sufrir lesiones más graves que los usuarios de otros vehículos, esto se debe a que estos se encuentran mucho más expuestos a golpes directos contra los objetos en la vía. Adicional a ello, se adjudica a las motocicletas como más propensas al exceso de velocidad, falta de distanciamiento entre vehículos, maniobras temerarias, rebases en lugares no permitidos o inclusive falta de indumentaria adecuada [17].

### ***1.2.2. Estadísticas de Accidentes de Motocicletas.***

En 2020, se registró una disminución del 32,3% en la cifra de accidentes de tránsito en la Comunidad Andina referente al año anterior. Esta reducción significativa se reflejó en la cifra de 328.418 accidentes en 2019, que descendió a 222.340 en 2020. Es importante destacar que esta disminución se debió principalmente a las restricciones de movilidad impuestas como respuesta a la pandemia de COVID-19 [18].

Ahora bien, las cifras totales de accidentes de tránsito del año 2020 en cada país de la comunidad andina son los expuestos en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3.** Accidentes de tránsito en la Comunidad Andina.

<b>País</b>	<b>Accidentes</b>	<b>Heridos</b>	<b>Muertos</b>
Comunidad Andina	222.340		
Bolivia	13.741		
Colombia	134.292	76.120	10.413
Ecuador	16.972		
Perú	57.335		

Autor: [18]

En Ecuador, la institución encargada de la seguridad vial es el ECU 911, que reportó, desde el inicio hasta octubre del año 2023, 32.687 percances viales en los que han estado involucrados motocicletas [19]. Si se suman las cifras del año 2022 se llega a un total de 50.662 siniestros viales con motocicletas [19].

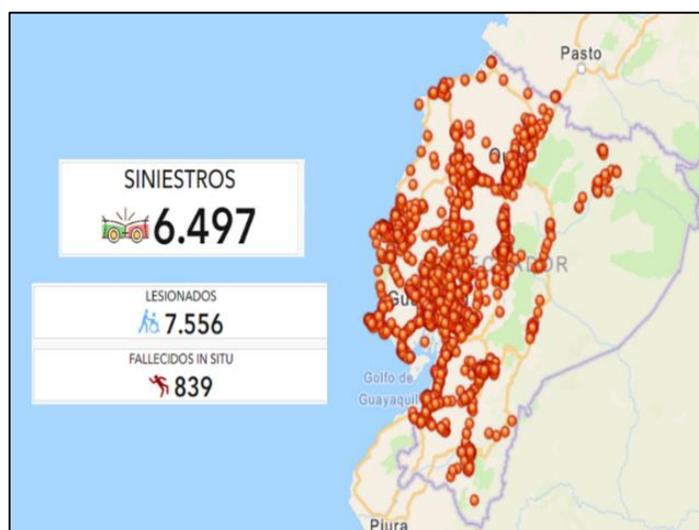
### ***1.2.3. Factores Contribuyentes a la Accidentabilidad de las Motocicletas.***

Los factores primordiales de los accidentes de motocicleta incluyen el exceso de velocidad, falta de distancia entre vehículos, maniobras imprudentes, adelantamientos no permitidos y la desobediencia a las normas de tráfico. Además, falta de atención, fatiga, conducción bajo la influencia de sustancias y la omisión de equipo de seguridad también contribuyen a estos incidentes [17].

### ***1.2.4. Consecuencias de los Accidentes de Motocicletas.***

Según el visor de Siniestrabilidad Nacional del año 2023, de los 6.497 siniestros relacionados con motocicletas, resultaron 7.556 lesionados y 839 fallecidos, siendo las provincias de Guayas y Pichincha las más relevantes con 2.511 y 938 siniestros respectivamente, según se muestra en la Figura 1.2 [20].

**Figura 1.2.** Siniestros de motocicletas año 2023.



Autor: [20]

### ***1.2.5. Principales Lesiones por Accidentes de Motocicleta.***

Es importante comprender los principales tipos de lesiones de las víctimas de accidentes en motocicletas porque este conocimiento puede influir en la correcta intervención de la víctima [21].

Dentro de las principales lesiones por accidentes de motocicletas están:

- Lesiones en la cabeza y el cerebro
- Lesiones abdominales
- Lesiones de columna y médula espinal
- Fracturas pélvicas
- Lesiones en piernas y tobillos
- Lesiones en el pecho y el corazón
- Lesiones en la cara y el cuello

### **1.3. Normativas y Reglamentos Técnicos**

La homologación de cascos de motocicleta es esencial para la seguridad de los motociclistas. Este estudio compara las normativas de homologación en Ecuador, América del Norte y Europa para elegir la más adecuada en diferentes criterios de seguridad.

#### **1.3.1. Reglamento Técnico Ecuatoriano.**

En Ecuador el organismo encargado de dictaminar las normas es el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), el cual propuso la norma NTE INEN 2669:2013 correspondiente a los “Cascos de protección para el uso de motocicletas” [15]. El principal objetivo es establecer los requisitos y métodos de ensayo que deben efectuar los cascos comercializados en Ecuador para proteger la cabeza de los motociclistas y pasajeros [15].

##### **1.3.1.1. Requisitos.**

La norma propone ciertos requisitos generales que deben cumplir los cascos de motocicletas para que puedan obtener la certificación de homologación, estos criterios son:

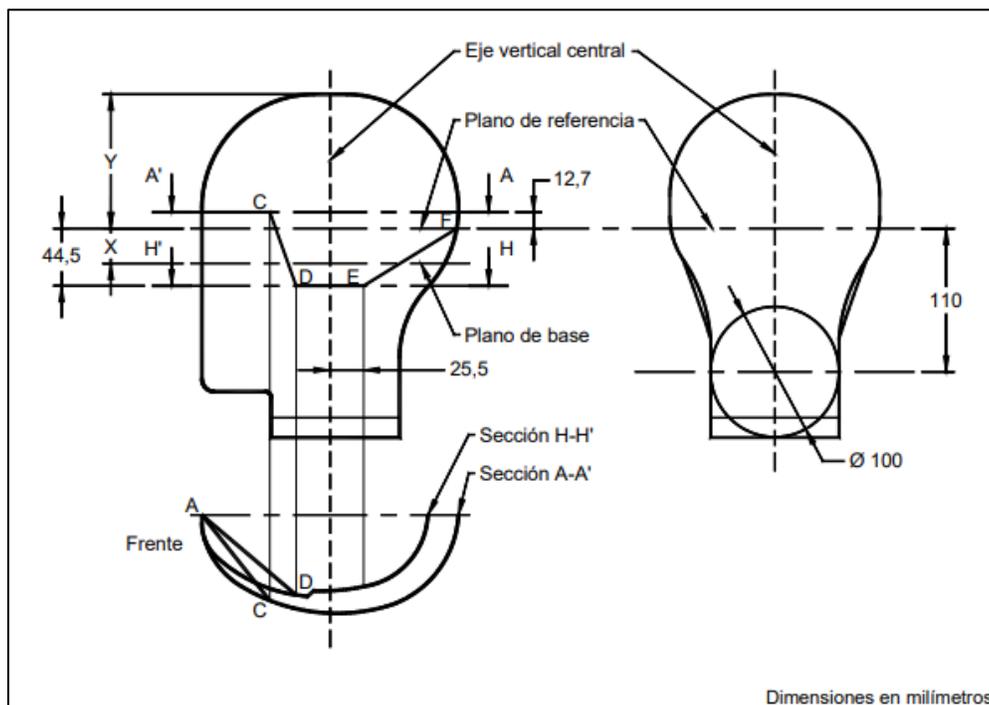
##### **1.3.1.2. Elementos Del Casco.**

El casco debe tener una armazón protectora y un sistema de retención. Debe tener un protector de nuca, uno para la mandíbula en cascos cerrados, y uno de visión en cascos mixtos y cerrados, protegiendo también las orejas. Si tiene visera, esta debe ser desmontable sin alterar las especificaciones originales del fabricante. Si no tiene visor incorporado, el borde interior no debe interferir con el uso de gafas [15].

##### **1.3.1.3. Protección.**

El casco debe cubrir adecuadamente todas las áreas de la cabeza, con relleno protector para absorber impactos y orificios de ventilación permitidos como se muestra en la Figura 1.3. Además, su diseño debe garantizar que ninguna parte se desprenda fácilmente durante un impacto, sin comprometer la protección de la cabeza [15].

**Figura 1.3.** Trazado de la extensión mínima de protección.



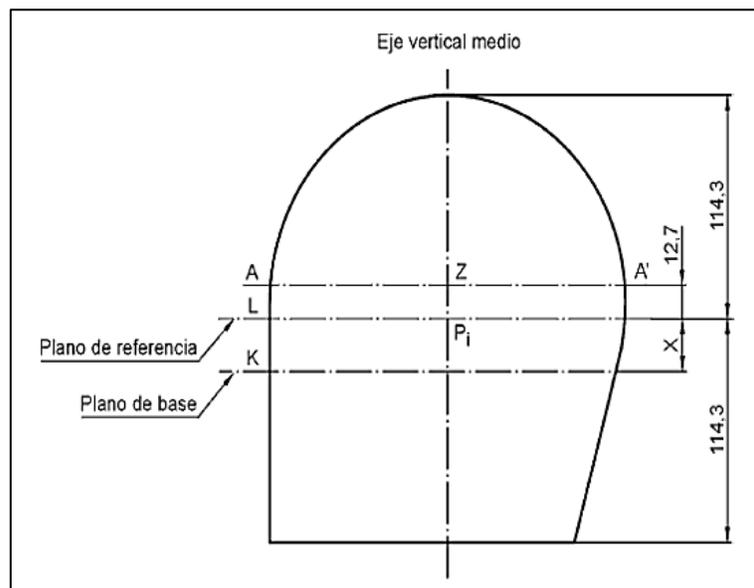
#### 1.3.1.4. Terminaciones.

La superficie exterior del casco debe ser lisa, pero se pueden permitir protuberancias que puedan desprenderse fácilmente en caso de impacto tangencial [15]. El interior del casco debe estar libre de bordes cortantes y elementos rígidos salientes deben estar cubiertos para proteger al usuario en caso de accidente. No se deben colocar adhesivos ni realizar marcas con pintura en el exterior del casco [15].

#### 1.3.1.5. Sistema De Retención.

El sistema de retención debe proteger sus elementos contra la abrasión y no deben ser desmontables. La correa de sujeción debe tener 20 mm de ancho como mínimo, y soportar una carga mínima de 147 N, debe tener también un mecanismo regulador de tensión [15]. El sistema de retención y su sistema de regulación deben posicionarse de forma que no descendan más de 150 mm por debajo de la línea de referencia mostrada en la Figura 1.4 de la horma de ensayo [7].

**Figura 1.4.** Horma para ensayo.



Fuente: [7]

El dispositivo de regulación debe permanecer cerrado incluso sin tensión y no debe abrirse accidentalmente. El dispositivo de cierre del sistema de retención debe garantizar que no haya acciones erróneas y no se permita una posición semicerrada.

#### **1.3.1.6. Materiales.**

Para producir los cascos de moto, se necesitan materiales que aseguren su habilidad para proteger ante temperaturas extremas, el sol y la lluvia. El visor debe tener un grosor mínimo de 8 mm, ser claro y resistente a rayones, además de no astillarse fácilmente en caso de golpes. Los componentes del casco deben resistir impactos eficientemente y ofrecer una construcción liviana para su comodidad de uso [15].

#### **1.3.1.7. Visión Periférica.**

Es importante confirmar la visión lateral en cada evaluación del casco que se aplique a un tipo específico [15].

### **1.3.1.8. Visor.**

El visor del casco debe poder desplazarse fácilmente con un simple movimiento manual, salvo en los cascos que no cubran el mentón. Debe incluir un mecanismo de bloqueo para evitar desplazamientos involuntarios hacia arriba o hacia abajo. Cuando esté completamente abierto, su amplitud debe garantizar una visión mínima de 5 grados. No debe restringir el campo visual ni afectar la visión hacia abajo cuando esté cerrado. Además, ha de ser transparente y no distorsionar la visión ni los colores de las señales de tráfico [15].

### **1.3.1.9. Requisitos Específicos.**

#### ***Absorción de Impacto.***

En caso de un choque vertical de baja intensidad, la fuerza máxima transferida no debe exceder los 7,5 kN, mientras que, en un impacto de alta intensidad, no debe superar los 15 kN. Por otro lado, en un choque lateral, la fuerza máxima transferida no debe sobrepasar los 10 kN [15].

En caso de un choque vertical de baja intensidad, la fuerza máxima transferida no debe exceder los 7,5 kN, mientras que, en un impacto de alta intensidad, no debe superar los 15 kN. Por otro lado, en un choque lateral, la fuerza máxima transferida no debe sobrepasar los 10 kN [15].

#### ***Resistencia del Sistema de Retención.***

En el ensayo que mide la solidez del mecanismo de sujeción, el desplazamiento de la placa de impacto no debe exceder los 35 mm, se aceptan desperfectos en el sistema, con tal de que la sujeción pueda liberarse como de costumbre [15].

#### ***Resistencia a la Deformación Longitudinal y Transversal.***

El casco probado no debe mostrar ningún tipo de fracturas, rajaduras o hendiduras, ni sufrir deformaciones significativas en su forma [15].

### ***Velocidad de Inflamabilidad.***

La velocidad con la que el material del revestimiento del casco puede prenderse fuego, no debe exceder los 75 mm/min [15].

### ***Resistencia al Descalce.***

Tras la prueba de resistencia al deslizamiento, el ángulo entre la línea de referencia y el plano de referencia no puede exceder los 30 grados [15] .

### ***Resistencia a la Penetración del Visor.***

No está permitido que el visor presente bordes desiguales ni generar astillas si se rompe. Se define como astilla cualquier segmento irregular con un ángulo menor a 60 grados [15].

## **1.3.2. Reglamento Europeo**

En España el organismo encargado de la homologación de los Cascos para Motocicletas es la Reglamentación de las Naciones Unidas (UNECE), con el Reglamento Número 22, Adendum 21 [22].

Adicionalmente esta regulación forma parte de las bases de estudio de la norma técnica ecuatoriana, por ello son muy similares.

### **1.3.2.1. Requisitos Mínimos.**

#### ***Prueba de Absorción de Impacto.***

La velocidad máxima a la que puede acelerarse el centro de gravedad de la cabeza es de 275 veces la aceleración de la gravedad, y el índice de lesiones en la cabeza (HIC) no debe exceder los 2.400 [22].

#### ***Prueba de Rigidez.***

La deformación transversal y longitudinal durante el ensayo de rigidez no debe ser mayor a 40 y a 15 mm respectivamente [22].

### ***Prueba Dinámica del Sistema de Retención.***

En el proceso de ensayo no se debe superar los 35 mm de diferencia desde su posición inicial y posteriormente al ensayo no se debe superar los 25 mm [22].

### ***Prueba de Retención.***

El dispositivo colocado debe garantizar que la velocidad no caiga por debajo del 95 % [22].

### ***Prueba de Macroajuste para la Sujeción de la Barbilla.***

Tras el ensayo, la agarradera no debe recorrer más de 10 mm en total [22].

### ***Prueba de Resistencia a la Abrasión de la Barbilla.***

La abrazadera debe oscilar a 5.000 ciclos con una frecuencia de 2 Hz, luego la correa desgastada se somete a tracción de forma que no tenga rupturas y su longitud no tenga una variación mayor a 1,5 mm. El elemento debe ser capaz de soportar 3kN de tensión sin llegar a romperse [22].

### ***Prueba de Dispositivos de Sujeción que Emplean Mecanismos para Liberarse Rápidamente.***

El sistema de retención se somete a una fuerza de unos 100 N con una esfera de diámetro 100 mm, el dispositivo no debe liberarse en ningún momento [23].

Además, el casco se somete a distintas cargas durante algunos períodos de tiempo y debe liberarse [23].

### ***Prueba de Visor.***

El visor debe satisfacer una serie de requisitos que incluyen: la cantidad de luz que permite pasar, la dispersión de la luz, la capacidad de detectar señales luminosas, la cantidad de luz que pasa en distintas longitudes de onda, la capacidad de refracción, si se empaña o no (esto puede ser opcional), aspectos mecánicos, la calidad de la óptica y su resistencia a ser rayado [22].

### **1.3.3. Reglamento Norteamericano**

El organismo norteamericano encargado de la regulación de los cascos de motocicleta es el Estándar Federal de Seguridad de Vehículos Motorizados o sus siglas en inglés FMVSS con la norma No. 218 con lo que se refiere a los Cascos de motos. Esta norma establece los requerimientos mínimos de rendimiento para cascos usados por motociclistas [24].

#### **1.3.3.1. Requisitos.**

##### ***Atenuación de Impacto.***

El límite máximo de aceleración es 400 g, las aceleraciones superiores a 200 g no durarán más de 2,0 milisegundos y las aceleraciones superiores a 150 g no durarán más de 4,0 milisegundos [24].

##### ***Penetración.***

Al momento de realizar la prueba de penetración, el percutor no deberá tocar la superficie del simulador de cabeza como se muestra en la Figura 1.5.

**Figura 1.5.** Ensayo de penetración.



Autor: [23]

### *Sistema De Retención.*

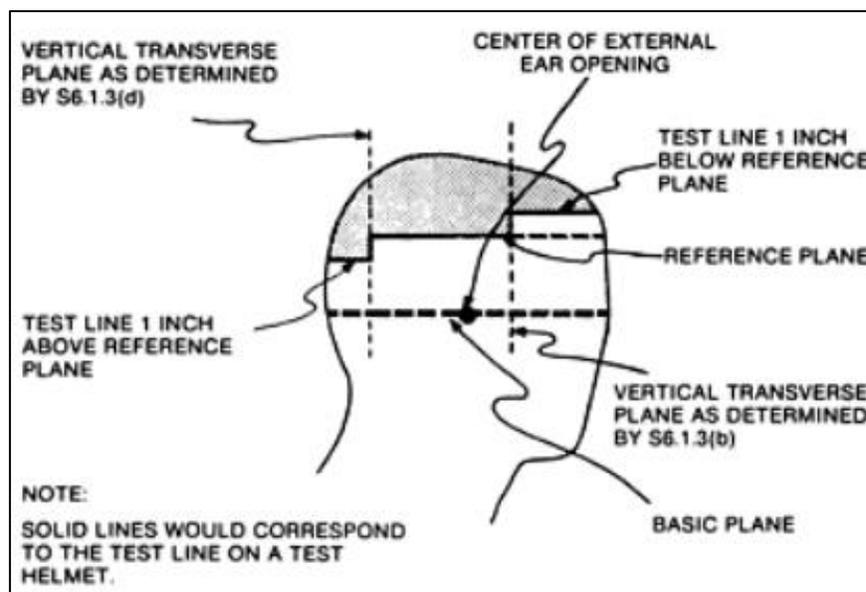
El sistema de sujeción o sus componentes deben resistir las cargas especificadas sin separarse; además, la parte ajustable del aparato de ensayo del sistema de sujeción no debe moverse más de una pulgada (2,5 cm) entre las cargas preliminares y de prueba, si el sistema de sujeción está formado por partes que pueden fijarse individualmente sin asegurar el conjunto completo, cada una de esas partes debe cumplir con estos requisitos por sí sola [31].

El sistema de sujeción o sus componentes deben resistir las cargas especificadas sin separarse; además, la parte ajustable del aparato de ensayo del sistema de sujeción no debe moverse más de una pulgada (2,5 cm) entre las cargas preliminares y de prueba, si el sistema de sujeción está formado por partes que pueden fijarse individualmente sin asegurar el conjunto completo, cada una de esas partes debe cumplir con estos requisitos por sí sola [31].

### *Disposición.*

Cada casco debe contar con una cobertura protectora continua en todos los puntos sobre la línea de referencia descrita en la Figura 1.6.

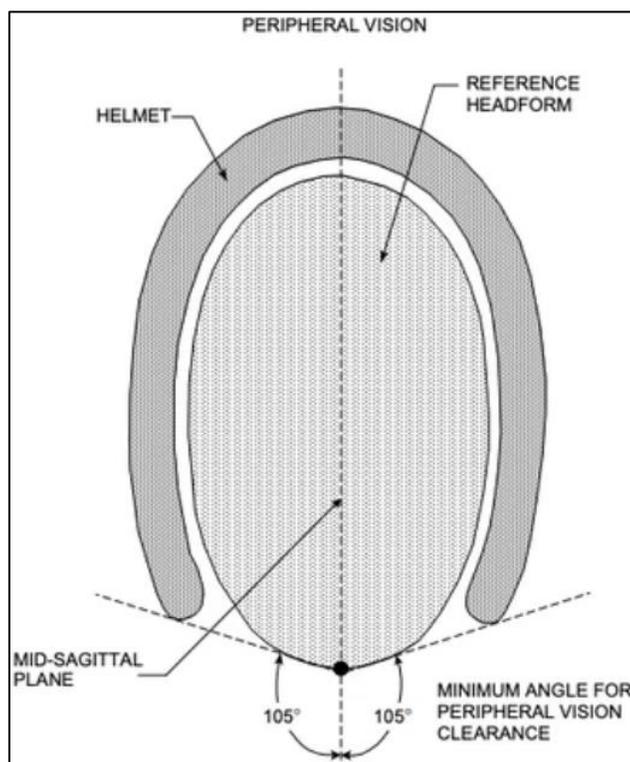
**Figura 1.6.** Simulador cabeza - Plano lateral.



Autor: [24]

Además, al ajustar el casco, es necesario asegurar que proporcione un campo de visión lateral de al menos  $105^\circ$  a ambos lados del eje central. El punto de referencia para estas mediciones estará en la superficie frontal del simulador de cabeza estándar, en el cruce de los ejes central y horizontal, como se ilustra en la Figura 1.7, la abertura para la frente del casco debe estar al menos a 1 pulgada (2,5 cm) sobre cualquier punto en el eje horizontal dentro del campo de visión lateral.

**Figura 1.7.** Simulador de cabeza - plano sagital medio.



Autor: [24]

### ***Proyecciones.***

Un casco no puede contener elementos rígidos dentro de su estructura. Cualquier proyección rígida fuera de la estructura del casco estará restringida únicamente a aquellas necesarias para el funcionamiento de agregados esenciales y no sobresaldrán más de 0,20 pulgadas [24].

### ***Etiquetado.***

Es necesario que cada casco cuente con una etiqueta permanente y clara, asegurando que pueda leerse sin necesidad de retirar el acolchado u otras partes permanentes. Esta etiqueta debe incluir el nombre del fabricante, el tamaño de forma discreta, el mes y año de fabricación, así como las instrucciones para el comprador [24].

Cada casco debe llevar una etiqueta permanente y fácilmente legible que certifique que cumple con las normas federales de seguridad de vehículos motorizados. Esta etiqueta debe contener lo siguiente:

- El símbolo "DOT", centrado horizontalmente, con letras de al menos 0,38 pulgadas (1,0 cm) de altura.
- El término "FMVSS No. 218", centrado horizontalmente debajo del símbolo DOT, con letras de al menos 0,09 pulgadas (0,23 cm) de altura.
- La palabra "CERTIFICADO", centrada horizontalmente debajo de "FMVSS No. 218", con letras de al menos 0,09 pulgadas (0,23 cm) de altura.
- La designación exacta del modelo, centrada horizontalmente sobre el símbolo DOT, con letras y/o números de al menos 0,09 pulgadas (0,23 cm) de altura.
- El nombre y/o marca del fabricante, centrado horizontalmente sobre la designación del modelo, con letras y/o números de al menos 0,09 pulgadas (0,23 cm) de altura.

Todos los elementos (símbolos, letras y números) deben ser de un color que contraste con el fondo de la etiqueta [24].

La etiqueta se ubicará en la superficie externa del casco, de forma que esté centrada lateralmente con respecto a la línea central horizontal del símbolo DOT. Esta etiqueta estará colocada a una distancia mínima de 1 pulgada (2,5 cm) y máxima de 3 pulgadas (7,6 cm) desde el borde inferior de la parte posterior del casco [24].

### ***Índice De Posicionamiento Del Casco.***

Cada empresa fabricante de cascos establecerá un índice de ajuste para cada uno de sus cascos. Dicha información estará accesible para cualquier individuo que la solicite, en relación con un casco en particular identificado por el fabricante, el nombre del modelo y su respectivo tamaño [24].

#### ***1.3.4. Análisis de Requerimientos Técnicos***

Para realizar la comparación entre las tres normativas de homologación se tomó en cuenta a los ensayos de alta prioridad y aspectos claves de cada uno en la Tabla 1.4.

**Tabla 1.4.** Comparación Normativas para homologaciones.

<b>Prueba</b>	<b>INEN</b>	<b>ECE</b>	<b>DOT</b>
Absorción de impacto	Impacto vertical y lateral Impactador de 5 kg Velocidades de impacto de 5,42 m/s y 7 m/s	5 puntos de impacto Velocidades de impacto de 5,5 m/s y 7,5 m/s Normativa de medición ISO	Caída libre conjunto cabeza y casco. Velocidad de impacto entre 5,8 m/s y 6,2 m/s
Rigidez	Carga máxima de 630 N Deformación máxima de 15 mm	Carga máxima de 630 N Deformación máxima de 15 mm	No tiene ensayo

## **1.4. Método de Elementos Finitos**

### ***1.4.1. Principios de Formulación del FEM***

La idea básica del Método de Elementos Finitos (FEM) es dividir un mecanismo en elementos más pequeños, conectados entre sí mediante puntos llamados nodos [25].

Este enfoque ofrece una solución a la necesidad de crear prototipos, probarlos y realizar mejoras de manera iterativa, lo cual tradicionalmente implicaba un alto costo tanto en términos económicos como de tiempo. El método del FEM permite desarrollar un modelo matemático para calcular el sistema real de manera más rápida y económica, además de poder realizar

modificaciones en el prototipo. Es cierto, es un cálculo aproximado y no sustituye una prueba física final definitiva y la validación de un diseño posibilita el uso de menos prototipos, ya que la simulación se acerca al diseño óptimo [26].

El sistema físico se descompone en elementos conectados entre sí a través de puntos nodales discretos, en un proceso conocido como "discretización". Se desarrolla una expresión matricial para relacionar las variables nodales de cada elemento, a esta matriz se le llama comúnmente "matriz elemental". En situaciones de problemas discretos, la matriz elemental puede ser creada a través de un análisis físico detallado del sistema [27].

#### **1.4.2. Tipos de Elementos Finitos**

El método empleo variedad de elementos para representar las geometrías complejas y comportamientos físicos, se clasifican según sus dimensiones y la naturaleza del problema que se analiza de la siguiente forma [28].

El método empleo variedad de elementos para representar las geometrías complejas y comportamientos físicos, se clasifican según sus dimensiones y la naturaleza del problema que se analiza en la Tabla 1.5, [28].

**Tabla 1.5.** Tipos de elementos finitos.

<b>Tipos de elementos</b>	<b>Descripción</b>
Lineales	Son elementos como resortes, barras y vigas para representar sistemas mecánicos o estructuras alargadas en estructuras.
Planos	Membranas y placas se emplean para modelar estructuras planas que experimentan deformaciones en su plano.
Solidos	Se representan objetos tridimensionales que experimentan deformaciones en todas las direcciones como bloques, componentes mecánicos o estructuras complejas.

Hay que considerar que, dependiendo de la complejidad del problema y las características del material, se puede usar una combinación de estos elementos para modelar adecuadamente el comportamiento del sistema. Además, cada tipo de elemento finito tiene sus propias características y limitaciones, [25].

### 1.4.3. Herramientas de Software para FEM

Los métodos de evaluación computacional han ganado relevancia en el análisis de impactos y comportamiento estructural, como en cascos de motocicleta. En la Tabla 1.6, se comparan los softwares de simulación como SolidWorks, LsDyna, ANSYS y Kratos, analizando sus costos (\$), fundamentos, capacidades, ventajas y limitaciones para identificar el más adecuado en la evaluación de la resistencia de cascos.

**Tabla 1.6.** Comparación Cualitativa Software.

	<b>LS-DYNA</b>	<b>ANSYS</b>	<b>SOLIDWORKS</b>	<b>KRATOS</b>
<b>Precio</b>	\$\$\$	\$\$\$	\$\$	\$
<b>Complejidad de Interfaz</b>	Interfaz de usuario compleja para principiantes	Interfaz de usuario compleja, buenas capacidades de personalización	Interfaz de usuario intuitiva, fácil de usar y familiar	Interfaz de línea de comandos, conexión con GiD para interfaz gráfica
<b>Compatibilidad</b>	Compatible con varios formatos de archivos CAD y puede integrarse con otros programas de pre y postprocesamiento	Amplia compatibilidad con formatos de archivos CAD y puede integrarse con otros programas	Buena compatibilidad con formatos de archivos CAD populares	Compatible con varios formatos de archivos, pero puede requerir conversiones

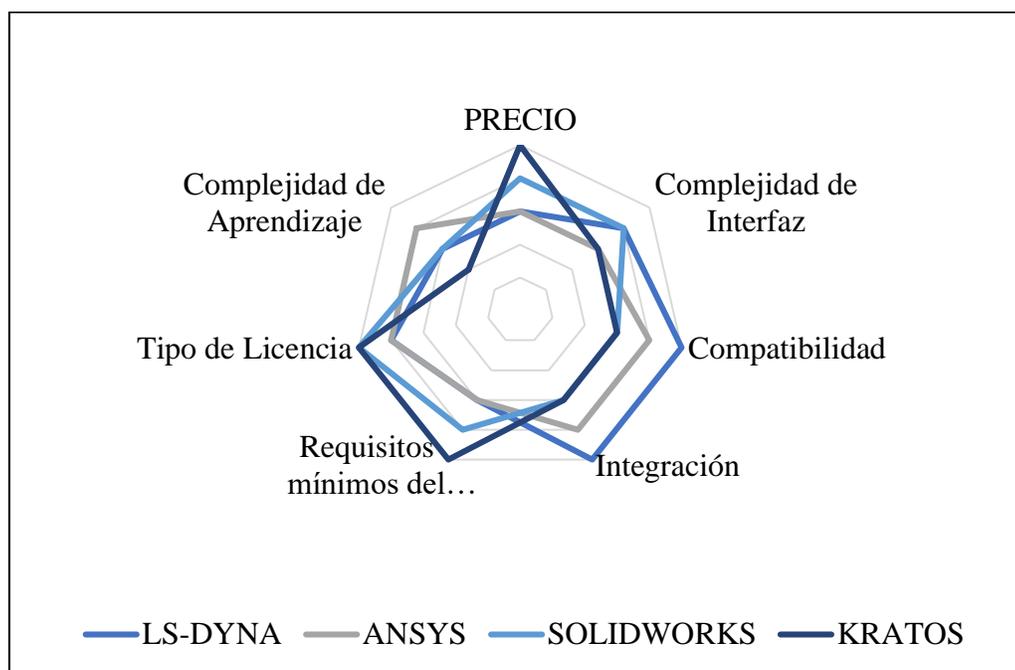
	<b>LS-DYNA</b>	<b>ANSYS</b>	<b>SOLIDWORKS</b>	<b>KRATOS</b>
<b>Integración</b>	Se integra bien con otros programas de diseño y simulación, como ANSYS y LSTC	Excelente integración con otros programas de CAD/CAE/CAM, como SOLIDWORKS y LS-DYNA	Buena integración con otros programas de Dassault Systèmes y complementos de terceros	Buena integración con otros programas de código abierto, como GiD pre/post-procesador
<b>Requisitos mínimos del Sistema</b>	Windows 7, 8, 10/64 bits, Linux	Windows 7, 8, 10/64 bits, Linux	Windows 7, 8, 10/64 bits, Linux	Windows 7, 8, 10/64 bits, Linux
	Procesador Intel i7	Procesador Intel i7	Procesador Intel i7	Procesador Intel i7
	16 GB de RAM25GB	16 GB de RAM25GB	16 GB de RAM25GB	16 GB de RAM25GB
	Disco Solido	Disco Solido	Disco Solido	Disco Solido
	Tarjeta Gráfica Integrada	Tarjeta Gráfica Integrada	Tarjeta Gráfica Integrada	Tarjeta Gráfica Integrada
<b>Tipo de Licencia</b>	Licencias comerciales y académicas disponibles	Licencias comerciales, académicas y de investigación disponibles	Licencias comerciales, educativas y de suscripción disponibles	Licencia de código abierto (BSD-4)
<b>Complejidad de Aprendizaje</b>	3	4	3	2

Nota. En la tabla anterior, un mayor número de símbolos de “\$” establece un mayor costo de adquisición del Software. Por otra parte, la información para la tabla sobre ANSYS y LS-DYNA

se obtuvo de [25], [29], [30] para el caso de SolidWorks se obtuvo de [29]; finalmente para el software KRATOS se obtuvo de [31].

Para hacer una comparación cuantitativa se otorgaron valores numéricos del 1 al 5 a cada descripción de la Tabla 1.6. Para ello se creó la Figura 1.8, que permite una visualización de la comparativa.

**Figura 1.8.** Criterios de selección de software.



#### 1.4.4. Tensión de Von Misses

El criterio de Von Misses es equivalente a decir que la fluencia ocurrirá a un valor crítico de la energía elástica en el material. Tanto el criterio de Tresca como el de Von Misses proporcionan predicciones de ingeniería útiles sobre el rendimiento, y los analistas tienden a utilizar el criterio que es más conveniente o consistente con el contexto mecánico general [32].

#### ***1.4.5. Efecto Hourglass***

El efecto Hourglass se define como modos de deformación de no física, que producen una deformación nula y de la misma manera su energía también es nula y además no poseen ninguna tensión [33].

#### ***1.4.6. Deformación Efectiva***

Es un concepto en mecánica de materiales utilizados para describir el estado de deformación en un material sometido a esfuerzos tridimensionales complejos. Al definir la curva de tensión efectiva versus deformación plástica efectiva, el primer valor de deformación plástica sería cero y el primer valor de tensión sería el límite elástico inicial. La falla del material se establece utilizando un criterio de falla por deformación [34].

## CAPÍTULO II

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1. Materiales y Métodos

El propósito de esta investigación es determinar un protocolo contingente de homologación de los cascos de motocicletas de gama baja que se comercializan en el territorio nacional. Para ello se realizaron metodologías de ensayos mecánicos basados en normativa ecuatoriana, americana y europea con el fin de obtener resultados empíricos que nos ayuden a validar los resultados del método FEM.

#### 2.2. Materiales

##### 2.2.1. Casco de Motocicleta

El casco de motocicleta de la Figura 2.1 se obtuvo en el mercado local y presenta certificación DOT bajo el logo en el área posterior del mismo. En la etiqueta del casco se especifican características técnicas esenciales para su adecuada evaluación.

**Figura 2.1.** Casco de motocicleta.

<b>Material de carcasa</b>	<b>Fibra de vidrio</b>	
Material de relleno	Esterofan Espuma expandida de poliestireno (EPS)	
Dimensiones	Ancho: 12cm Largo: 20cm Alto:22cm	
País de origen	China	
Tipo de casco	Cerrado	
Rango de Precio	\$ 20- \$ 30	

### 2.2.2. *Horma*

La Figura 2.2 muestra la horma utilizada en este estudio, representada por una cabeza de maniquí, desempeña un papel crucial en las pruebas de absorción de impacto realizadas en los cascos de motocicleta. Permite fijar el casco además de identificar si existe alguna deformación o rotura de alguna forma, la misma está hecha de un material de poliuretano rígido y hueco por dentro.

**Figura 2.2.** Horma para ensayo



### 2.2.3. *Equipo de Absorción de Impacto*

El equipo de absorción de impacto de la Figura 2.3 es fundamental para llevar a cabo las pruebas de resistencia en los cascos de motocicleta. Este equipo permite simular condiciones de impacto controladas y medir la capacidad del casco para absorber y distribuir la energía generada durante una colisión. Consta de una celda de carga, encargada de enviar datos, conectada con Arduino hacia un computador donde se obtienen y procesan los datos.

**Figura 2.3.** Equipo Absorción de Impacto



#### **2.2.4. Prensa Hidráulica**

El equipo de la Figura 2.4 se usa para tareas como doblar, enderezar, prensar o ensamblar piezas en aplicaciones automotrices, de fabricación y de reparación, con capacidad de 20 toneladas.

**Figura 2.4.** Prensa Hidráulica



### 2.2.5. Arduino Uno

En la Figura 2.5 observamos una placa de microcontrolador basada en el ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salidas digitales (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector ICSP y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para dar soporte al microcontrolador [35].

**Figura 2.5.** Arduino UNO



Nombre	Arduino UNO R3
Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de E/S	5V
Procesador principal	ATmega328P 16MHz
Dimensiones	Ancho: 53,4 mm Longitud: 68,6 mm
Peso	25 g

### 2.2.6. Celda de Carga 6001

El modelo de celda de carga de la Figura 2.6 es un modelo de tensión-compresión con un revestimiento resistente a la humedad y cables blindados, que permiten su uso en ambientes hostiles manteniendo las especificaciones de operación. Los cables de detección adicionales compensan los cambios en la resistencia de los cables debido al cambio de temperatura y/o la extensión del cable [36].

**Figura 2.6.** Celda de carga 6001

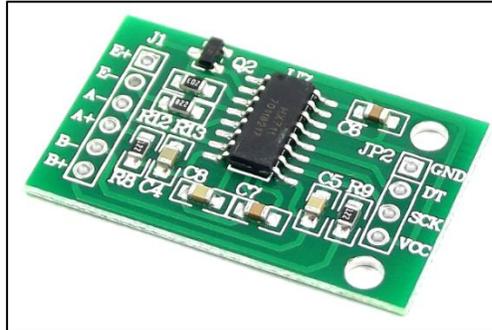


<b>Capacidad</b>	<b>3000lbs</b>
Tipo	S
Desviación	±10%
Material	Acero Inoxidable
Frecuencia de muestreo	5.000 Hz

### 2.2.7. Modulo HX711

En la Figura 2.7 se muestra el módulo HX711 es un convertidor analógico a digital (ADC) de precisión de 24 bits diseñado para básculas y aplicaciones de control industrial permitiendo la lectura del puente Wheatstone formado por la celda de carga y también un conversor ADC de 24 bits. Se comunica con el microcontrolador por medio de una interfaz serial de 2 pines (Clock y Data) similar al I2C [37].

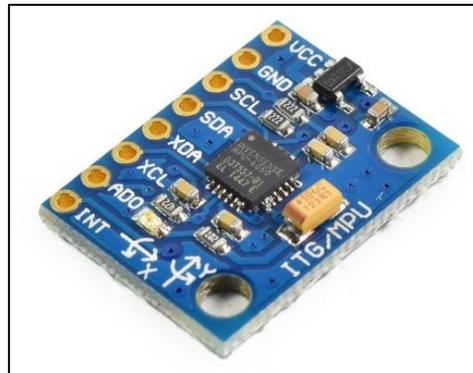
**Figura 2.7.** Modulo HX711



### 2.2.8. Acelerómetro MPU6050

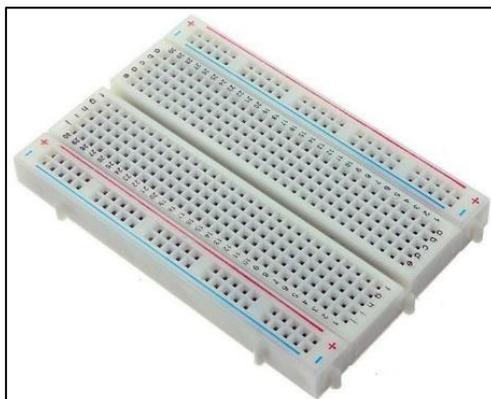
En la Figura 2.8 se ilustra el acelerómetro MPU6050 es una unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Units) de 6 grados de libertad (DoF) pues combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes.

**Figura 2.8.** Modulo MPU6050



### 2.2.9. Protoboard

En la Figura 2.9 se muestra una tableta para experimentación, la cual contiene orificios para insertar terminales o las pastillas de los componentes electrónicos, nos sirve para implementar los circuitos electrónicos de los prototipos a ensamblar y realizar cualquier modificación a nivel experimental [38].

**Figura 2.9.** Protoboard.

### 2.2.10. Computador

Maquina electrónica que, mediante determinados programas, permite almacenar y tratar información y resolver problemas de diversa índole. En la Tabla 2.1 se detallan sus propiedades.

**Tabla 2.1.** Características del computador

<b>Procesador</b>	10 <sup>th</sup> Gen Intel ® Core ™ i7-1065G7 CPU @ 1,30 GHz 1,50 GHz
<b>RAM instalada</b>	8,00 GB
<b>Tipo de sistema</b>	64 bits
<b>Sistema Operativo</b>	Windows 11 Home Single Language
<b>Número de núcleos</b>	4
<b>Tarjeta gráfica</b>	Inetl® Iris®Plus graphics

### 2.2.11. Scanner 3D

Se utilizó un escáner modelo Einstar de Shining el cual posee las características detalladas en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Características Técnicas Scanner Einstar 3D.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DETALLE</b>
Modo de escaneo	Escaneo de luz estructurada
Distancia del punto	0,1mm ~ 3mm
Distancia de trabajo	Distancia de trabajo efectiva: 160 mm-1.400 mm; Distancia de trabajo óptima: 400 mm
Campo de visión máximo	434 mm*379 mm (bajo la distancia de trabajo óptima)
Velocidad de escaneo	980.000 puntos/s, hasta 14 FPS
Modos de alineación	Alineación de características, alineación híbrida, alineación de texturas, marcadores globales
Escaneo de textura	Sí
Escaneo al aire libre	Sí
Interfaz	USB2.0 o superior
Formatos de salida	OBJ; STL; CAPA; P3; 3MF
Configuración básica de la computadora	SO: Win10, 64 bits; Tarjeta gráfica: NVIDIA GTX1050; Memoria de vídeo: $\geq$ 4GB; Procesador: I7-7700H; Memoria: $\geq$ 16GB

Fuente: [39]

### **2.2.12. Software CAD**

Un software CAD (Diseño Asistido por Computadora) es una herramienta esencial utilizada por ingenieros, arquitectos y diseñadores para crear, modificar, analizar y optimizar diseños en 2D y 3D. Este software ofrece funcionalidades robustas que incluyen la creación precisa de geometrías, la generación de modelos tridimensionales y la documentación detallada de proyectos técnicos.

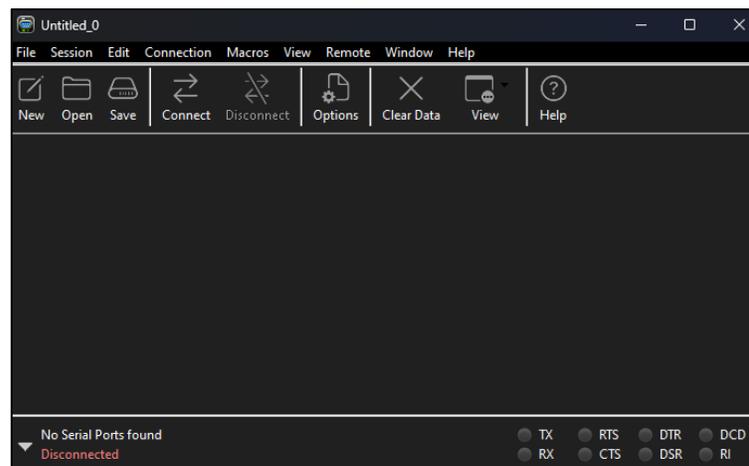
### 2.2.13. Software CAE

Un software CAE (Ingeniería Asistida por Computadora) es una herramienta crucial para ingenieros y diseñadores que permite la simulación, análisis y optimización de productos y procesos. Este tipo de software incluye una variedad de funcionalidades avanzadas, como el análisis de elementos finitos (FEA), la dinámica de fluidos computacional (CFD) y el análisis de dinámica multicuerpo (MBD). Con CAE, los usuarios pueden prever el comportamiento de sus diseños bajo diferentes condiciones físicas, identificar posibles fallos y mejorar la eficiencia del producto antes de su fabricación.

### 2.2.14. Software para Obtención de Datos

La interfaz que se indica en la Figura 2.10 es CoolTerm es una aplicación de terminal de puerto serie y un programa de redes gratuito, desarrollado por Roger Meier para Windows. Es una herramienta dirigida a aficionados y profesionales que necesitan intercambiar datos con hardware conectado a puertos serie, como servocontroladores, kits robóticos, receptores GPS, microcontroladores, etc,[40].

**Figura 2.10.** Interfaz Software obtención de datos



### 2.2.15. Software de Procesamiento de Datos Excel

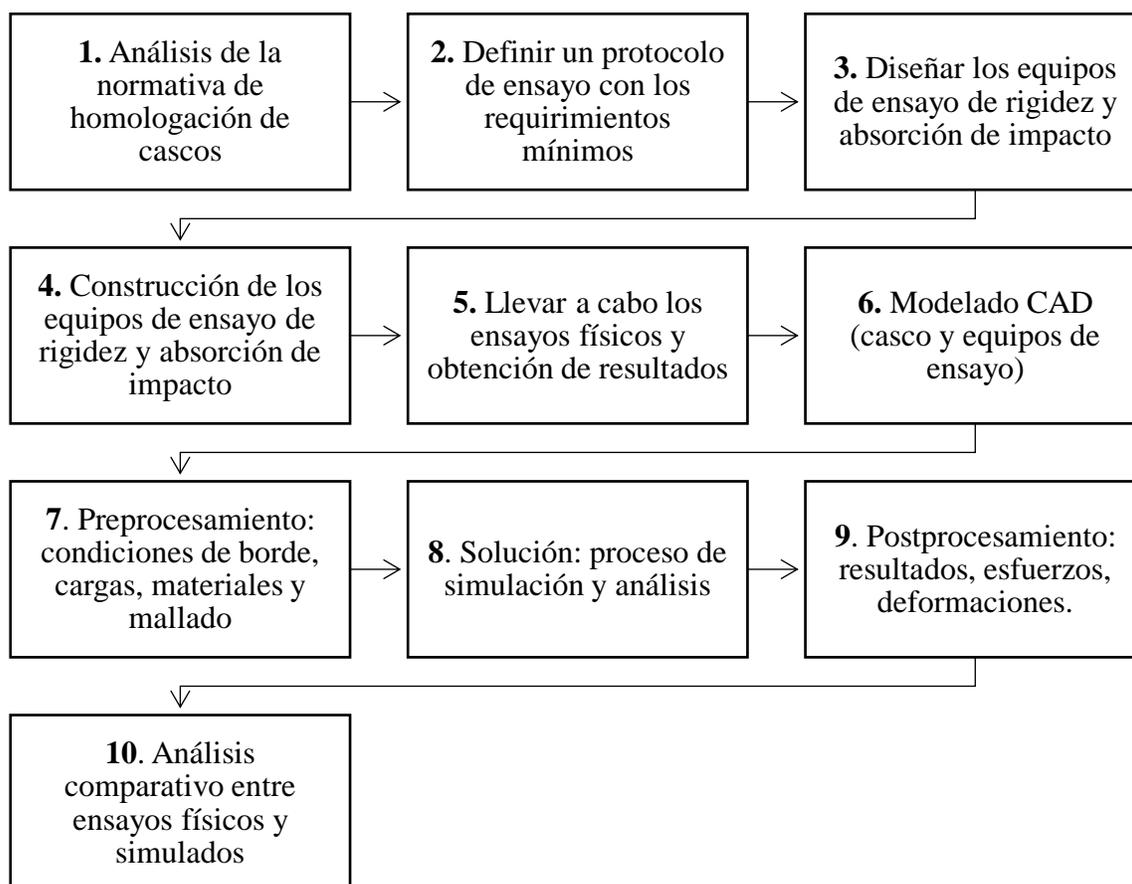
Se utilizo Excel con la licencia EWW\_c463be9d-b322-4cee-98fe-29a5b27f2975\_4fc67544e2618ff201 como software de procesamiento de datos, es una

herramienta esencial para la organización, análisis y visualización de grandes cantidades de datos. Este tipo de software ofrece funcionalidades avanzadas para la manipulación de datos, incluyendo la entrada y edición de datos, el uso de fórmulas y funciones para cálculos complejos, y la creación de gráficos y tablas dinámicas para representar visualmente la información.

### 2.3. Proceso Metodológico

La metodología de los ensayos propuestos se determinó tras extraer los criterios más relevantes de las normativas nacionales e internacionales, estas fueron: norma ecuatoriana NTE INEN 2669:2013, Reglamento Número 22- Adendum 21 establecida por la UNECE y la norma norteamericana No. 218 establecida por el FMVSS. En la Figura 2.11 se detalla el proceso metodológico.

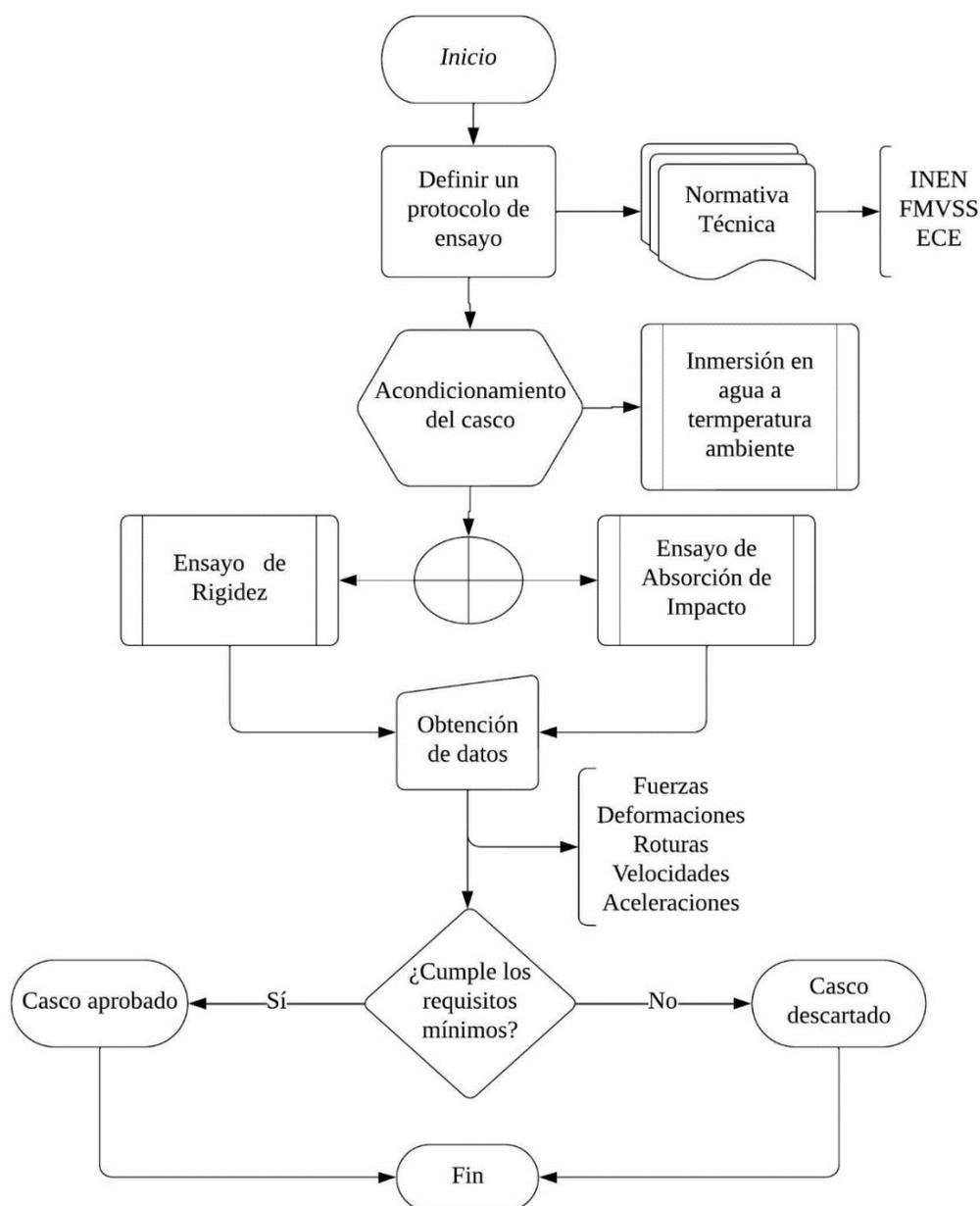
**Figura 2.11.** Diagrama de flujo proceso metodológico.



## 2.4. Protocolo para Ensayos

Basándonos en las normativas previamente analizadas, hemos decidido implementar un protocolo de ensayos mixto. Este protocolo incorpora características de las normativas mencionadas y establece parámetros mínimos a seguir. Este proceso se detalla a continuación en el apartado 2.3 y a manera resumen en la Figura 2.12.

**Figura 2.12.** Diagrama de flujo para Ensayos Físicos.



### 2.4.2. Acondicionamiento de Cascos

Previo al acondicionamiento de los cascos se rotula los puntos de impacto para los casos que lo requiera. La normativa nacional e internacional define un proceso de acondicionamiento de muestras previo a la realización de los ensayos destructivos que puede ser de tipo térmico, químico o físico químico.

En esta investigación en particular, se ha seleccionado el método de acondicionamiento por inmersión en agua, manteniendo las muestras sumergidas durante un período de 4 a 24 horas a una temperatura controlada de 16°C a 26°C. Esta metodología se fundamenta en la realidad climática nacional [41]; debido a que no experimentamos temperaturas extremas. No obstante, la presencia de lluvia incrementa significativamente los riesgos para los motociclistas hasta en un 5%, [42], por lo que es crucial asegurar la protección en estas circunstancias. Además, este enfoque facilita la reproducibilidad y repetibilidad de los resultados, tanto en simulaciones como en pruebas experimentales, de manera más efectiva.

**Tabla 2.3.** Acondicionamiento de muestras.

Ensayo	Inmersión en Agua		Número de cascos
	Casco A	Casco B	
Absorción de impacto vertical		X	1
Absorción de impacto lateral	X		1
Rigidez longitudinal		X	1
Rigidez transversal	X		1
<b>Total</b>			<b>4</b>

Al elegir 4 cascos, se asegura una muestra representativa que permite evaluar la consistencia y calidad entre diferentes unidades del mismo producto. Limitar la muestra ayuda a mantener la eficiencia del proceso de ensayo, reduciendo el tiempo y los recursos necesarios sin comprometer la validez de los resultados, en la Tabla 2.3 se muestra el tipo de ensayo al que se sometió cada casco. En el Anexo II se evidencia lo descrito.

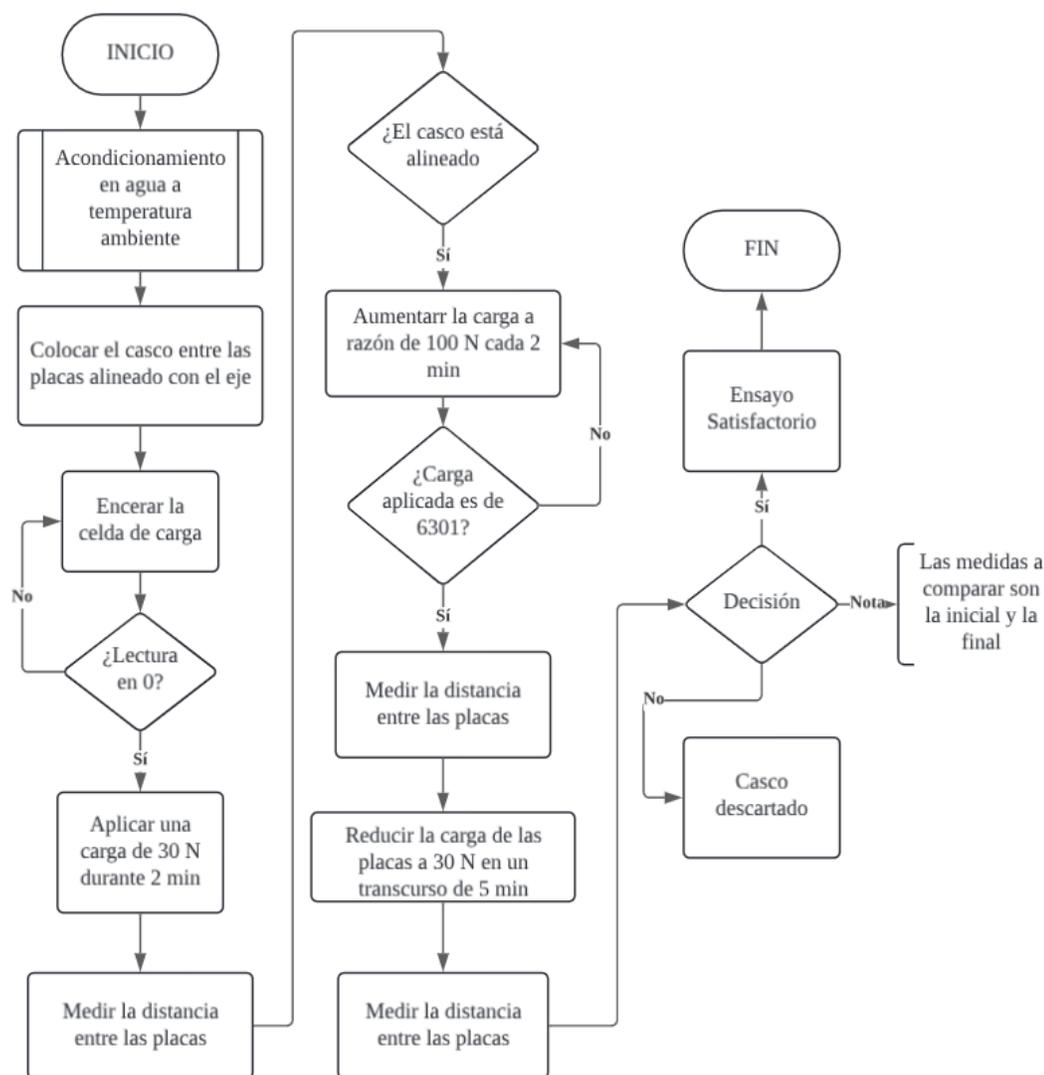
### 2.4.3. Posicionamiento del Casco en la Máquina de Ensayo

Para cada uno de los ensayos, el casco debe situarse en una posición en la cual coincida con el eje vertical de la horma y para el caso de ensayos de impacto, el área de impacto este alineada con la caída del impactador.

### 2.4.4. Ensayo de Rigidez

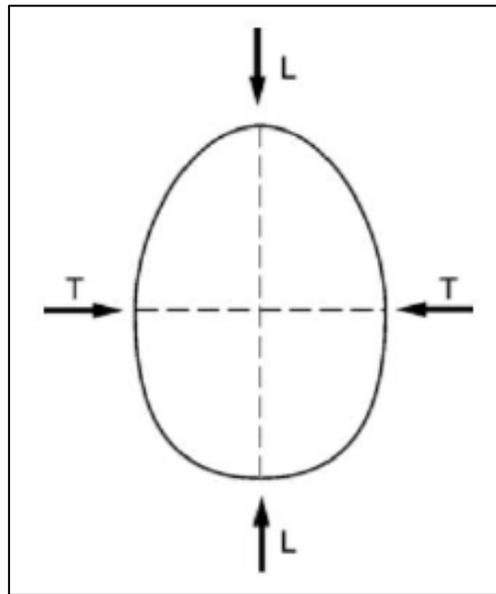
A continuación, en la Figura 2.13 se muestra el diagrama de flujo que detalla el proceso para llevar a cabo el ensayo de rigidez en base a la normativa INEN 2669.

**Figura 2.13.** Diagrama de Flujo Ensayo de Rigidez.



El casco previamente acondicionado se coloca entre dos placas paralelas y con una superficie mayor al área frontal del casco que ejerzan una carga controlada a lo largo del eje longitudinal y transversal como se muestra en la Figura 2.14. A continuación, se aplica una fuerza inicial de 30 N, una vez transcurridos 2 min se mide la distancia existente entre cada placa. Seguidamente se incrementa la carga a 100 N cada 2 min hasta llegar a una carga máxima de 630 N, en este punto se mide la distancia entre placas. Debe usarse un casco nuevo para realizar el ensayo en cada eje.

**Figura 2.14.** Plano longitudinal y transversal.



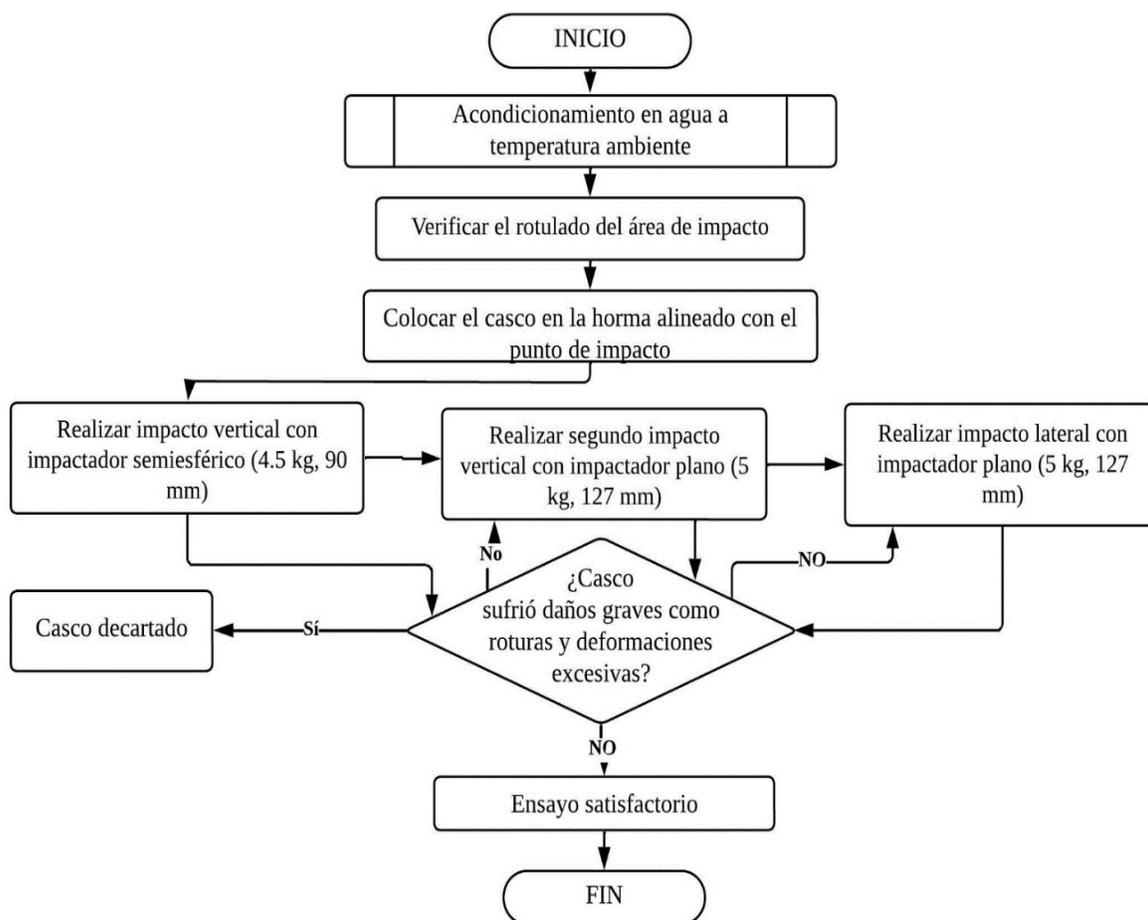
Fuente: [15]

Finalmente se reduce la carga a 30 N durante 5 min y se mide la distancia entre cada placa. Esta distancia no debe tener una variación mayor a 15 mm en comparación con la medida obtenida tras la aplicación de la primera carga.

#### **2.4.5. Ensayo de Absorción de Impacto**

En la Figura 2.15 se simplifica el procedimiento para realizar el ensayo, en los párrafos posteriores se explica a detalle el mismo.

**Figura 2.15.** Diagrama de flujo ensayo de absorción de impacto.



El primer paso es verificar el rotulado del área de impacto y asegurar que el casco esté adecuadamente posicionado sobre la horma. Una vez completado el acondicionamiento previo, el ensayo debe realizarse en 5 minutos. Este límite de tiempo es esencial para mantener las condiciones del ensayo consistentes y evitar cualquier variación que pueda afectar los resultados, además, las directrices deben asegurar que la velocidad de colisión no caiga por debajo del 95% de la velocidad teórica.

El ensayo implica la realización de dos tipos de impactos verticales. El primero se realiza utilizando un impactador semiesférico metálico de 4,5 kg y 90 mm de diámetro. El segundo impacto se realiza utilizando un impactador metálico plano de superficie circular de 5 kg y 127 mm de diámetro. Ambos impactos se realizan en el mismo punto.

En cuanto al impacto lateral, se siguen los mismos parámetros que para el impacto vertical con la diferencia de que únicamente se realiza con el impactador plano, además, con el casco en una posición lateral girado 90°. Es importante tener en cuenta que la velocidad del impactador debe ser de 7 m/s para el impacto vertical y de 5,5 m/s para el impacto lateral. Para considerar que el casco cumple con una absorción de impacto apropiada, se hace una comprobación visual del casco, además, la fuerza máxima transmitida debe ser menor o igual a 15 kN y la aceleración en la horma no debe ser mayor a 275g (2.697,75 m/s<sup>2</sup>) en ningún momento.

Al momento de realizar el ensayo físico se obtiene los datos del acelerómetro en el software Coolterm que almacena los resultados en un archivo CSV, este archivo se puede procesar en Excel y se obtiene las gráficas de la aceleración, así mismo para el cálculo de la fuerza se utilizara la Ecuación 2.1.

**Ecuación 2.1.** Cálculo de la fuerza.

$$F = ma$$

Donde:

$$F = \text{Fuerza [N]}$$

$$m = \text{Masa [kg]}$$

$$a = \text{Aceleración [m/s}^2\text{]}$$

Debido a que el acelerómetro tiene una capacidad máxima de 16g se realiza una extrapolación de los datos obtenidos utilizando una velocidad calculada y la velocidad del ensayo, haciendo uso de la Ecuación 2.2 se extrapola los datos obtenidos y se obtiene una gráfica calculada de los valores del ensayo según condiciones de la norma.

**Ecuación 2.2.** Ecuación de extrapolación de la aceleración.

$$a_2 = a_1 * \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

Donde:

$a_2 = \text{Aceleración Extrapolada [m/s}^2\text{]}$

$a_1 = \text{Aceleración Obtenida [m/s}^2\text{]}$

$V_1 = \text{Velocidad Calculada [m/s]}$

$V_2 = \text{Velocidad del ensayo [m/s]}$

Para obtener la velocidad calculada se emplea la Ecuación 2.3.

**Ecuación 2.3.** Ecuación de la velocidad

$$V_1 = \sqrt{2gh}$$

Donde:

$V_1 = \text{Velocidad Calculada [m/s]}$

$g = \text{Aceleración de la gravedad [m/s}^2\text{]}$

$h = \text{altura desde donde se deja caer el impactador [m]}$

## 2.5. Diseño y Fabricación de Equipos de Ensayo

### 2.5.1. Equipo 1: Rigidez

#### 2.5.1.1. Diseño.

El equipo necesario para el ensayo de rigidez requiere un mecanismo que permita someter al casco de prueba a una carga de compresión controlada de hasta 630 N entre dos placas paralelas y con un área superficial mayor al casco evaluado. Para este ensayo se tomaron en cuenta los materiales de la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4.** Materiales Equipo de rigidez.

<b>Placa metálica</b>	Dos placas metálicas de 6 mm de espesor de 30x30cm y 20x20cm respectivamente.
<b>Arduino UNO</b>	Placa de desarrollo principal.
<b>Amplificador HX711</b>	Este módulo se utiliza para amplificar la señal de la celda de carga y facilitar su lectura con el Arduino.
<b>Cables y conexiones</b>	Necesarias para conectar la celda de carga, el amplificador y Arduino.
<b>Protoboard</b>	Elemento electrónico que facilita las conexiones entre elementos.
<b>Computadora</b>	Medio de recolección de datos

### 2.5.1.2. Construcción.

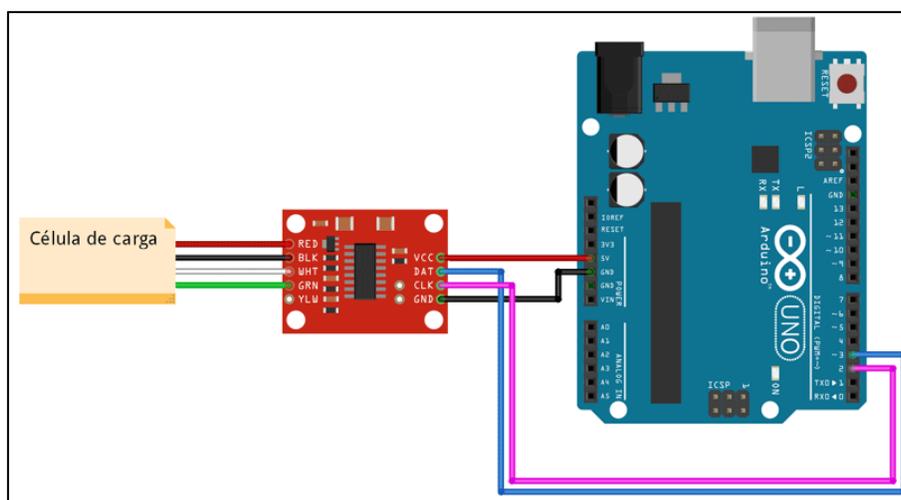
En este caso se utilizó de forma íntegra la prensa hidráulica donde se realizaron modificaciones en cuanto a la superficie de contacto que colinda con el punto de fuerza de la gata hidráulica, la celda de carga y la placa. El ensamble resultante se muestra en la Figura 2.16.

**Figura 2.16.** Equipo Ensayo de Rigidez.

### Conexiones.

Para realizar las conexiones de los elementos se siguió el esquema eléctrico de la Figura 2.17 entre la célula de carga, Arduino y HX711 [43].

**Figura 2.17.** Diagrama eléctrico Celda de carga.

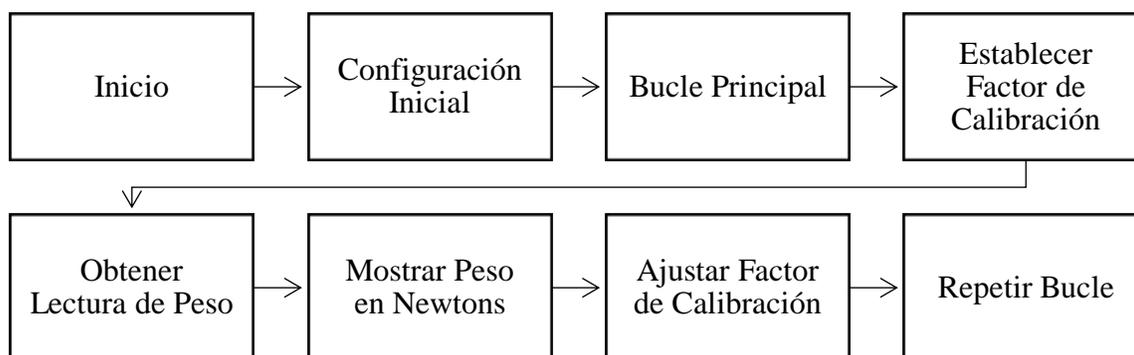


Célula de carga	HX711	Arduino
Cable Rojo	Pin E+	
Cable Negro	Pin E-	
Cable Verde	Pin A-	
Cable Blanco	Pin A+	
	VCC	5V
	GND	GND
	DT	Pin Digital 2
	SCK	Pin Digital 3

### ***Programación En Arduino.***

El código realiza la calibración y lectura de una celda de carga utilizando el módulo HX711. En la Figura 2.18 se encuentra el diagrama de flujo correspondiente:

**Figura 2.18.** Diagrama de flujo Arduino



El proceso de programación de una celda de carga utilizando un módulo HX711 en Arduino comienza con la configuración inicial, en la cual se definen los pines y las variables que se usarán para la comunicación entre los componentes. A continuación, en la configuración inicial, se establece la comunicación serial con el objetivo de monitorear las lecturas desde el ordenador, se configura y tara la báscula para asegurar que se encuentre en un estado de medición correcto, y se obtiene el factor de cero que corresponde al valor inicial de referencia antes de realizar las mediciones de peso.

Una vez completada esta configuración, se entra en el bucle principal del programa, donde se establece el factor de calibración adecuado para asegurar que las lecturas de la celda de carga sean precisas. Posteriormente, se obtiene la lectura de peso en la celda de carga y se convierte dicha lectura a unidades de Newtons para ser mostrada en el monitor serial. Además, el programa permite ajustar el factor de calibración en función de las entradas del usuario para afinar la precisión de las mediciones. Este bucle se repite de manera continua, permitiendo la obtención de mediciones en tiempo real y la posibilidad de reajustar el sistema de forma dinámica según sea necesario.

## 2.5.2. Equipo 2: Absorción de Impacto

### 2.5.2.1. Diseño.

Para cumplir con el protocolo de ensayo se elaboraron los planos del equipo en un software CAD, los mismo se ilustran en los anexos B, D, C, E y F basado en la normativa nacional con variaciones en el diseño que no afectan el proceso ni los resultados para el ensayo. La estructura para el equipo se detalla a continuación en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5.** Materiales estructurales equipo de absorción de impacto.

Componente	Descripción
<b>Estructura de Soporte</b>	<p>Con el fin de proveer soporte se agregaron 4 columnas de ángulos de acero de 1" x 1" y de 3 mm de espesor, para determinar la altura se utilizó la ecuación 2 para determinar la distancia necesaria en base a la velocidad final requerida, lo cual dio como resultado 2,5 m; añadiendo una altura de 0,35 m para el casco y 0,15 m para el sistema de izaje se requirió una altura total de 3 m. Se debe tener en cuenta que en el ensayo real la velocidad debe ser al menos del 90% de la velocidad teórica.</p> $d = \frac{(7m/s)^2}{2(9.81m/s^2)} = 2,497$
<b>Placa Base</b>	La base de la estructura de madera se dimensiono de forma rectangular para facilitar el ensamble del resto de piezas, las dimensiones son de 50cm x 75cm y de 4cm de espesor.
<b>Tubos guías</b>	Para que los punzones tengan dirección vertical se usaron tubos redondos como guías, de 1 pulgada de ancho x 2 mm de espesor y 3m de altura.
<b>Pieza Desplazamiento.</b>	Esta pieza es la que permite al punzón desplazarse por las guías, tiene un orificio roscable de ½ pulgada en el cual se puede cambiar el tipo de punzón utilizado para el impacto sobre el casco.
<b>Punzón 1</b>	Impactador semiesférico metálico de 4,5 kg y 90 mm de diámetro.
<b>Punzón 2</b>	Impactador metálico plano de superficie circular de 5 kg y 127 mm de diámetro.

### 2.5.2.2. Construcción.

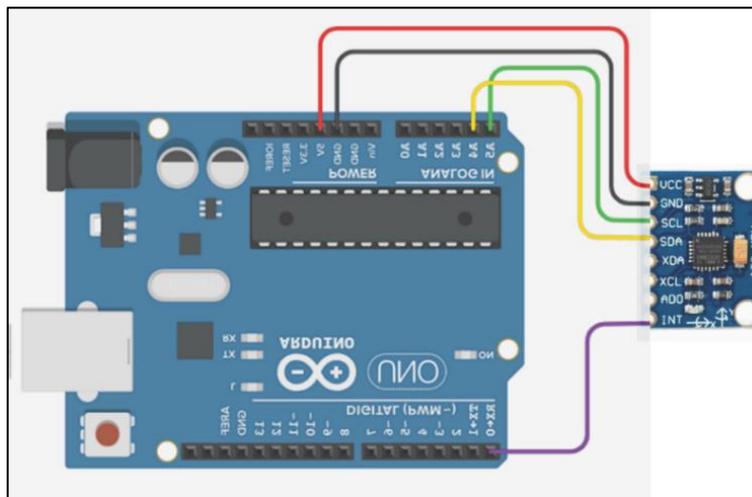
Para la construcción del equipo se utilizaron los planos obtenidos del modelo CAD del Anexo V y los materiales descritos en la Tabla 2.5. Con ello se realizó el montaje necesario y se obtuvo el equipo que se evidencia en la Figura 2.19.

**Figura 2.19.** Equipo de Absorción de Impactos.



### *Conexiones.*

Para poder tomar los datos del acelerómetro se utilizaron las conexiones de la Figura 2.20 entre el módulo MPU6050 y el Arduino:

**Figura 2.20.** Diagrama Conexiones Arduino/MPU6050.

En la Tabla 2.6 se indica como deben realizarse las conexiones para que el código generado pueda utilizarse de manera adecuada.

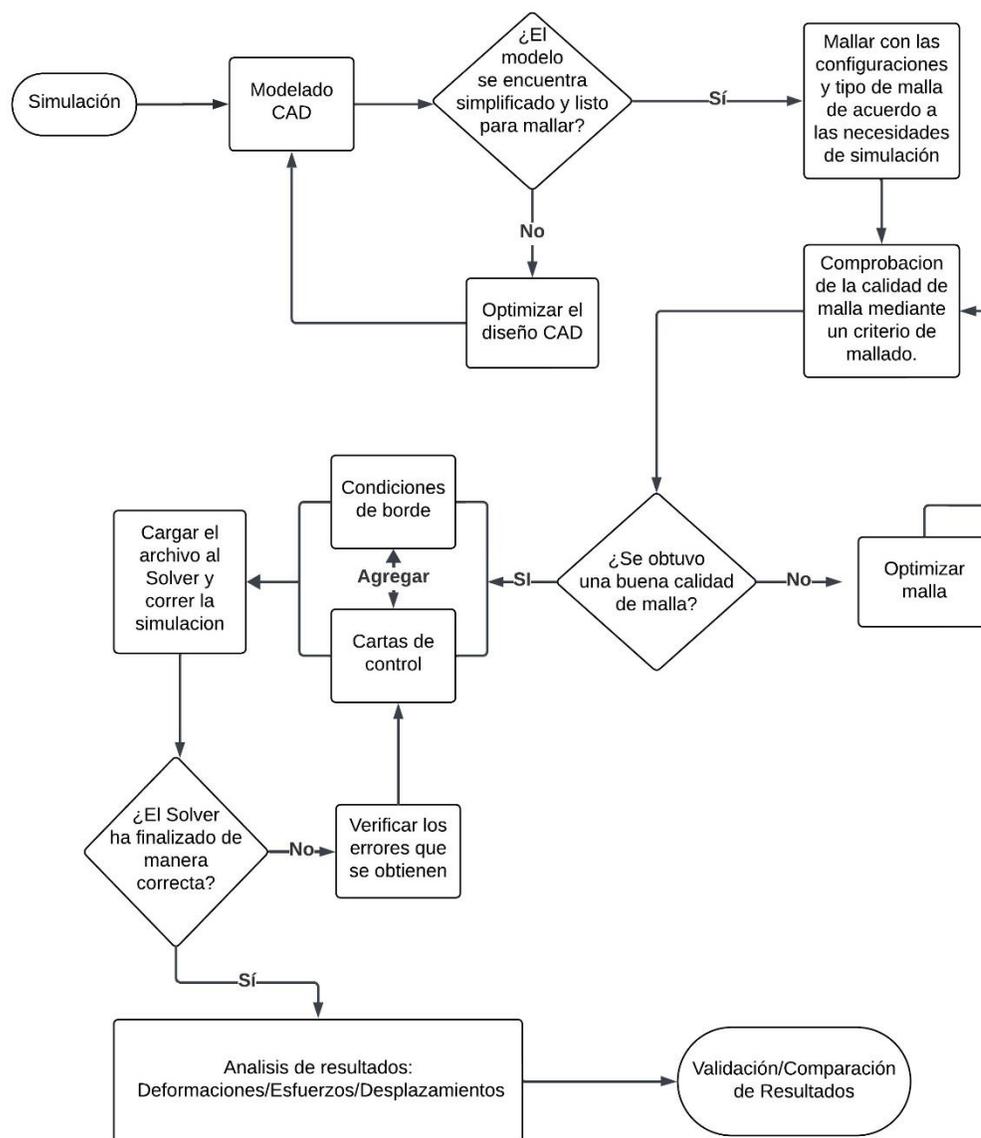
**Tabla 2.6.** Conexiones Arduino UNO/MPU6050.

MPU6050	Arduino
VCC	5V
GND	GND
SCL	PIN A5
SDA	PIN A4
XDA	“Línea de datos auxiliar I2C”
VCL	“Línea de reloj auxiliar I2C”
AD0	“Selección de dirección I2C”
INT	Pin Digital 2

## 2.6. Simulación

Para presentar una mejor comprensión a la metodología utilizada para la simulación, se realizó un diagrama de flujo ilustrado en la Figura 2.21 que muestra el proceso de manera general.

**Figura 2.21.** Diagrama de Flujo para simulación.



## 2.6.2. Modelado CAD del Casco

### 2.6.2.1. Escaneo 3D del Casco.

El proceso de escaneo requirió ubicar marcadores propios del equipo que permiten al escáner ubicarse con mayor facilidad y realizar el escaneo con mayor rapidez, los cuales se ubicaron alrededor del casco como se muestra en la Figura 2.22.

**Figura 2.22.** Ubicación de marcadores para escaneo.



Se escaneó el casco por partes para luego generar la unión de estas dentro del software a fin de tener el elemento completo. Tras escanear, se purgó elementos inutilizados en el archivo de escaneo para exportar el archivo en formato STL en tamaño real que se muestra en la Figura 2.23.

**Figura 2.23.** Casco para exportar en formato STL.



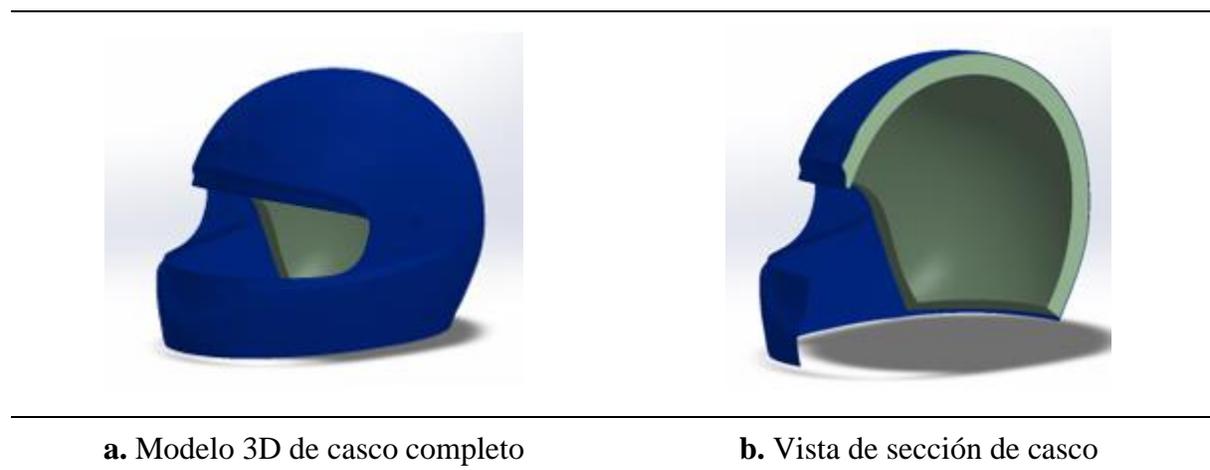
#### **2.6.2.2. Geometría CAD del casco.**

El modelado CAD es una etapa crucial en la creación de un modelo de elementos finitos preciso. Implica dibujar la pieza o sistema a analizar considerando su posterior discretización en

elementos finitos. Este proceso no se limita a una representación gráfica precisa, sino que también implica simplificar detalles irrelevantes y enfocarse en las zonas de interés, teniendo en cuenta los objetivos del análisis a realizar [44].

El archivo obtenido mediante el escaneado se importa en SolidWorks para editar o limpiar las partes no útiles para el estudio, dejando el diseño simplificado para el posterior proceso de mallado en el software CAE. Con las herramientas de malla y superficies de SolidWorks se obtuvo el modelo corregido del casco para luego exportarlo en formato STEP. Se consideró que la carcasa se mantenga como una superficie mientras que la espuma protectora se trabajó como un elemento sólido, obteniendo así el diseño 3D de la Figura 2.24.

**Figura 2.24.** Modelo 3D del casco.



### 2.6.2.3. Materiales y Secciones del casco.

Dependiendo del análisis a realizar, hay que definir completamente las propiedades y características de los materiales involucrados, como densidad, coeficiente de dilatación térmica y otras propiedades específicas. Esta información es esencial para configurar adecuadamente los elementos finitos dentro del software de análisis y obtener resultados precisos [44].

### ***Material y sección para carcasa de casco.***

El material para la carcasa del casco se obtuvo de [45] que corresponde al compuesto de 90% resina poliéster con 10% fibra de vidrio, cuyas propiedades mecánicas se detallan en la Tabla 2.7.

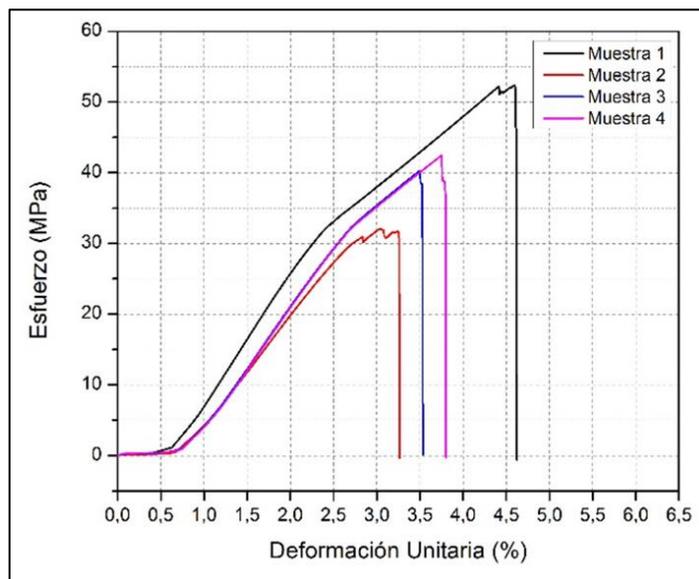
**Tabla 2.7.** Propiedades mecánicas carcasa de casco.

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Densidad	1.320	kg/m <sup>3</sup>
Relación de Poisson	0,3	-
Módulo de elasticidad	1677,5	MPa
Límite elástico	41,8	MPa

Autor: [45]

Para ingresar al software de igual manera se requirió la curva de esfuerzo-deformación de dicho material, que se detalla en la Figura 2.25.

**Figura 2.25.** Curva de esfuerzo-deformación para material de carcasa de casco.



Dentro del software de simulación se asignó el modelo de material MAT\_024 PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY con las características especificadas en este apartado

para la carcasa, y al tener una malla tipo Shell se le asignó una sección de 5 mm de espesor mediante la carta de control SECTION\_SHELL

***Material espuma de protección.***

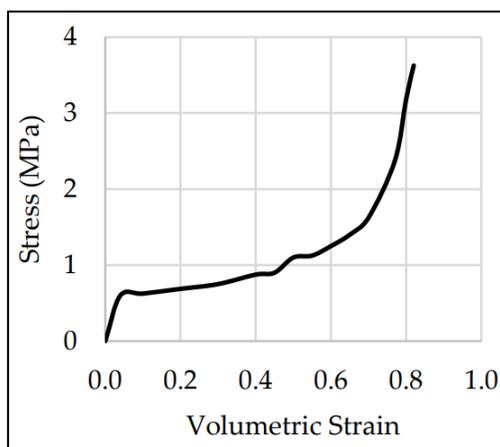
Para la esponja de protección se asignó las características de la espuma expandida de poliestireno (EPS), cuyas propiedades mecánicas se detallan en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8.** Propiedades mecánicas espuma de protección.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	51,6	kg/m <sup>3</sup>
Relación de Poisson	0,01	-
Módulo de elasticidad	8,24	MPa
Tensión cortante	3,6	MPa

En la Figura 2.26 se muestra la curva de esfuerzo-deformación volumétrica de la espuma de protección que se requiere para ingresar dichos valores al software de simulación.

**Figura 2.26.** Curva de esfuerzo-deformación volumétrica para EPS



Fuente: [46]

Para la espuma de protección se utilizó el modelo de material MAT\_063 CRUSHABLE\_FOAM con las características indicadas de la espuma EPS. Por otra parte, al ser una malla 3D se le asignó la carta de control SECTION\_SOLID que permite trabajar con el material indicado.

***Material para impactadores y placas de ensayo.***

Para los impactadores y placas necesarias para los ensayos se asignó un material rígido a fin de que transmitan las fuerzas o velocidades aplicadas sin deformarse. Sus propiedades se detallan en la Tabla 2.9.

**Tabla 2.9.** Propiedades mecánicas placas para ensayo.

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Densidad	7.800	kg/m <sup>3</sup>
Relación de Poisson	0,3	-
Módulo de elasticidad	207	GPa

Se asignó el modelo de material MAT\_020 RIGID para las placas de ensayo y una sección de material de 0,5 mm mediante SECTION\_SHELL. Cabe recalcar que al ser elementos rígidos no presentarán deformaciones por lo que la sección o espesor no modifica los resultados de las simulaciones.

**2.6.3. Ensayo de Rigidez**

**2.6.3.1. Unidades para simulación.**

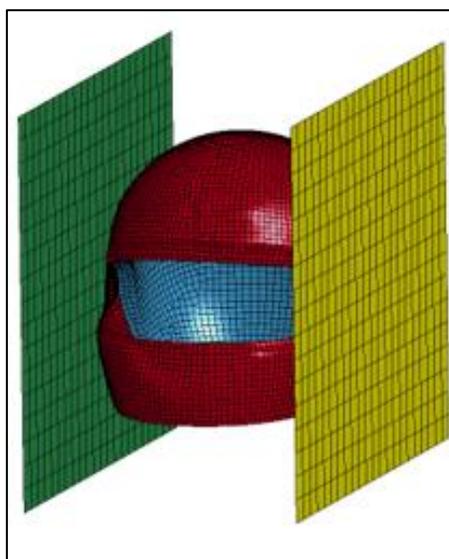
Las unidades utilizadas dentro del software durante el ensayo de rigidez corresponden a las indicadas en la Tabla 2.10.

**Tabla 2.10.** Unidades utilizadas para la simulación de rigidez.

Magnitud	Unidades
Masa	Ton
Tiempo	s
Longitud	mm
Fuerza	N
Presión	MPa

### 2.6.3.2. Geometría CAD.

Para el ensayo de rigidez se utilizó el casco previamente obtenido, además de ello, dos superficies planas rectangulares las cuales simulan las placas metálicas las cuales ejercen una fuerza determinada sobre el casco, esto lo podemos evidenciar en la Figura 2.27.

**Figura 2.27.** Casco y placas para simulación

### 2.6.3.3. Mallado.

La malla está compuesta por nodos que conectan los elementos finitos entre sí. La precisión del análisis utilizando este método depende de factores como la cantidad de nodos presentes en la

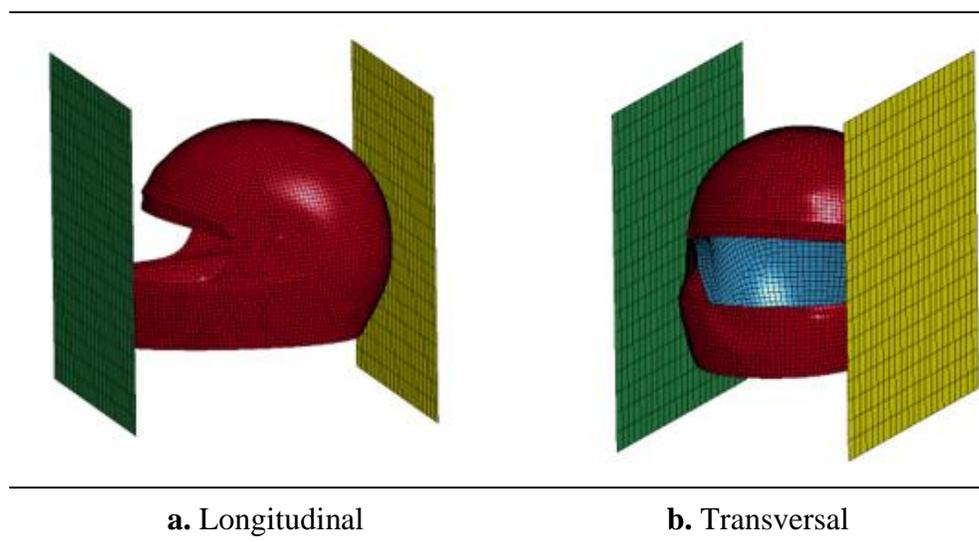
mallado, el tamaño de los elementos y los tipos de elementos utilizados [47]. El mallado del sistema de análisis se crea en la etapa inicial de la modelación definiendo las distintas variables del problema [48]. Cada nodo dispone sus distintos grados de libertad, lo que permiten recrear con más certeza la situación real del problema a simular [48].

**Tabla 2.11.** Detalle de malla para simulación de rigidez.

Elemento	Tipo de malla	Tamaño de malla
Carcasa de casco	Shell	5 mm
Espuma de protección	Solid	5 mm
Placas de ensayo	Shell	20 mm

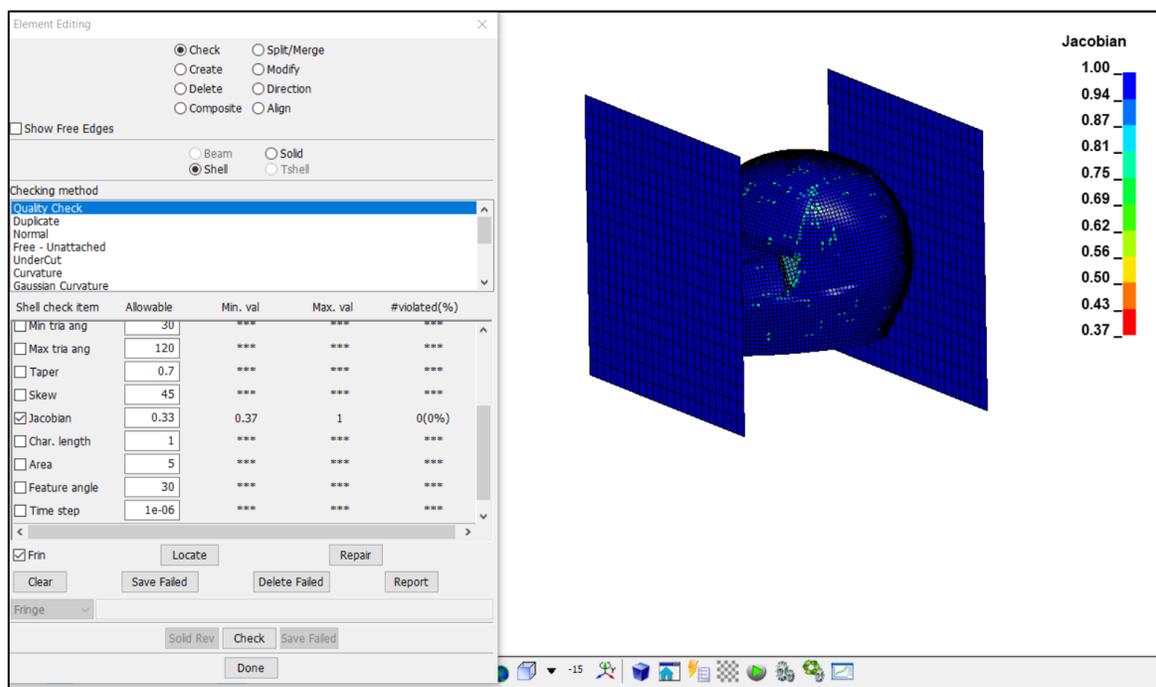
Se importó el archivo en formato STEP al software de simulación. Para el proceso de mallado se utilizó diferentes tamaños de malla y tipos en función de las características de cada material y trabajo que realiza en el proceso de simulación, como se detalla en la Tabla 2.11. El mallado se observa en la Figura 2.28.

**Figura 2.28.** Mallado de casco para ensayo de rigidez.



La calidad de malla se determinó con el criterio de "Jacobian Ratio" en un valor superior a 0,33 como se muestra en la Figura 2.29 que permite asegurar resultados fiables de la simulación.

**Figura 2.29.** Calidad de malla.



#### 2.6.3.4. Condiciones de Borde.

Las condiciones de borde se dividen en esenciales (geométricas) y naturales (de fuerzas). Las esenciales son los desplazamientos y deformaciones prescritos en el contorno, mientras que las naturales son las fuerzas y momentos aplicados, derivadas del Principio de la Energía Potencial Total Estacionaria. Además, se definen los apoyos, que restringen el movimiento de nodos simulando restricciones reales, y las cargas externas como fuerzas, presiones o momentos que actúan sobre el modelo. La correcta definición de todas estas condiciones de borde es crucial para obtener soluciones únicas y representativas [44].

Para restringir los movimientos de las placas de ensayo se utilizó la carta de control BOUNDARY\_SPC\_SET. En la cual una placa se coloca completamente fija, y la otra se permite el movimiento de traslación en el eje de acción de la fuerza.

Los contactos entre la espuma de protección y la carcasa del casco se definieron con la carta de control AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE, mientras que el contacto de todo el casco con las placas de ensayo se lo hizo a través de la carta de control AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE.

Para definir el tiempo de simulación se aplicó la carta de control TERMINATION con un valor de 0,15 s y la carta TIMESTEP con un valor de  $1,06 \times 10^{-6}$  s. La obtención de resultados se determinó que se haga cada 0,005 s mediante la carta BINARY\_D3PLOT.

#### **2.6.3.5. Aplicación de cargas.**

Según los protocolos de ensayo definidos se aplicó una condición de carga equivalente en el software en 0,15 s de simulación para reducir el gasto computacional. Se aplicó una fuerza inicial de 30 N durante 0,02 s, luego incrementa la carga a 100 N cada 0,015 s hasta llegar a una carga máxima de 630 N y finalmente se reduce la carga a 30 N durante 0,035 s.

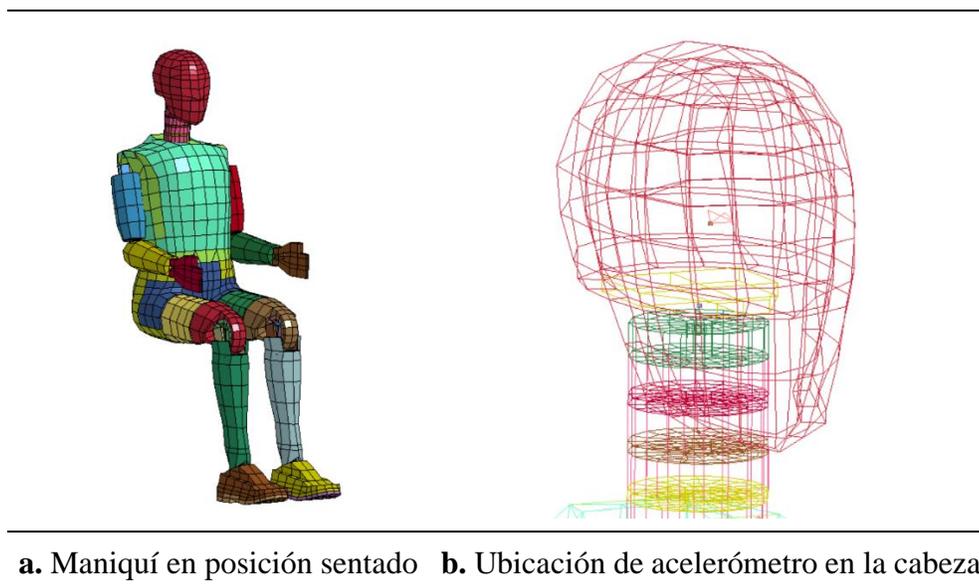
#### **2.6.4. Ensayo de Absorción de Impacto**

A continuación, se detalla la metodología para el análisis por elementos finitos usada para el ensayo de absorción de impactos. En este ensayo se utilizó un maniquí para la adquisición de resultados de acuerdo con lo requerido según los protocolos de pruebas definidos anteriormente.

##### **2.6.4.1. Condiciones Dummy.**

Se utilizó un maniquí o Dummy conocido como Híbrido III percentil 50 masculino, desarrollado por LSTC (Figura 2.30), el cual posee características similares a las del cuerpo humano, incluye sensores que miden fuerzas, momentos, desplazamientos y aceleraciones [49]. Particularmente posee un acelerómetro que se encuentra en la cabeza y que permitió la adquisición de resultados de aceleración con respecto al tiempo para esta investigación.

**Figura 2.30.** Híbrido III percentil 50 masculino



**a.** Maniquí en posición sentado **b.** Ubicación de acelerómetro en la cabeza

#### 2.6.4.2. Unidades para simulación.

Las unidades utilizadas dentro del software durante el ensayo de absorción de impactos corresponden a las indicadas en la Tabla 2.12.

**Tabla 2.12.** Unidades utilizadas para la simulación de absorción de impactos.

Magnitud	Unidades
Masa	kg
Tiempo	ms
Longitud	mm
Fuerza	kN
Presión	GPa

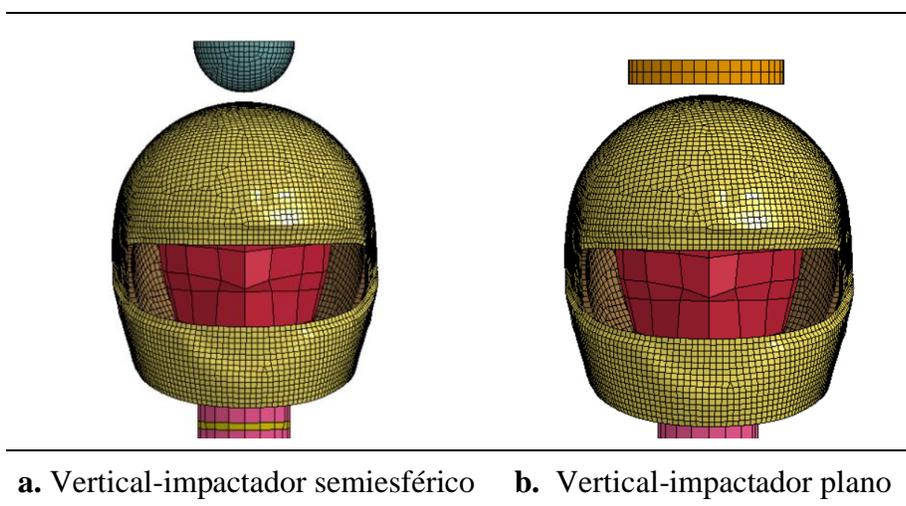
### 2.6.4.3. Mallado.

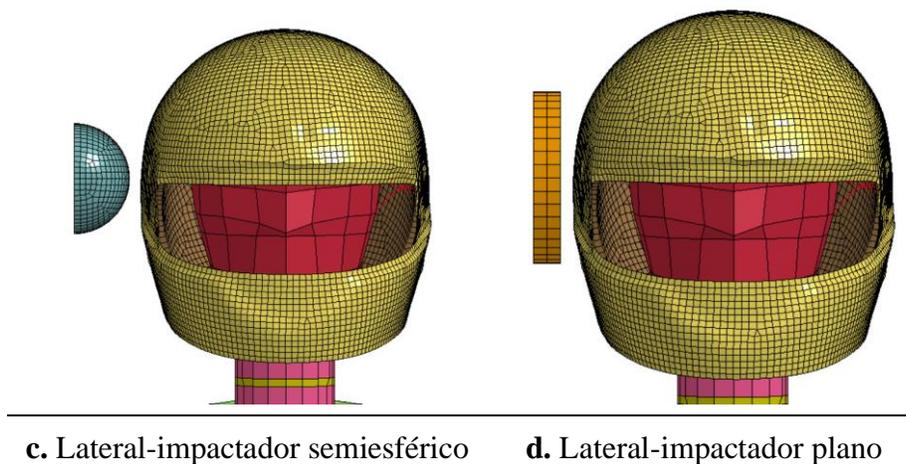
Se importó el archivo en formato STEP al software de simulación. Para el proceso de mallado se utilizó diferentes tamaños de malla y tipos en función de las características de cada material y trabajo que realiza en el proceso de simulación, como se detalla en la Tabla 2.13. El resultado se visualiza en la Figura 2.31.

**Tabla 2.13.** Detalle de malla para simulación de absorción de impactos.

Elemento	Tipo de malla	Tamaño de malla
Carcasa de casco	Shell	5 mm
Espuma de protección	Solid	5 mm
Impactador semiesférico	Shell	5 mm
Impactador plano	Shell	10 mm

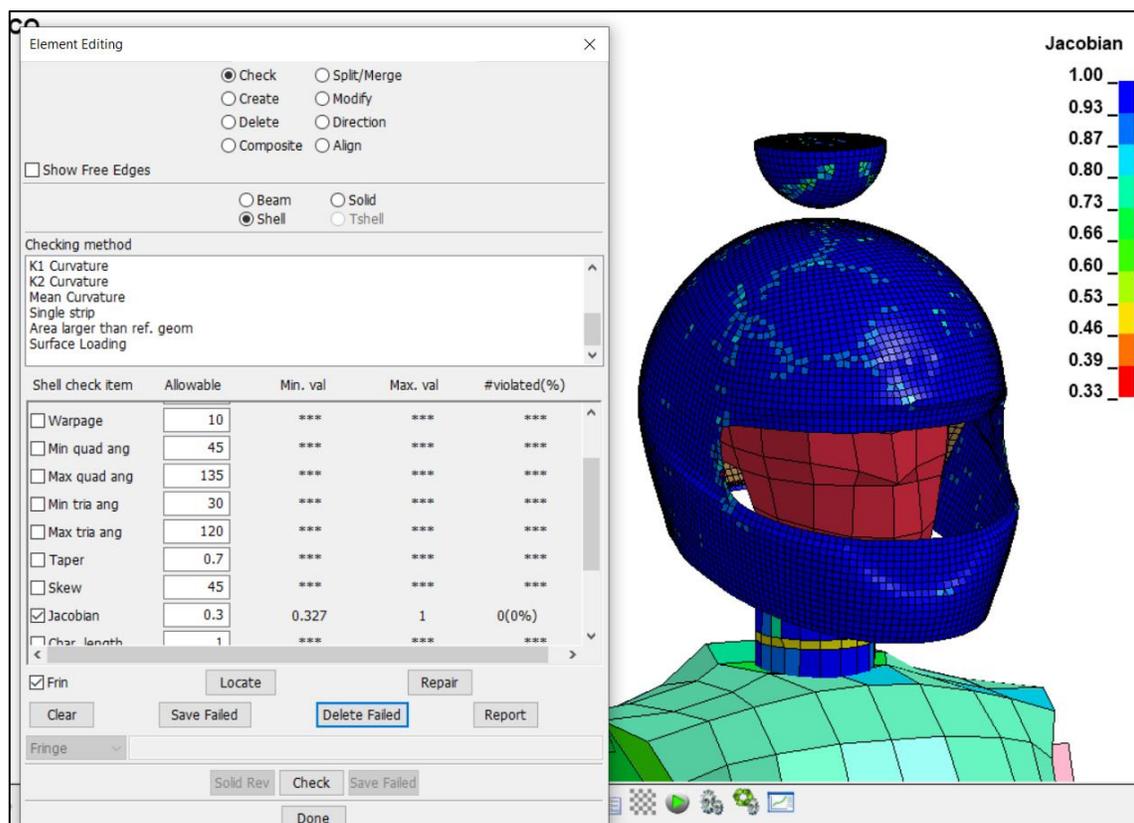
**Figura 2.31.** Mallado de casco para ensayos de absorción de impactos.





La calidad de malla se determinó con el criterio de “Jacobian Ratio” en un valor superior a 0,33 como se muestra en la Figura 2.32 que permite asegurar resultados fiables de la simulación [50].

**Figura 2.32.** Calidad de malla en ensayos de absorción de impactos.



#### **2.6.4.4. Condiciones de borde.**

Para restringir el movimiento del maniquí de pruebas se utilizó la carta de control BOUNDARY\_SPC\_SET, en la cual se ubicó nodos fijos en la parte inferior del maniquí para evitar que este se mueva durante los ensayos manteniendo la posición sentada y permitiendo que el cuello y cabeza queden libres.

Los contactos entre la espuma de protección y la carcasa del casco se definieron con la carta de control AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE, mientras que el contacto de todo el casco con los impactadores semiesférico y plano, así como también el contacto entre el casco y la cabeza del maniquí se lo hizo a través de la carta de control AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE.

Para definir el tiempo de simulación se aplicó la carta de control TERMINATION con un valor de 20 ms y la carta TIMESTEP con un valor de 0,001 ms. La obtención de resultados se determinó que se haga cada 1 ms mediante la carta BINARY\_D3PLOT.

#### **2.6.4.5. Aplicación de velocidad.**

Se llevaron a cabo dos simulaciones correspondientes al impacto en sentido vertical y el otro en sentido lateral. Para ambos casos se utilizó un impactador semiesférico metálico de 4,5 kg y 90 mm de diámetro y otro impactador metálico de sección circular plana de 5 kg y 127 mm de diámetro.

De acuerdo con los protocolos de ensayo definidos se aplicó la condición de velocidad de 7 mm/ms (equivalente a 7 m/s) para el ensayo de absorción de impacto vertical tanto para el impactador semiesférico como para el impactador plano, mientras que para el ensayo de absorción de impacto lateral se utilizó una velocidad de 5,5 mm/ms

### **2.7. Análisis Comparativo**

#### **2.7.1. Análisis de Gráficas**

Se realizará un análisis gráfico comparativo de las curvas obtenidas en los ensayos físicos y las simulaciones por FEM. Las gráficas permitirán visualizar claramente las diferencias entre los

resultados experimentales y simulados, así como identificar posibles desviaciones o tendencias en el comportamiento del casco.

Además, se podrán analizar aspectos como la forma de las curvas, la presencia de picos o valles, y la concordancia en las pendientes y valores máximos.

### ***2.7.2. Precisión de los Modelos***

Con el fin de validar los ensayos se lo realiza mediante la relación entre la energía interna de deformación en relación al valor de la energía de Hourglass; se considera una solución aceptable cuando la energía de Hourglass no supera el 10% de la energía interna [51]. Además de los resultados obtenidos en los ensayos físicos, se recopiló y analizó información bibliográfica de estudios previos que documentan ensayos similares, lo que permitió realizar una comparación directa entre los valores experimentales y los reportados en la literatura. Esta validación cruzada refuerza la fiabilidad de los resultados obtenidos, al contrastar las similitudes y diferencias entre ambos enfoques.

## CAPÍTULO III

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Ensayo de Rigidez

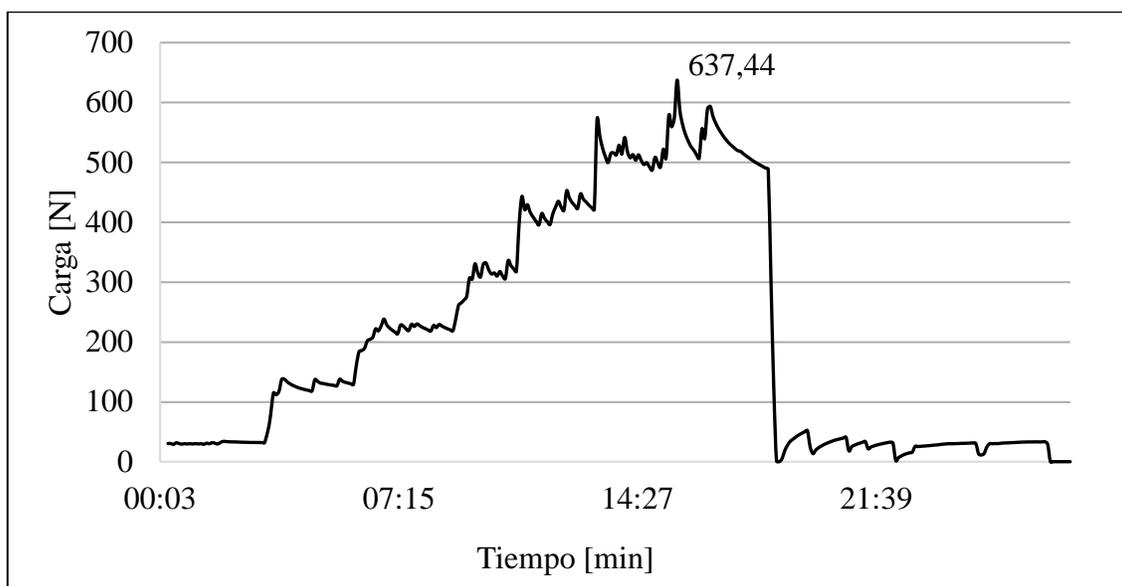
Para los ensayos de rigidez tanto longitudinal como transversal, se aplicó una fuerza inicial de 30 N, una vez transcurridos 2 min se midió la distancia existente entre cada placa. Seguidamente se incrementó la carga a 100 N cada 2 min hasta llegar a una carga máxima de 630 N, en este punto se midió la distancia entre placas. Finalmente se redujo la carga a 30 N durante 5 min y se midió la distancia entre cada placa. El casco a lo largo de la prueba sufrió deformaciones como se puede apreciar en el Anexo III.

##### 3.1.1. Ensayos Físicos

###### 3.1.1.1. Cargas

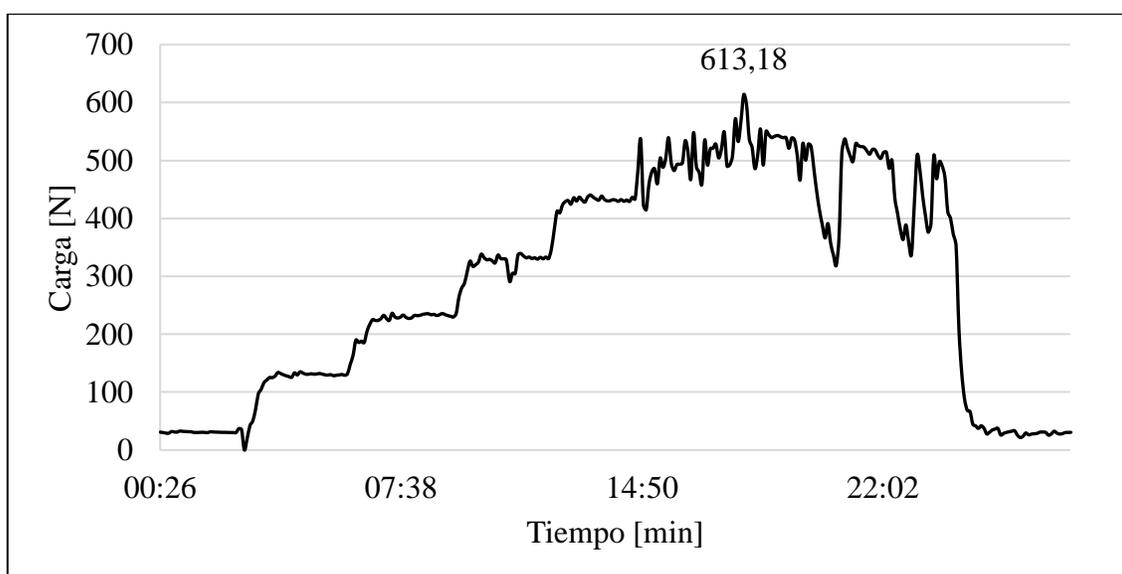
En la Figura 3.1 y Figura 3.2, se ilustra la distribución de las cargas aplicadas durante el ensayo de rigidez utilizando el equipo experimental diseñado. Este equipo fue construido específicamente para controlar la carga ejercida entre las placas paralelas al casco. Sin embargo, es importante señalar que la gráfica no muestra una distribución regular de la carga. Esta irregularidad se debe a la naturaleza del mecanismo manual empleado para la aplicación de la fuerza, lo que resultó en fluctuaciones inherentes y la dificultad de mantener una carga constante a lo largo del ensayo.

El ensayo de rigidez transversal tuvo una duración de 25 minutos donde se obtuvieron las medidas de las distancias entre las placas de contacto al aplicar la carga inicial de 30 N; en carga máxima a 630 N y en carga final de 30 N nuevamente. La curva de carga en función del tiempo muestra un comportamiento irregular con la presencia de varios picos de hasta 20 N entre mínimo y máximo, este comportamiento puede atribuirse al accionamiento manual del mecanismo utilizado en el ensayo, junto con las deformaciones progresivas del casco durante la prueba dificultaban un control uniforme de la carga aplicada.

**Figura 3.1.** Carga entre placas ensayo de rigidez eje transversal.

La carga máxima de 637,44 N se alcanzó en el minuto 16 y posteriormente se reduce progresivamente hasta llegar a la carga inicial conforme se establece en el protocolo de ensayo según la norma ECE No. 22.

Ahora se presenta la curva obtenida durante el ensayo de rigidez longitudinal en la gráfica de la carga en función del tiempo.

**Figura 3.2.** Carga entre placas ensayo de rigidez eje longitudinal.

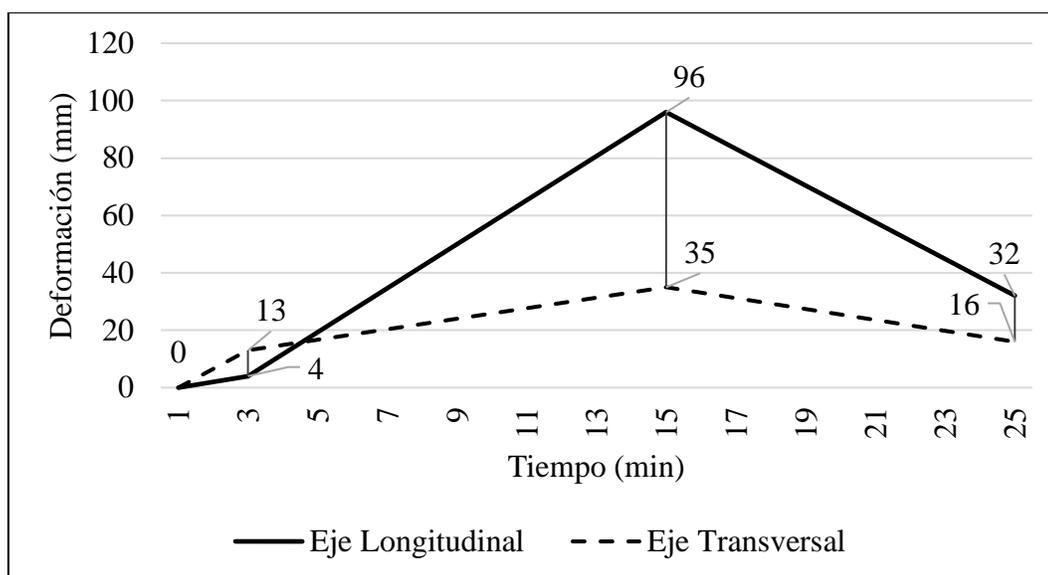
De igual forma, el ensayo tuvo una duración cercana a los 23 minutos, durante los cuales se midieron las distancias entre las placas de contacto al aplicar cargas similares que el ensayo longitudinal. La curva de carga frente al tiempo muestra un comportamiento no lineal, con varios picos que alcanzan hasta 50 N de diferencia entre los valores máximos y mínimos. Este patrón se puede atribuir tanto a las limitaciones del equipo de prueba como a las deformaciones graduales del casco, lo que impidió un control uniforme sobre la carga aplicada.

El valor más alto de carga, de 613,8 N, se alcanzó cerca del minuto 15, seguido por varias fluctuaciones que reflejan la variación en la resistencia del casco bajo carga. Al final, la carga se redujo rápidamente hasta alcanzar los 30 N, como lo establece el protocolo de ensayo de la norma ECE No. 22.

### 3.1.1.2. Deformaciones

Siguiendo el protocolo de ensayo se tomó mediciones de la distancia entre las placas de contacto en tres puntos durante el ensayo: al aplicar la carga inicial; a carga máxima; y finalmente al retornar a la carga inicial. Tal se indica en la Figura 3.3.

**Figura 3.3.** Deformación ensayo de rigidez



Con la ayuda de la gráfica podemos afirmar que la deformación en el ensayo de rigidez longitudinal fue de 4 milímetros al aplicar la carga inicial, seguidamente al aplicar la carga

máxima se obtuvo una deformación de 96 milímetros en relación a la medida inicial, finalmente se registró una medida de 32 milímetros al aplicar la carga final.

Por otro lado, en el ensayo de rigidez transversal se obtuvo una deformación inicial de 13 milímetros, tras aplicar la carga máxima el casco tuvo una deformación de 35 milímetros y por último se registró una deformación al aplicar la carga final de 16 milímetros.

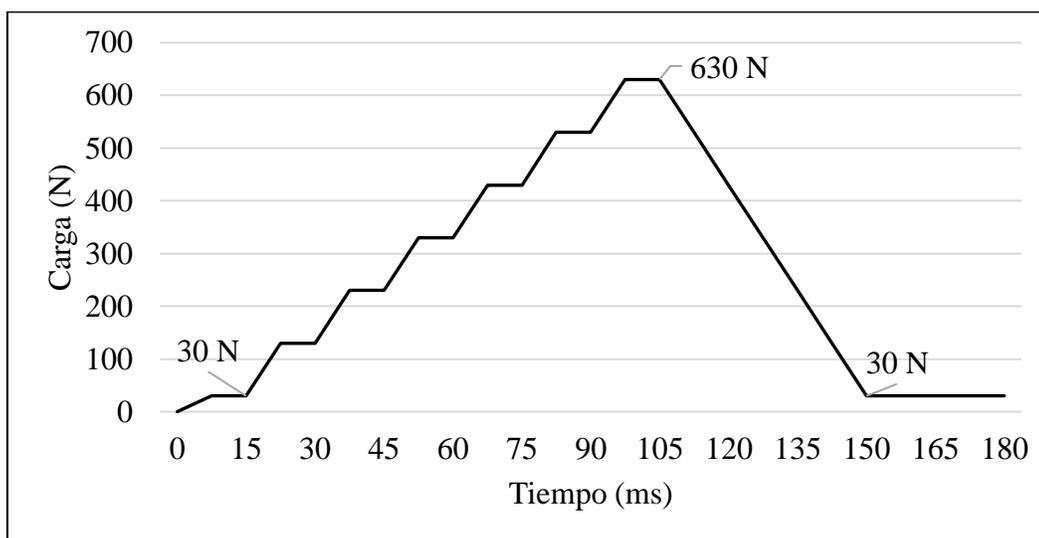
Las deformaciones en el eje longitudinal son mayores que las deformaciones en el eje transversal, esto se debe a la geometría ovalada del casco y su configuración. El material de la carcasa posee un refuerzo de espuma de protección en las zonas laterales mucho mayor que las zonas frontales, además la forma del casco que es mucho más compacta en el eje transversal que en el longitudinal.

### 3.1.2. Ensayo Simulados

#### 3.1.2.1. Cargas

A diferencia del ensayo experimental previo, donde las cargas aplicadas fluctuaban debido a la naturaleza manual del equipo, en este caso, las condiciones de simulación permiten una aplicación de carga controlada. Esto se refleja en la Figura 3.4, donde se observa una distribución uniforme y consistente de la carga a lo largo del tiempo.

**Figura 3.4.** Curva de aplicación de carga para ensayo de rigidez.

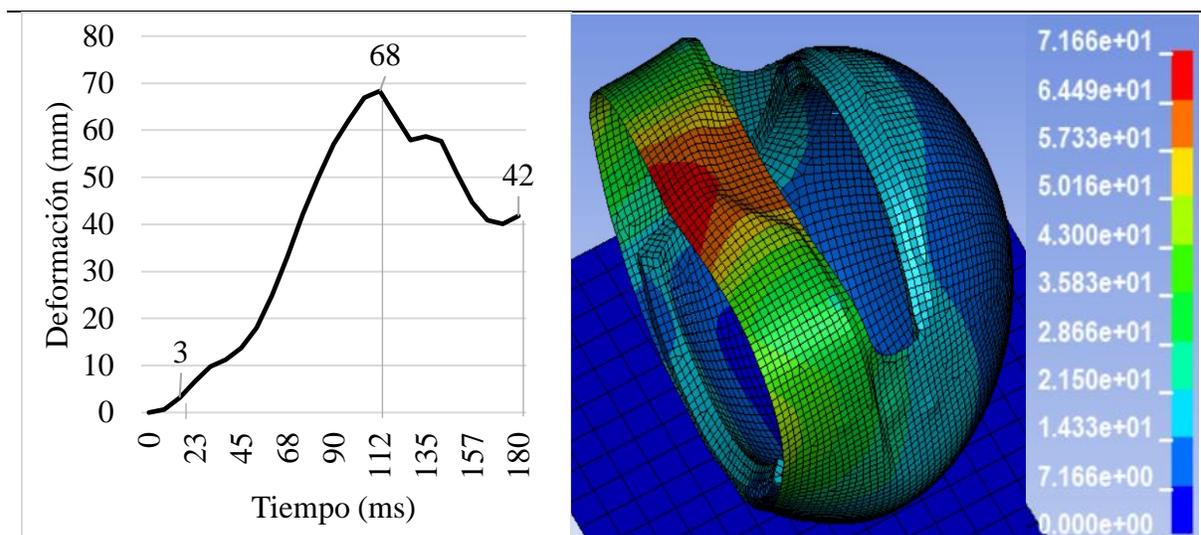


En este caso, para reducir el costo computacional y tiempo de simulación se determinó una duración de 180 milisegundos en cada ensayo tanto en el eje transversal como en el eje longitudinal, esta modificación será evaluada posteriormente en los resultados de validación para determinar si no será un problema a la hora de obtener resultados de las deformaciones del material de la carcasa. En relación al ensayo físico donde la carga se aumentaba a razón de 2 minutos, en la simulación este cambio progresivo se realiza a razón de 15 milisegundos alcanzando una carga máxima de 630 N a los 98 milisegundos transcurrido del ensayo.

### 3.1.2.2. Deformaciones

Al igual que en los ensayos físicos, en el método de elementos finitos (FEM) se registran valores de deformación mostrados en la durante el transcurso de los ensayos, estas gráficas son mucho más detalladas porque el software permite obtener la distancia entre las placas en todo momento.

**Figura 3.5.** Deformación ensayo de rigidez longitudinal



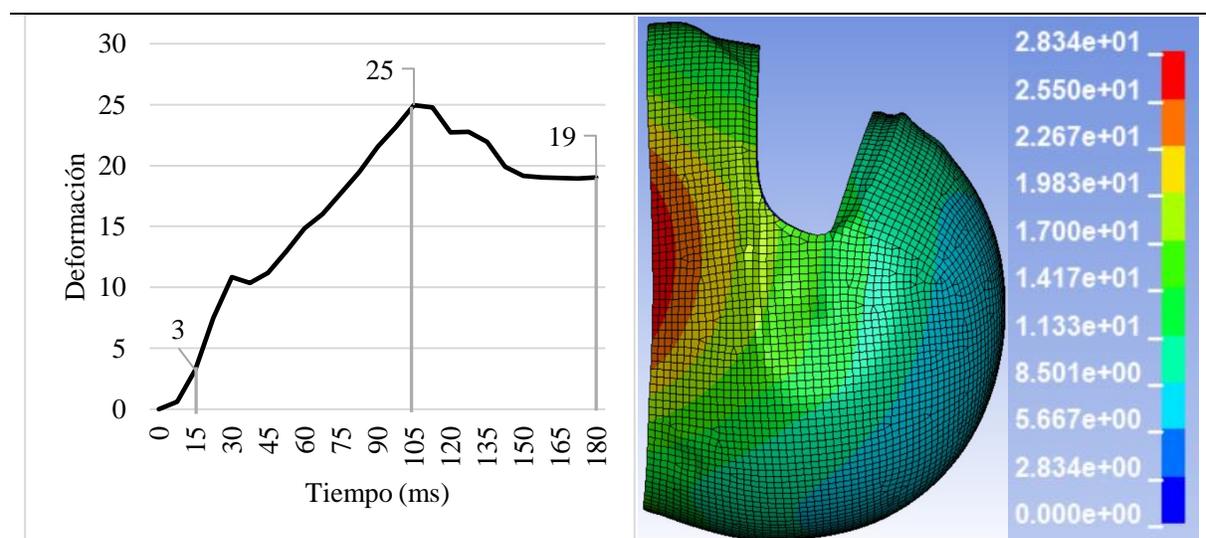
En la Figura 3.5 se muestran los resultados del ensayo de rigidez longitudinal aplicado al casco de motocicleta, con un análisis de deformación a través de dos enfoques: el gráfico de deformación en función del tiempo y un mapa de calor de la deformación resultante. En el gráfico de la izquierda, inicialmente entre 0 y 45 milisegundos, se presenta una deformación creciente que alcanza los 3 mm a los 23 milisegundos tras aplicar la carga inicial. Posteriormente

se observa un aumento acelerado en la deformación llegando al máximo valor de 68 mm a los 112 milisegundos, alcanzando el límite de carga. Luego del máximo, la deformación comienza a disminuir hasta los 42 mm a los 180 milisegundos, posiblemente debido a la redistribución de tensiones internas y al comportamiento elástico del casco, que tiende a recuperar parte de su forma.

A la derecha en cambio, el mapa de calor muestra un análisis de la distribución de deformaciones del casco. Los colores demuestran la magnitud de deformación, donde las zonas en rojo indican las áreas con mayor concentración de esfuerzos y deformación (cercanas a 71,66 mm), mientras que las zonas en azul corresponden a áreas con menor deformación (cerca de 0 mm). Las áreas más afectadas se encuentran en la región frontal que coincide con el punto de contacto con la placa de aplicación de carga. La deformación máxima predicha por la simulación es consistente con el valor máximo observado en la gráfica, con una diferencia menor de 3 mm debido a que el mapa de calor analiza las deformaciones resultantes en los 3 ejes de movimiento, a diferencia de la gráfica que lo analiza en un solo eje.

Así mismo la Figura 3.6 ilustra los resultados obtenidos del ensayo de rigidez transversal, centrado nuevamente en la deformación, pero con diferencias claras respecto a los valores máximos y la distribución de deformaciones obtenidas en comparación con el ensayo anterior.

**Figura 3.6.** Deformación ensayo de rigidez transversal



En la gráfica de la izquierda se muestra nuevamente la deformación en milímetros en función del tiempo en milisegundos donde alcanza una deformación de 3 mm en la fase inicial en los primeros 30 milisegundos, lo que indica una respuesta elástica similar a la observada previamente. El pico máximo de 25 mm se alcanza a los 90 milisegundos, sugiriendo una mayor rigidez que en el ensayo longitudinal. Posterior al pico, la curva decrece hasta estabilizarse en 19 mm hacia el final del ensayo, lo que indica un comportamiento elástico del material, aunque no tan pronunciado como en la primera simulación.

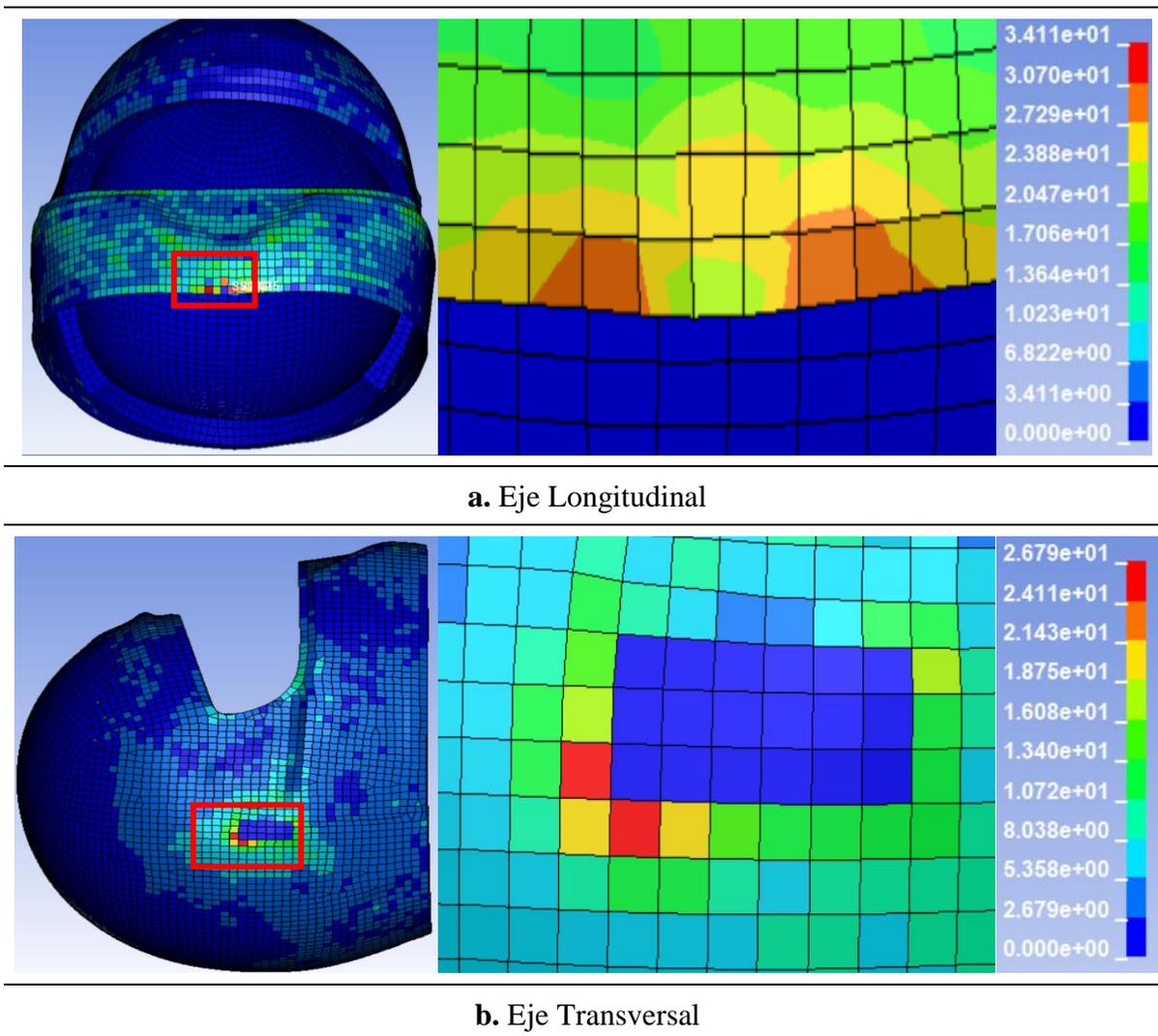
El mapa de calor muestra la distribución de deformaciones, en este caso las zonas de máxima deformación se resaltan en color rojo distribuidas a lo largo de la parte lateral del casco alcanzando los 28 mm. Las áreas en azul muestran que las regiones con menor deformación están localizadas principalmente en la parte posterior del casco donde las cargas parecen tener un impacto menos significativo.

A diferencia del ensayo de rigidez longitudinal, el valor máximo de deformación es menor con 43 mm, lo que puede estar relacionado con una diferente distribución de las cargas o la configuración de los materiales del casco. La simulación sugiere que la geometría del casco y las características estructurales en este ensayo están mejor distribuidas para soportar la carga dado que no se concentra la deformación en un único punto.

### **3.1.2.3. Tensiones de Von Mises**

Las tensiones de Von Mises son una medida crítica para evaluar la capacidad del material para soportar cargas sin fallar, porque comparan el estado de tensiones multiaxiales con el límite elástico del material. La Figura 3.7 presenta los mapas de calor de las Tensiones de Von Mises obtenidas mediante la simulación FEM para los ensayos de rigidez longitudinal (a) y rigidez transversal (b) sobre la carcasa del casco fabricado con fibra de vidrio.

**Figura 3.7.** Tensiones de Von Mises ensayo de rigidez



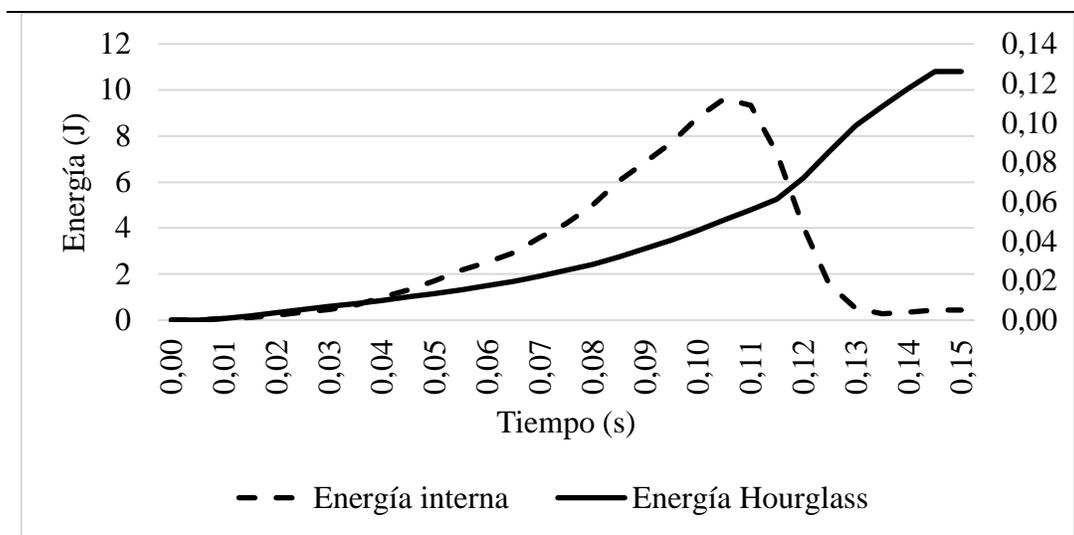
En el ensayo de rigidez longitudinal se observa que las tensiones se concentran en la región frontal del casco, como muestra la zona de color rojo-naranja, alcanzando un valor máximo aproximado de 34,11 MPa. Este valor está por debajo del límite elástico del material (41,8 MPa), lo que sugiere que, bajo estas condiciones, la carcasa del casco aún no experimenta fallos estructurales. Las áreas en azul representan zonas con bajas tensiones, inferiores a 5 MPa, lo que indica que estas regiones no están sometidas a una deformación significativa, esto sugiere que el casco absorbe eficientemente la carga longitudinal.

En el segundo mapa de calor correspondiente al ensayo de rigidez transversal las tensiones máximas se concentran principalmente en el área lateral del casco, donde el color rojo indica tensiones de aproximadamente 26,79 MPa. Aunque estas tensiones son menores que las observadas en el ensayo longitudinal, siguen siendo significativas, pero claramente por debajo del límite elástico de 41,8 MPa. La distribución de colores en esta simulación muestra que, a diferencia del ensayo longitudinal, las tensiones se propagan de forma más uniforme a lo largo de la superficie lateral del casco, lo que sugiere que el material está mejor adaptado para soportar cargas transversales sin concentrar esfuerzos excesivos en un solo punto.

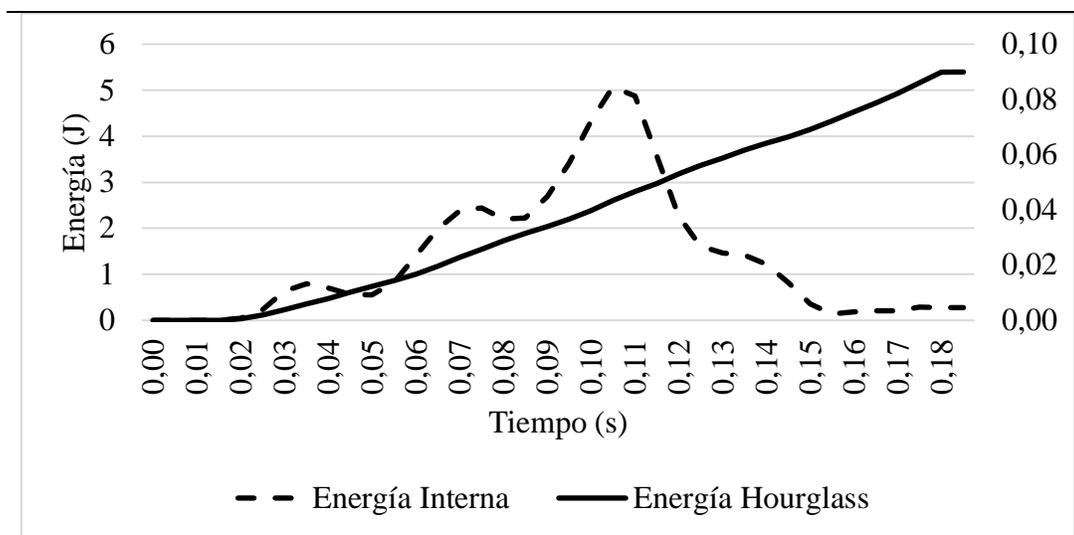
### 3.1.2.4. Energía de Hourglass

La Figura 3.8 se evidencia cómo evoluciona la energía durante un ensayo de rigidez, comparando la energía interna (línea discontinua) y la energía de Hourglass (línea continua) donde el eje Y representa la energía en Joules (J), mientras que el eje X representa el tiempo en milisegundos (ms).

**Figura 3.8.** Energía de Hourglass: ensayo de rigidez



a. Eje Longitudinal



b. Eje Transversal

En el ensayo longitudinal, la energía interna aumenta progresivamente desde el inicio del ensayo hasta alcanzar un valor máximo cercano a los 10 Joules en aproximadamente 0,10 segundos, luego decrece hasta estabilizarse en menos de 1 Joule durante 0,05 segundos demostrando la capacidad del casco de absorber energía al aplicar la carga máxima. La energía de Hourglass por otro lado, no posee un valor mayor a 0,13 Joules que representa un 1,3% de la energía interna, esta curva alcanza su pico en el final del ensayo, sin embargo, aún no es representativa en comparación a la energía interna.

Por otro lado, en el ensayo de rigidez transversal se observa un comportamiento de la curva distinto con picos a los 0,05; 0,08 y a los 0,11 segundos del ensayo, esto se debe a que el casco tiene una menor capacidad de absorber la energía rápidamente lo que provoca estos cambios bruscos en la curva. La energía interna alcanza un valor máximo de 5 Joules a los 0,11 segundos del ensayo y luego desciende hasta menos de 0,5 Joules. De igual modo, la energía de Hourglass crece progresivamente hasta alcanzar un valor de 0,9 Joules al terminar el ensayo, este valor corresponde al 6% de la energía interna.

La comparación entre los dos ensayos muestra que la energía de Hourglass no sobrepasa al 10% de la energía interna de la carcasa del casco, lo que indica que el modelo matemático no posee errores numéricos que afecten a los resultados del ensayo, este análisis indica que el casco tiene

un buen comportamiento en ambos ensayos, y los resultados numéricos no muestran errores significativos que puedan comprometer la validez del modelo o la simulación [52].

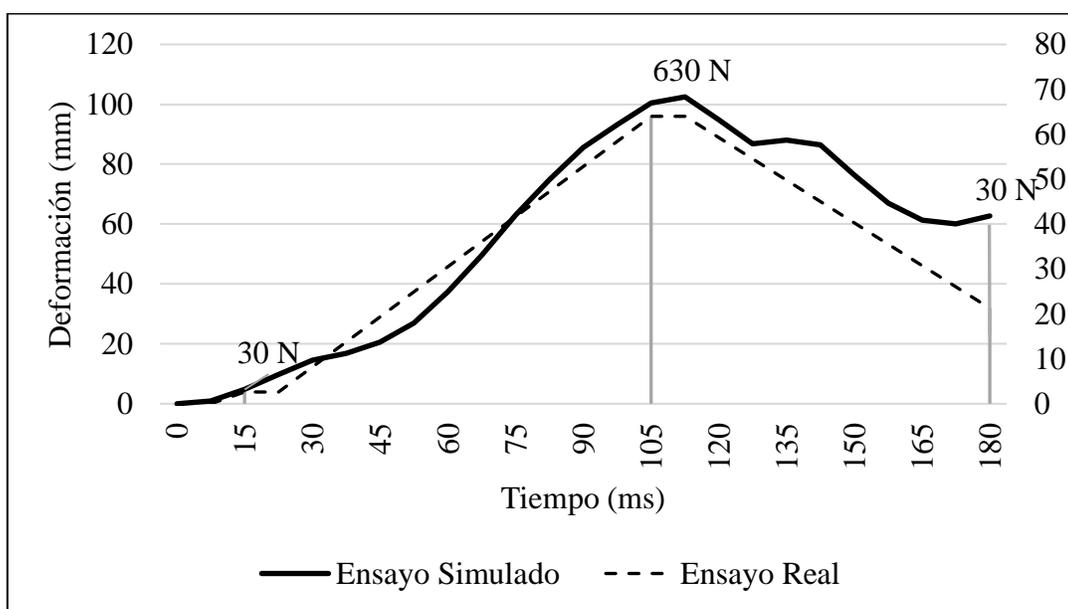
### 3.1.3. Análisis comparativo y discusión

#### 3.1.3.1. Ensayos Físicos vs Ensayos Simulados

##### *Ensayo de Rigidez Longitudinal.*

La Figura 3.9 de deformación correspondiente al ensayo de rigidez longitudinal muestra la comparación entre los resultados del ensayo real y los obtenidos mediante simulación. En el eje vertical izquierdo se presenta la deformación en milímetros (mm), mientras que en el eje horizontal se muestra un tiempo en milisegundos (ms) adaptado también al tiempo del ensayo real para poder analizar el comportamiento de las gráficas. Se observaron dos curvas: una línea sólida que representa el ensayo simulado y una línea punteada que corresponde al ensayo real.

**Figura 3.9.** Curva de deformación: ensayo de rigidez longitudinal



Como se puede observar en la gráfica, ambas curvas siguen una tendencia similar con un incremento de deformación bajo una carga de 30 N, seguido de un pico máximo de deformación cuando la carga llega a 630 N, para finalmente reducirse nuevamente bajo una carga de 30 N. Sin embargo, es evidente que el ensayo simulado presenta una mayor deformación en todos los

puntos clave, alcanzando más de 100 mm en su valor máximo, mientras que el ensayo real se mantiene por debajo de los 90 mm. Además, la curva simulada muestra un comportamiento más prolongado en el tiempo, mientras que el ensayo real tiende a recuperarse más rápido tras el pico. Este análisis sugiere que la simulación podría estar sobreestimando la deformación del casco.

A manera de resumen, los resultados numéricos se presentan en la Tabla 3.1, donde se detallan las medidas obtenidas bajo distintas cargas durante el ensayo de rigidez longitudinal. Estas medidas corresponden a las distancia tomada entre las placas de contacto durante el ensayo. Las deformaciones por otro lado se refieren a la variación entre la medida obtenida bajo la carga inicial de 30 N y la medida final a la misma carga, se muestra también le valor permitido por la norma INEN en la que se basó este ensayo. Finalmente se especifica si este casco cumple con los requisitos mínimos del ensayo.

**Tabla 3.1.** Deformaciones en el casco durante el ensayo de rigidez longitudinal

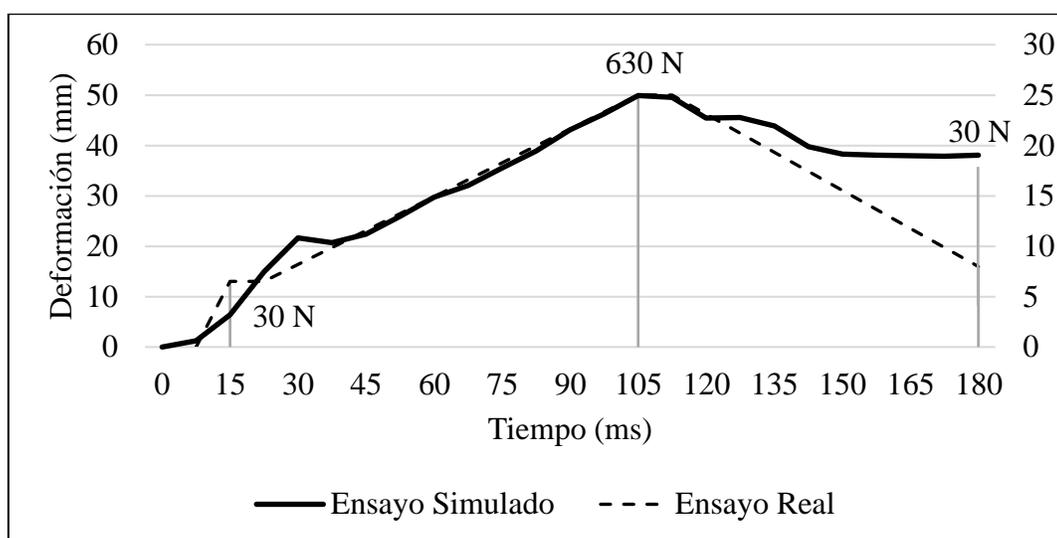
Ensayo de Rigidez	Medidas bajo carga (mm)			Deformación (mm)			Aprueba
	30 N	630 N	30 N	Obtenida	Permitida (INEN)	Error Porcentual (%)	
Real	312	216	280	32	15	8,57	NO
Simulado	320	258,37	284,92	35			NO

Al evaluar la deformación total obtenida en ambos ensayos, los valores exceden los límites permitidos por la norma INEN, que establece un máximo de 15 mm. En el ensayo real, la deformación fue de 32 mm, mientras que en la simulación alcanzó los 35 mm, corresponde a una variación del 8,57%. Debido a que ambos resultados superan el valor permitido, ninguno de los dos ensayos cumple con los requisitos de rigidez longitudinal establecidos por la norma.

### *Ensayo de Rigidez Transversal.*

En la Figura 3.10, al igual que en el caso de rigidez longitudinal, se comparan los resultados del ensayo simulado y el ensayo real. En este caso, la curva simulada también tiende a mostrar mayores valores de deformación que el ensayo real, aunque en este ensayo la diferencia es más sutil. Ambos ensayos siguen una trayectoria similar.

**Figura 3.10.** Curva de deformación: ensayo de rigidez transversal



En cuanto a las medidas de deformaciones, los resultados obtenidos bajo las cargas de 30 N y 630 N también son mayores en el ensayo simulado. Las deformaciones finales, tanto en el ensayo real como el simulado, superan ligeramente el límite permitido por la norma INEN, con valores de 16 mm en ambos casos, mientras que el límite máximo es de 15 mm. Estos datos se presentan a continuación en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Deformaciones en el casco durante el ensayo de rigidez transversal

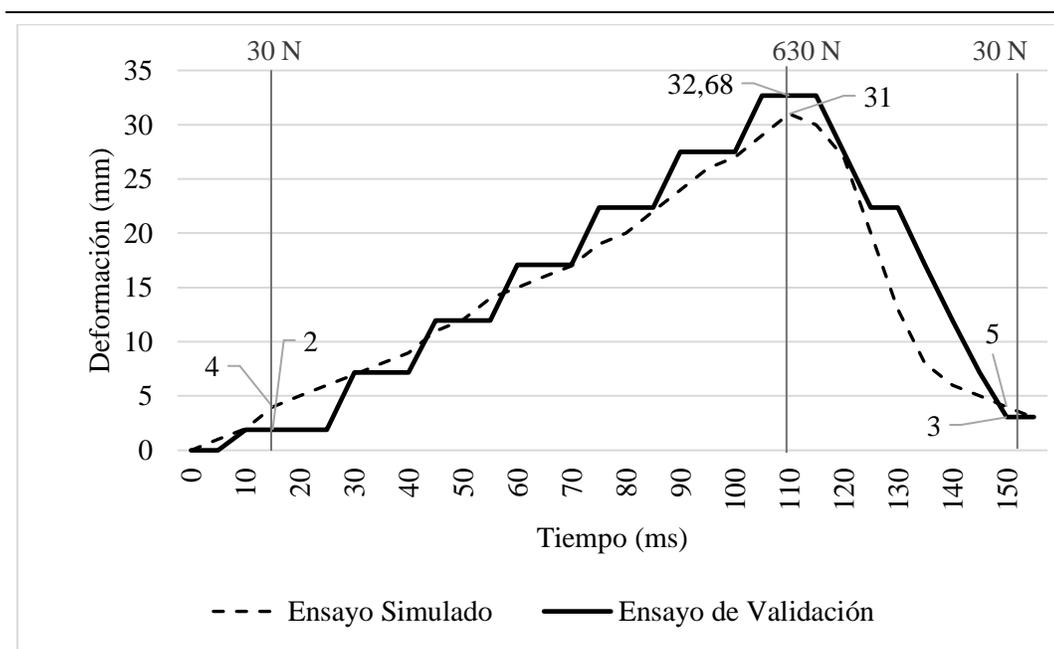
Ensayo de Rigidez	Medidas bajo carga (mm)			Deformación (mm)			Aprueba
	30 N	630 N	30 N	Obtenida	Permitida (INEN)	Error Porcentual (%)	
Real	224	189	208	16	15	0	NO
Simulado	240,12	222,84	228	16			NO

Al igual que en el ensayo de rigidez longitudinal, ninguno de los ensayos aprueba el criterio de rigidez transversal de la norma INEN, ya que ambos superan el umbral de deformación permitido. Si bien las diferencias entre el ensayo real y simulado son del 0%, los resultados confirman que el casco no cumple con los requisitos necesarios para probar el ensayo.

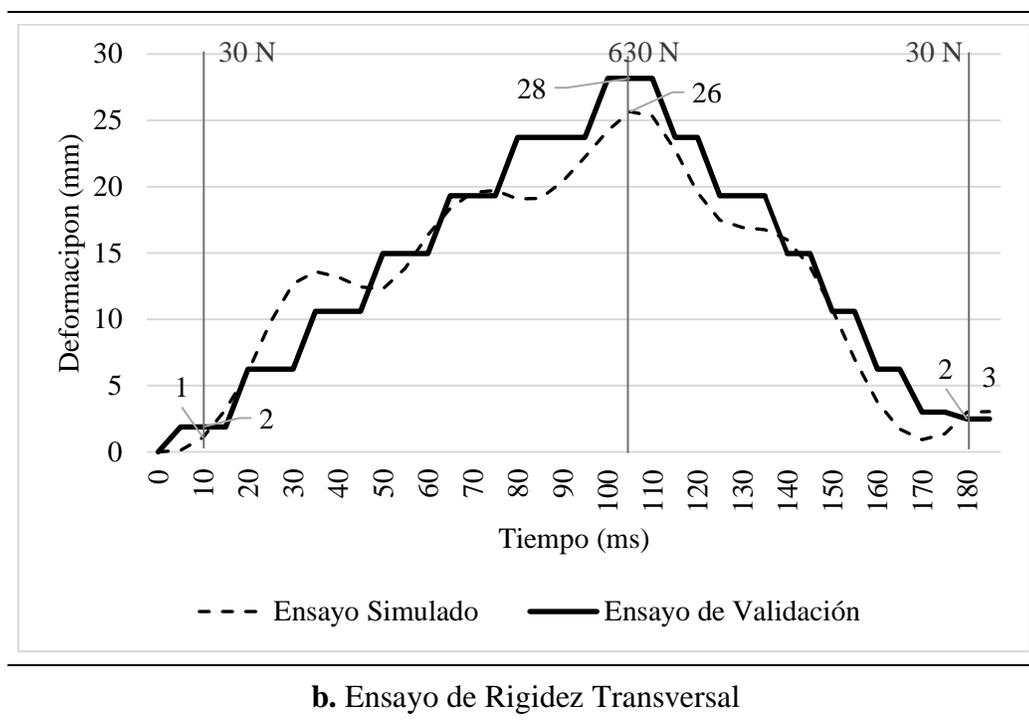
### 3.1.3.2. Validación de ensayos

Con el fin de determinar la veracidad de los resultados obtenidos de la simulación se realizó un ensayo adicional donde se utilizó de referencia un proyecto de diseño de un casco desmontable realizado con una carcasa hecha de fibra de carbono y con una espuma de protección de propileno. Este casco es sometido a un ensayo de rigidez basado en la norma ECE No.22 con los mismo criterios de evaluación que el realizado en esta investigación. La Figura 3.11 presentada compara al ensayo simulado y el ensayo de validación en un casco de fibra de carbono, evaluando la rigidez longitudinal y transversal.

**Figura 3.11.** Deformaciones ensayo simulado vs ensayo de validación



**a. Ensayo de Rigidez Longitudinal**



En la parte superior de la gráfica se observa el ensayo longitudinal. Aquí, tanto el ensayo simulado (línea punteada) como el de validación (línea sólida) sigue una tendencia similar. Ambos inician con una deformación bajo una carga de 30 N, incrementándose hasta alcanzar un pico máximo con una carga de 630 N, para luego descender conforme la carga disminuye nuevamente a 30 N.

En cuanto al ensayo de rigidez longitudinal, tanto el ensayo simulado (línea punteada) como el de validación (línea sólida) siguen una tendencia similar. Se puede notar que en el ensayo simulado la curva es algo más escalonada, alcanzado un valor máximo de 32,68 mm de deformación bajo 630 N. posteriormente, la deformación disminuye de manera más gradual que en el ensayo de validación, quedando en 3,05 mm al final del ensayo. Por otra parte, la curva del ensayo de validación muestra una respuesta más suavizada en el pico máximo, alcanzando 31 mm. Al igual que en el ensayo simulado, la deformación disminuye tras reducir la carga, pero con una recuperación más rápida, estabilizándose en 4 mm al final.

Ahora bien, para el ensayo de rigidez transversal el valor máximo de deformación para el ensayo simulado es de 28 mm, ligeramente superior al del ensayo de validación. La curva simula una

serie de escalones que indican un incremento gradual y segmentado de la deformación. Por otro lado, la curva del ensayo de validación muestra un pico máximo de 26 mm, un valor inferior al del ensayo simulado. Al igual que en el ensayo longitudinal, la deformación disminuye más rápidamente en la validación que en la simulación, alcanzando 2 mm de deformación al final del ensayo. A manera de resumen los resultados se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Deformaciones ensayo simulado vs ensayo de validación

Ensayo de Rigidez		Deformación (mm)					Permitida (INEN)	Error Porcentual (%)	Aprueba
		30 N	630 N	30 N	Total				
<b>Eje Longitudinal</b>	Simulado	2,21	32,7	3,05	0,84	15	4,76	NO	
	Validación	4,32	31,32	5,2	0,88			NO	
<b>Eje Transversal</b>	Simulado	2,32	28,16	3,3	0,98	15	9,26	NO	
	Validación	1,26	26,45	2,34	1,08			NO	

Como se detalla en la tabla anterior la diferencia máxima entre cada medida es de 9,26% en el caso del eje transversal y 4,76% en el eje longitudinal, esta diferencia no es representativa en comparación con las medidas del ensayo simulado, por lo que los resultados obtenidos de la simulación son aceptables. Finalmente se concluye que el método de elementos finitos puede ser viable para realizar este tipo de ensayos.

### 3.2. Ensayo de Absorción de Impacto

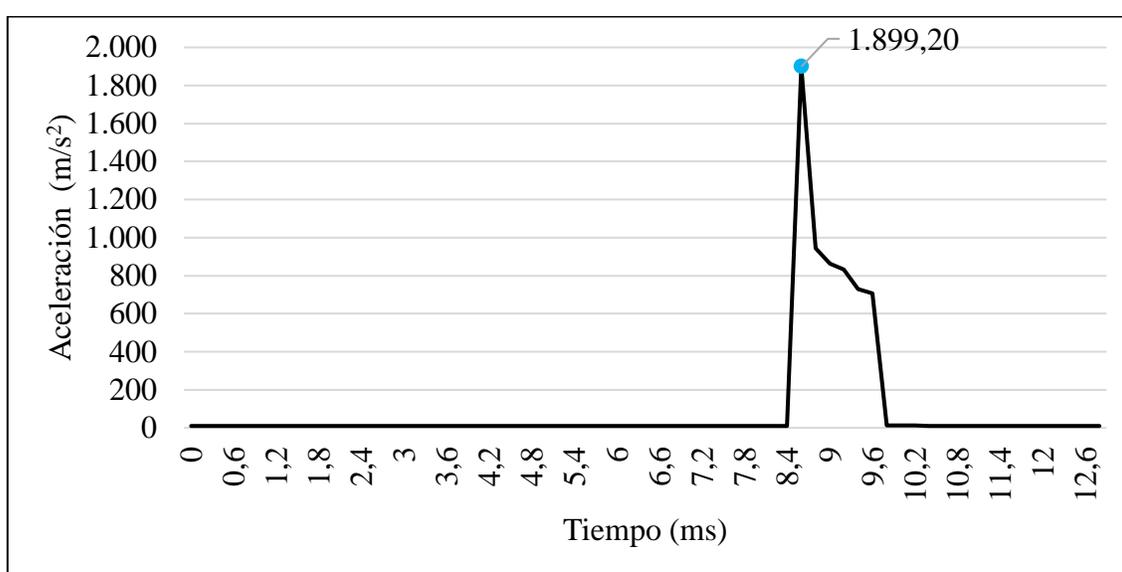
En el caso del ensayo de absorción de impacto, se obtuvo las aceleraciones tanto en el ensayo físico como en la simulación, mediante la que se calcula la fuerza transmitida a la horma. Se debe tomar en cuenta que para el ensayo físico se utilizó una horma la cual se encontraba fijada en la parte inferior a una placa. Por otra parte, en el ensayo simulado se utilizó un Dummy de cuerpo entero, esto influye en la comparación debido a las fuerzas de reacción, sin embargo, no influye de manera significativa en la aceleración máxima que se obtiene en los impactos. Los resultados visuales se observan en el Anexo IV.

### 3.2.1. Ensayos Físicos

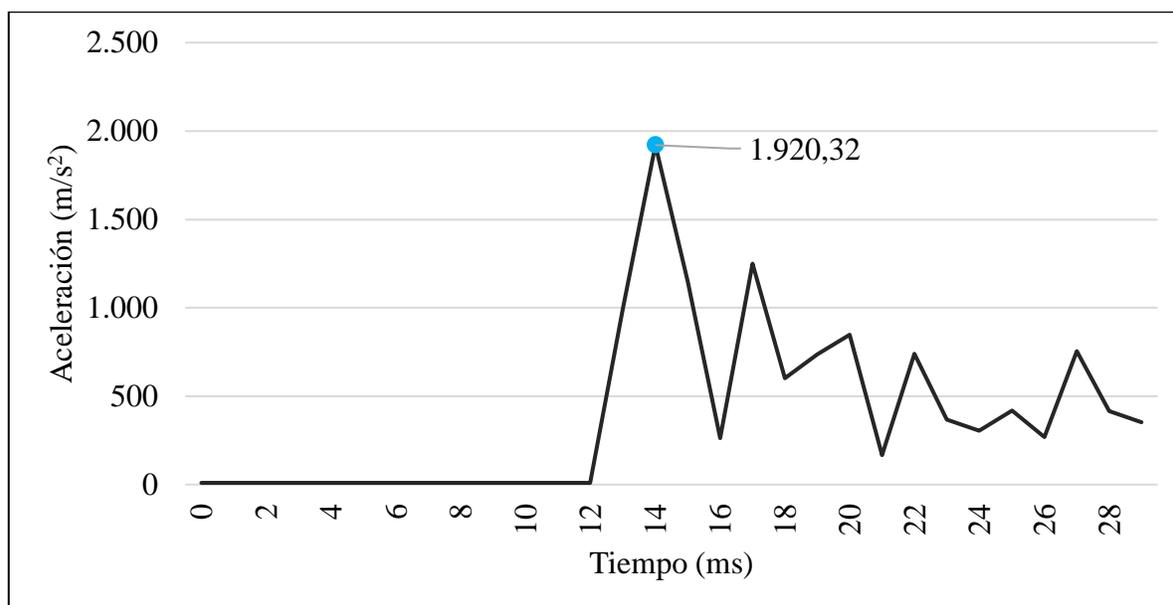
#### 3.2.1.1. Aceleraciones

Primero se obtuvieron las aceleraciones en el centro de la horma registradas en el acelerómetro, se realizó una depuración de los datos, eliminando los datos corruptos donde se obtenían aceleraciones de valor 0, además se limitaron los datos a la zona de interés del impacto, como resultado se obtuvo las siguientes figuras.

**Figura 3.12.** Aceleración en la horma: impacto vertical imp. semiesférico

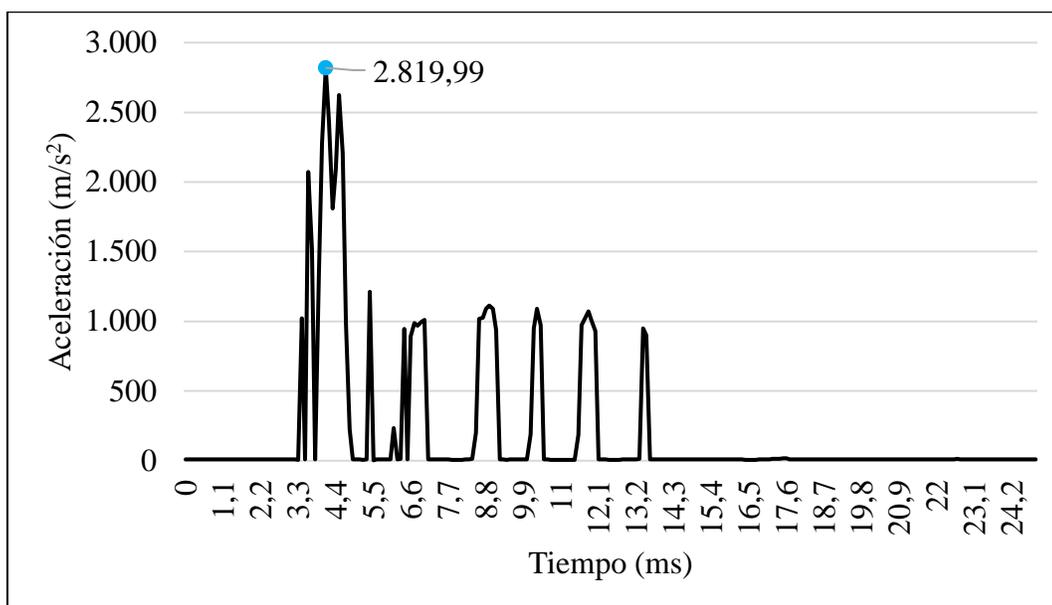


En la Figura 3.12 obtenemos la aceleración del impacto vertical con el impactador semiesférico, podemos observar una aceleración máxima de 1.899,20 m/s<sup>2</sup> a los 44 milisegundos, aceleración que no sobrepasa la permitida por la norma (2.697,95 m/s<sup>2</sup>). Esta aceleración tarda alrededor de 2 milisegundos en llegar a su pico máximo, este hecho sugiere que el material presenta una resistencia inicial antes de ceder al impacto. Posterior a ello, la aceleración desciende rápidamente hasta los 900 m/s<sup>2</sup> donde empieza a caer de forma gradual durante 3 milisegundos. Este comportamiento es típico en pruebas de impacto, donde el material del casco absorbe la energía y el sistema retorna gradualmente al estado de reposo. El proceso completo, desde el inicio del impacto hasta la disipación casi total de la energía, ocurre en un lapso aproximado de 10 milisegundos. Seguido de ello se obtuvo la Figura 3.13 que muestra la aceleración registrada para el segundo impacto con el impactador plano.

**Figura 3.13.** Aceleración en la horma: impacto vertical imp. plano

En el caso del impactador vertical con el impactador plano se obtuvo una aceleración máxima de 1.920,32 m/s<sup>2</sup> aproximadamente a los 14 milisegundos, no sobrepasa lo permitido por la norma (2.697,75 m/s<sup>2</sup>). De igual forma la aceleración tarda en llegar a su pico en 2 milisegundos, lo que sugiere la resistencia inicial del material antes de ceder al impacto. Luego del impacto podemos observar que existe mayor variación en las aceleraciones con picos altos y bajos que van disminuyendo de forma gradual, esto se debe al ruido generado por el impactador plano que tiene mayor contacto en la superficie del casco. El tiempo desde el impacto hasta que se disipa la energía es de 17 milisegundos. Lo que sugiere que el casco absorbe la energía de forma más controlada, debido nuevamente a la geometría del impactador y la superficie de contacto.

Finalmente, se realizó el ensayo de absorción de impacto en el área lateral del casco, la curva de la aceleración se muestra en la Figura 3.14.

**Figura 3.14.** Aceleración en la horma: impacto lateral imp. plano

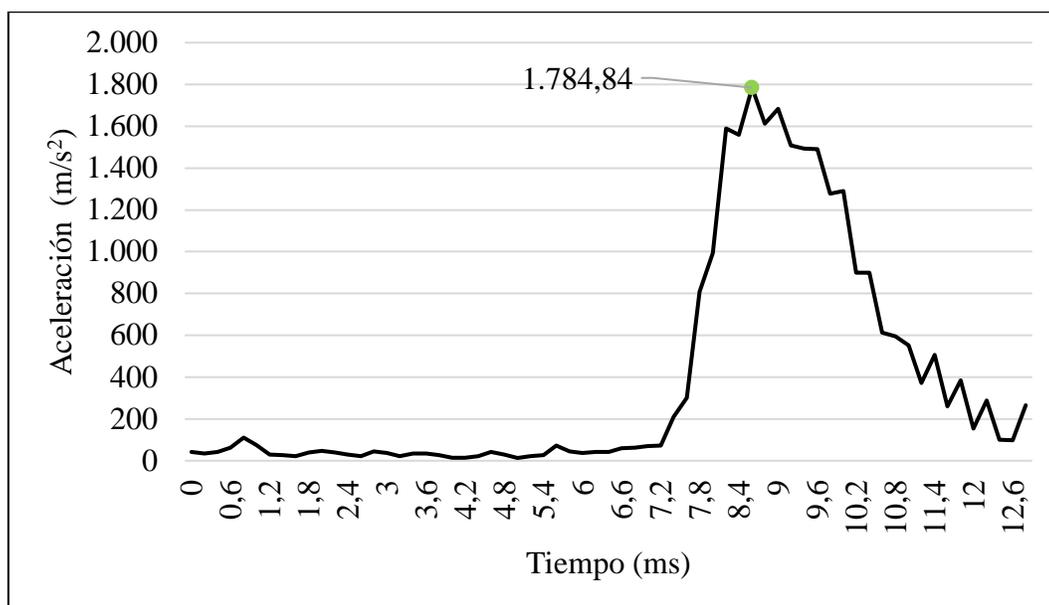
Para este ensayo se obtuvo un valor máximo de  $2.819,99 \text{ m/s}^2$  a los 40 milisegundos, valor que excede lo permitido por la norma ( $2.697,75 \text{ m/s}^2$ ) lo que sugiere que el casco no absorbe la energía adecuadamente, además se observa fluctuaciones antes de llegar a su pico máximo, estas aceleraciones se deben a que la horma no se encontraba fijada completamente por lo que genera estos picos antes de la aceleración máxima, los picos que ocurren luego del impacto que rondan los  $1.000 \text{ m/s}^2$  están relacionados de igual manera a este evento debido a una mayor libertad de movimiento por parte de la horma y a la forma del impactador y la superficie de impacto. Cabe destacar que el casco en esta área tiene un menor espesor de la EPS, además sufrió roturas luego del impacto y tiene elementos de sujeción del visor, los cuales pueden influir en la aceleración que se transmite a la horma y en la forma en como absorbe el impacto.

### 3.2.2. Ensayos Simulados

#### 3.2.2.1. Aceleraciones

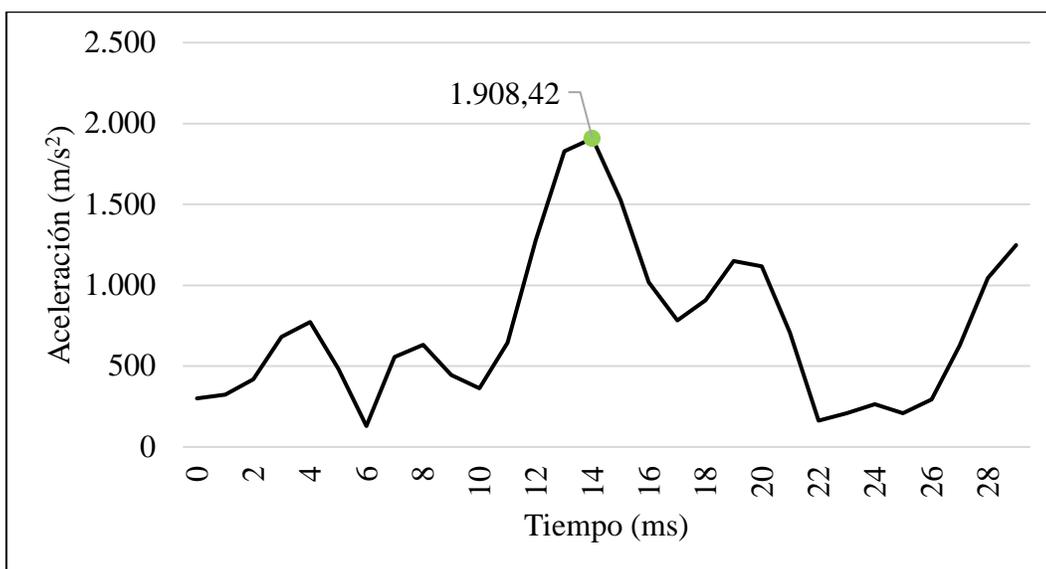
Siguiendo la metodología establecida previamente para el método FEM se obtienen las aceleraciones resultantes para los ensayos simulados, las curvas se muestran en las siguientes figuras.

**Figura 3.15.** Aceleración en la horma del Dummy: impacto vertical imp. semiesférico



En la Figura 3.15 podemos observar una aceleración máxima de 1.784,84 m/s<sup>2</sup> a los 43 milisegundos. Esta aceleración se ubica por debajo de lo permitido de la norma (2.697,75), esta grafica muestra una duración del impacto de 12 milisegundos lo que sugiere que el impacto se prolonga y absorbe la energía de manera más eficiente. Luego del impacto se observan fluctuaciones propias de las fuerzas de reacción, ya que al ocupar un Dummy de cuerpo completo se tienen reacción de otros elementos del cuerpo como los hombros y el cuello. Sin embargo, estas oscilaciones no son un factor crítico para nuestra investigación que tiene mayor interés en la aceleración máxima registrada. Seguido a ello se obtuvo la aceleración con el segundo impactador, la curva se muestra en la Figura 3.16.

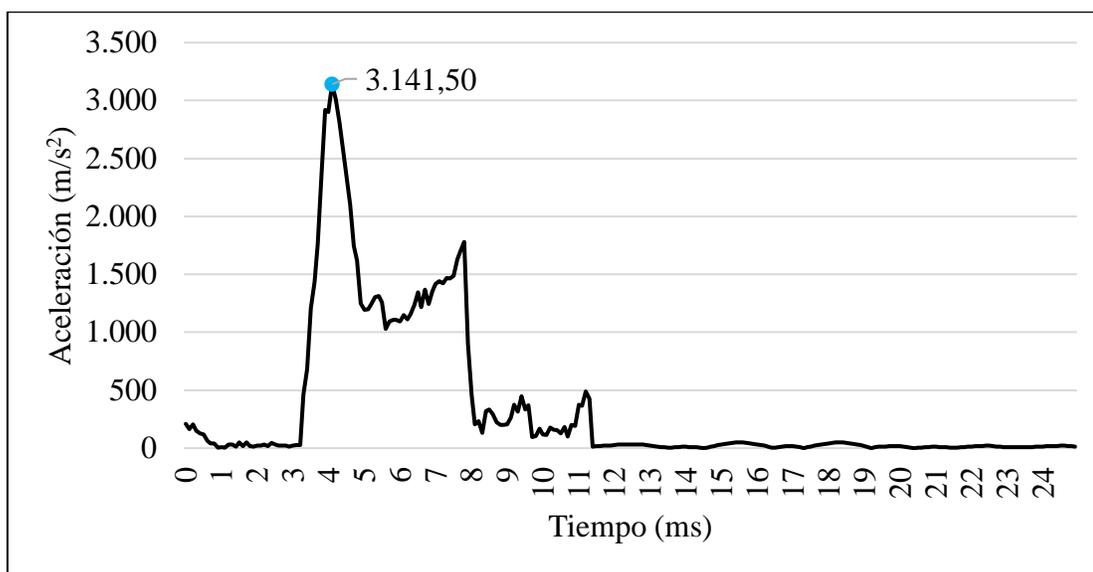
**Figura 3.16.** Aceleración en la horma del Dummy: impacto vertical imp. plano



En el impacto vertical con el punzón plano se obtiene una aceleración máxima de  $1.908,42 \text{ m/s}^2$ , esta aceleración se encuentra por debajo de la aceleración permitida ( $2.697,75 \text{ m/s}^2$ ). Esta aceleración es mayor que la obtenida en el primer impacto al tener una mayor superficie de contacto por lo que se distribuye la energía de mejor manera alrededor del casco, y debido a ello se generan oscilaciones que pueden deberse a ondas de choque que viajan a través de la estructura del casco, o a la interacción entre el material del casco y el Dummy. Si bien es cierto estas aceleraciones se mantienen por debajo del máximo permitido pueden ocasionar eventos no deseados debido a que el casco no disipa rápidamente la energía y llevando a impactos de menor intensidad, pero de manera reiterada.

Finalmente, se adquirió la curva de aceleración para el impacto lateral, esta curva se muestra en la Figura 3.17.

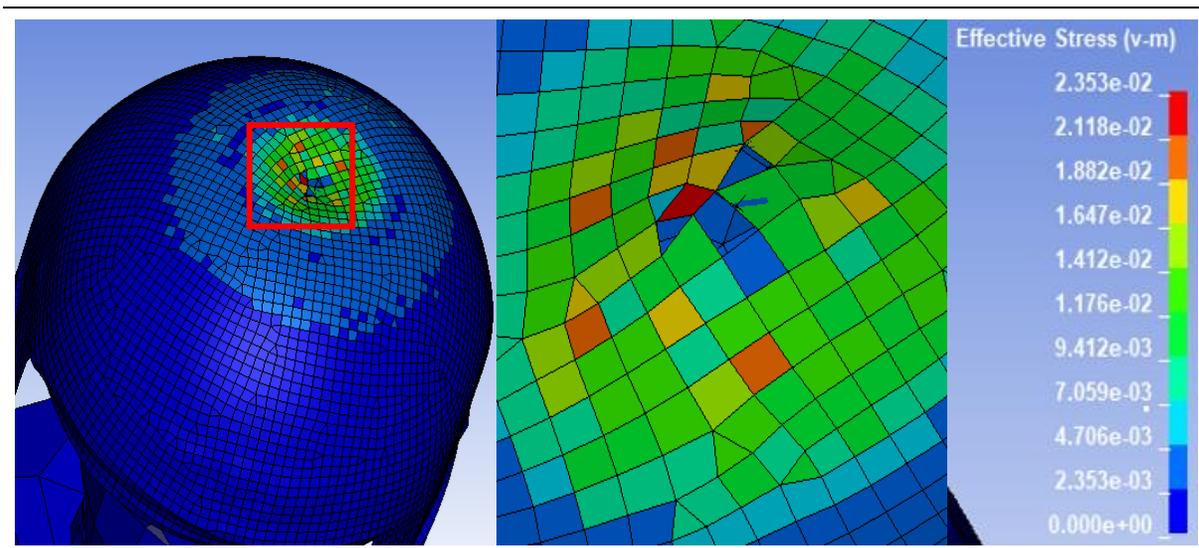
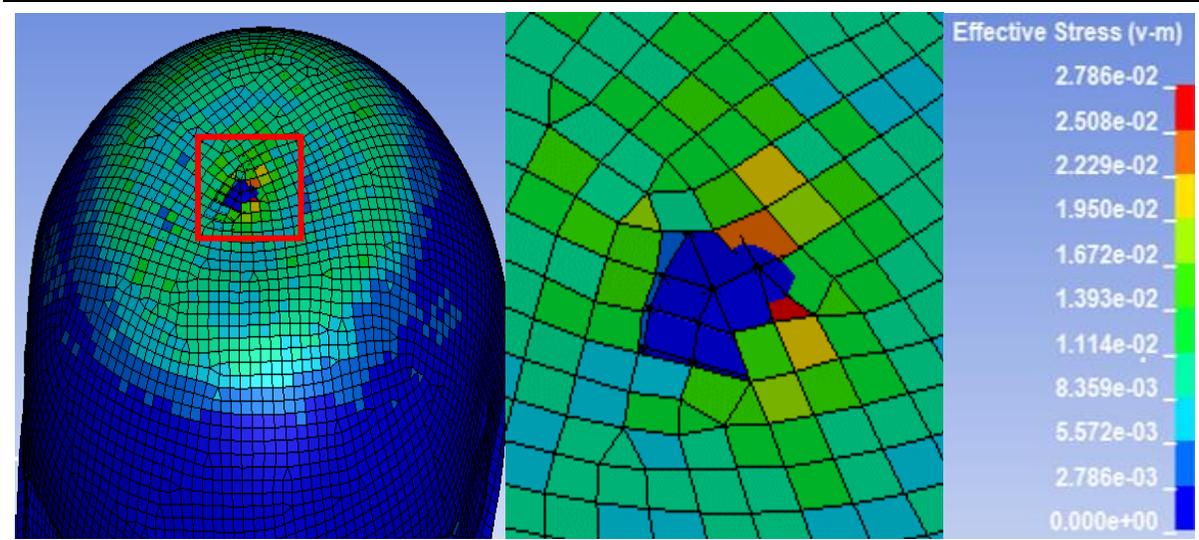
**Figura 3.17.** Aceleración en la horma del Dummy: impacto lateral imp. plano

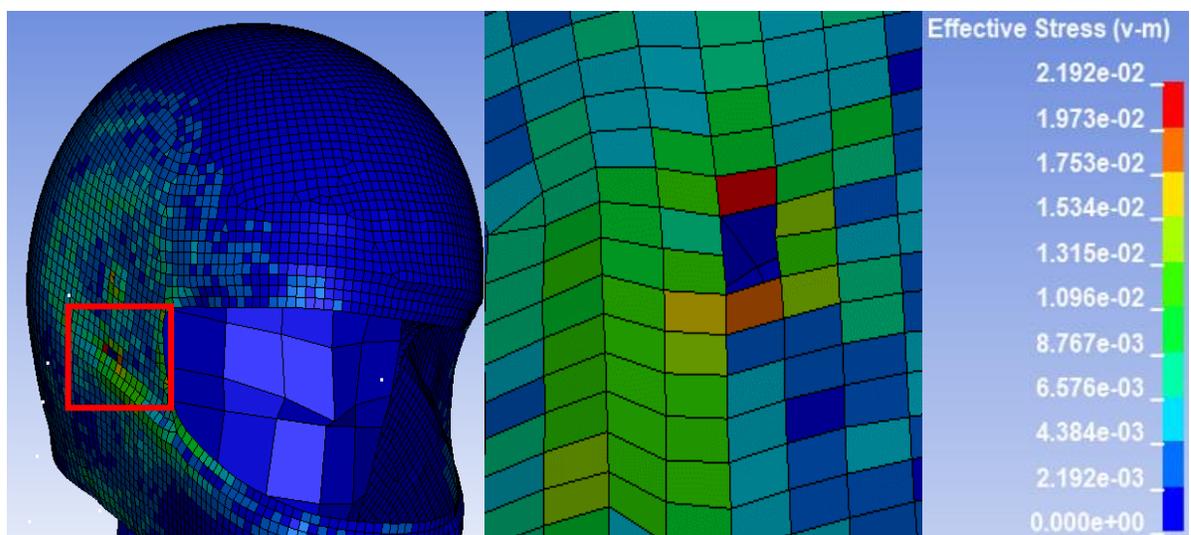


En el impacto lateral se obtiene una aceleración máxima de  $3.141,50 \text{ m/s}^2$  a los 44 milisegundos, esta aceleración se encuentra por encima de la aceleración permitida ( $2.697,75 \text{ m/s}^2$ ). Este dato sugiere que el casco no absorbe adecuadamente el impacto en esta área, esto se encuentra relacionado directamente al menor espesor de la espuma de protección en esta área, además al diseño del casco y la posición del visor por lo que genera un área que tiende a fallar. Tenemos dos eventos luego del impacto, el primero donde la aceleración desciende de manera brusca a  $1.250 \text{ m/s}^2$  para luego volver a tener un pico de  $1.700 \text{ m/s}^2$  y finalmente descender a valores alrededor de los  $500 \text{ m/s}^2$ . Este comportamiento se debe a que para este ensayo la horma no tenía una limitante al otro lado del impacto y se mueve con mayor libertad generando este comportamiento en la aceleración debido a que la cabeza del Dummy tiende a volver a su estado de reposo generando los picos antes descritos.

### 3.2.2.2. Tensión de Von Misses

Además de las curvas de aceleración, se obtuvieron los mapas de calor de Von Misses. Esto con la finalidad de permitir un análisis más detallado al comportamiento de los cascos durante el impacto. Los mapas de calor se muestran en la Figura 3.18.

**Figura 3.18.** Tensiones de Von Mises ensayo de absorción de impacto**a.** Impacto Vertical Imp. Semiesférico**b.** Impacto Vertical Imp. Plano

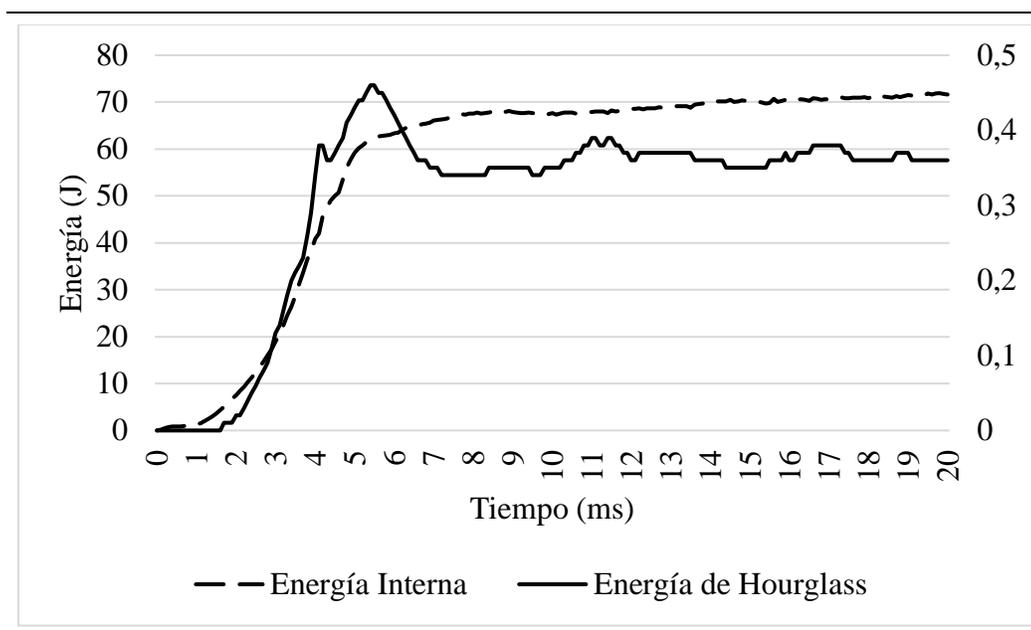
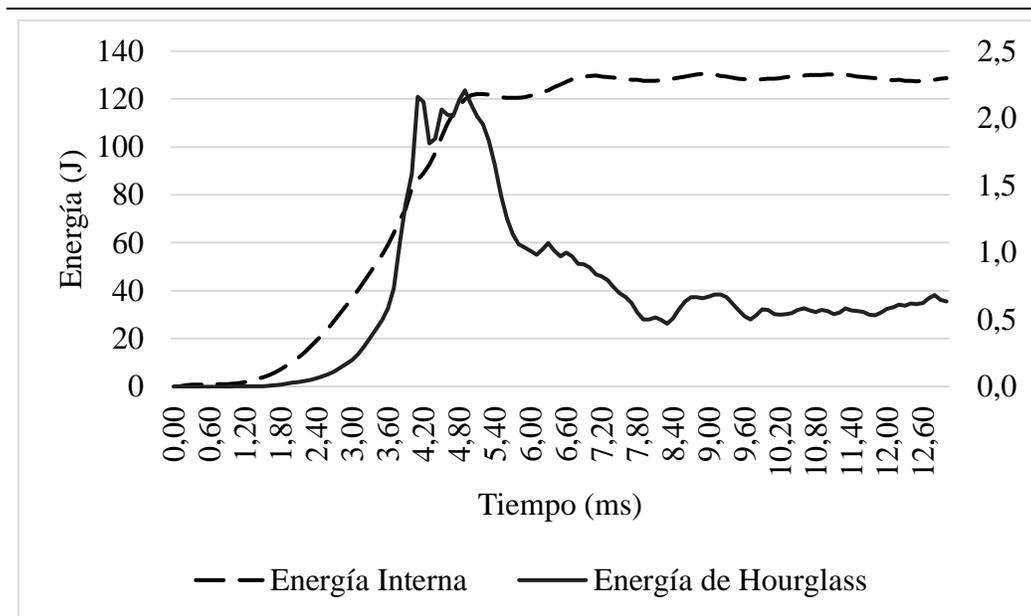


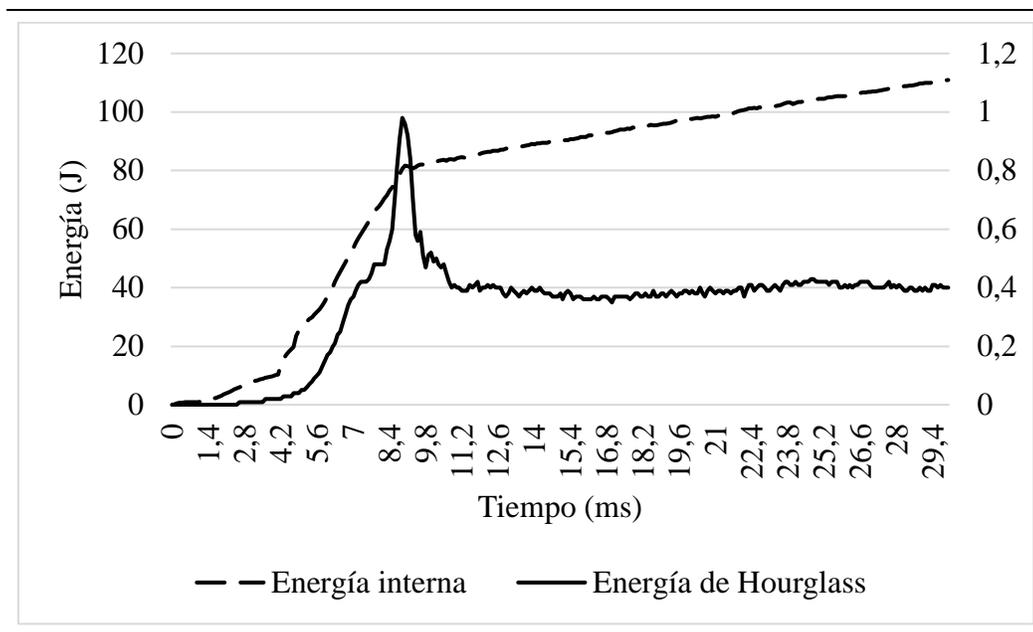
c. Impacto Lateral Imp. Plano

La tensión de Von Mises alcanza sus máximos valores en las zonas próximas al punto de impacto, con 23,53 MPa para el impacto vertical con impactador semiesférico, 27,86 MPa para el impacto vertical plano y 21,92 MPa en el impacto lateral. Estos valores son inferiores al límite elástico del material, lo que indica que, aunque ha habido deformación, no se ha producido fallo estructural significativo. Sin embargo, en la simulación, algunos elementos de la malla cercanos al impacto son eliminados automáticamente por el software al exceder su límite plástico, simulando la rotura del material. Este fenómeno, donde los elementos son eliminados, no se observa en los ensayos físicos, ya que en la realidad la masa del material se conserva.

### 3.2.2.3. Energía de Hourglass

Finalmente, En la Figura 3.19 se muestran las curvas de la energía interna y la energía de Hourglass. Esto permitió verificar que la simulación se haya ejecutado de manera adecuada.

**Figura 3.19.** Energía de Hourglass ensayo de absorción de impacto**a. Impacto Vertical Semiesférico****b. Impacto Vertical Plano**



c. Impacto Lateral

En el primer ensayo se tiene una energía interna que llega hasta los 70 J, mientras que la energía de Hourglass no supera los 0,5 J representando el 0,71%. En el segundo ensayo se tiene una energía interna máxima de 130 J mientras que la energía de Hourglass se mantiene por debajo de los 2 J representando el 1,5%. Finalmente, en el último ensayo la energía interna llega hasta los 120 J y la energía de Hourglass no supera 1 J lo cual representa el 0,83%. Si bien es cierto se observan ciertos picos en la energía de Hourglass que son causados en el momento del impacto, no son relevantes debido a que no superan el 10% y se estabilizan en poco tiempo. Por lo expresado, podemos decir que la simulación se ha ejecutado sin incurrir en errores.

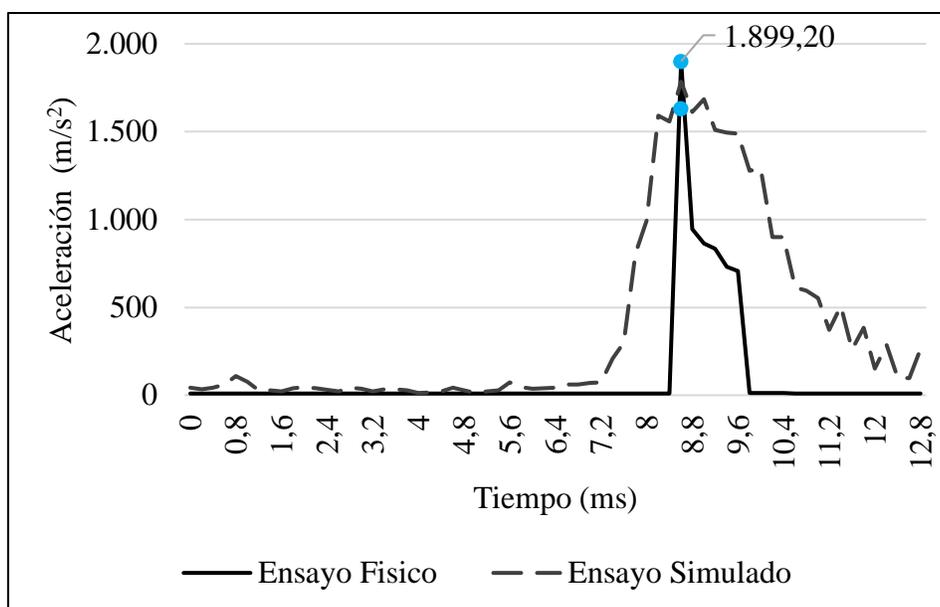
### 3.2.3. Análisis Comparativo y Discusión

#### 3.2.3.1. Ensayos Físicos vs Simulados

##### *Ensayo de Absorción de Impacto Vertical Imp. Semiesférico.*

La Figura 3.20 muestra que la aceleración máxima en el ensayo físico es de 1.784,84 m/s<sup>2</sup>, mientras que en la simulación alcanza 1.899,20 m/s<sup>2</sup>, lo que representa una diferencia porcentual del 6,45%. Después del impacto, la aceleración disminuye de forma más gradual en el ensayo físico, mientras que en la simulación cae abruptamente y muestra oscilaciones menores, lo que sugiere diferencias en la absorción de energía y los factores de amortiguamiento entre ambas pruebas.

**Figura 3.20.** Curva de aceleración: impacto vertical imp. semiesférico

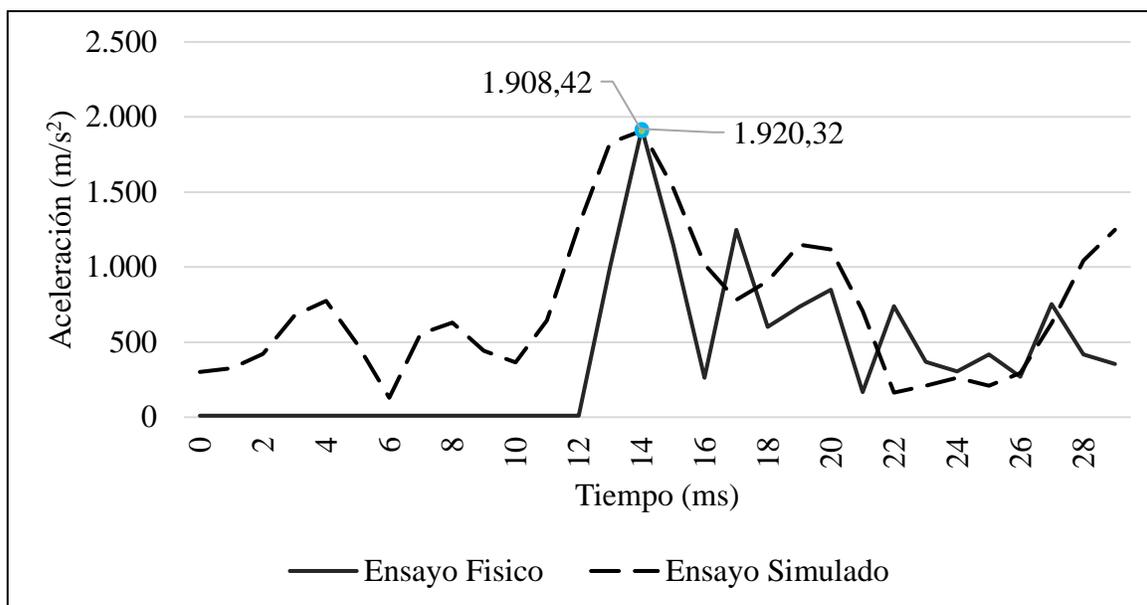


Estas discrepancias reflejan las limitaciones de la simulación, que tiende a idealizar las condiciones de impacto y a simplificar la dinámica no lineal del material, aunque sus valores máximos cercanos validan su utilidad para predecir el comportamiento bajo impacto.

### *Ensayo de Absorción de Impacto Vertical Imp. Plano*

Los resultados del ensayo se muestran en la Figura 3.21 tanto del ensayo físico (línea continua) como del ensayo simulado (línea discontinua).

**Figura 3.21.** Curva de aceleración: impacto vertical imp. plano

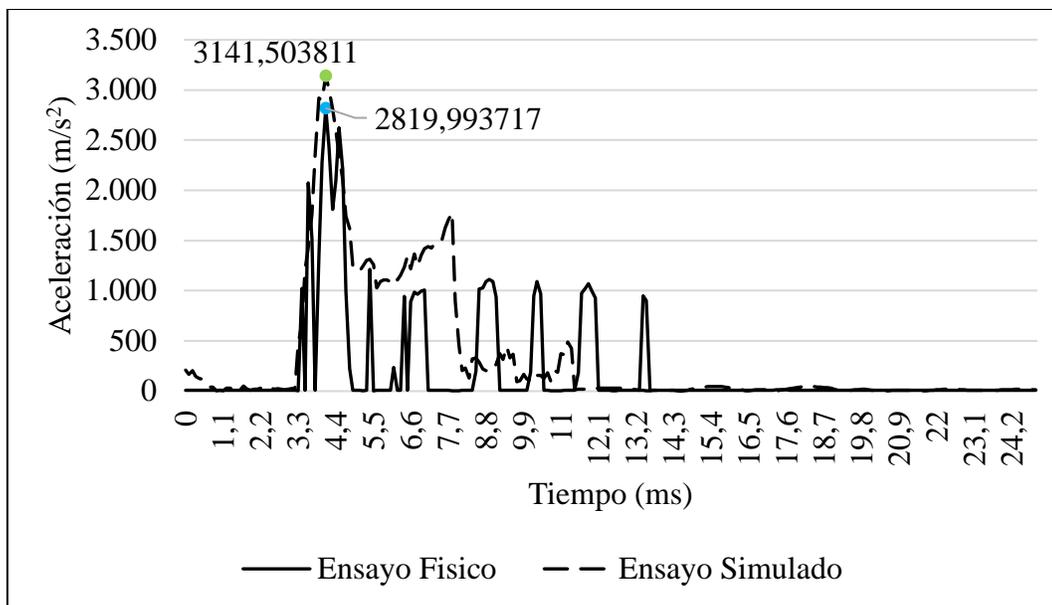


La aceleración máxima en el ensayo simulado es de 1.920,32 m/s<sup>2</sup>, mientras que en el ensayo físico alcanza un valor ligeramente inferior de 1.908,42 m/s<sup>2</sup>, con una diferencia porcentual de 0,62%, lo que refleja una buena correlación entre ambos métodos. Después del impacto, ambos ensayos presentan fluctuaciones en la aceleración, aunque el ensayo físico muestra una mayor variabilidad en los valores a lo largo del tiempo, lo que sugiere un comportamiento más dinámico y complejo del casco durante la prueba real. En cambio, el ensayo simulado presenta un comportamiento más amortiguado, con oscilaciones más contenidas. Lo que puede deberse a simplificaciones en el modelo de material o en las condiciones de contorno aplicadas.

### *Ensayo de Absorción de Impacto Lateral Imp. Plano*

La Figura 3.22 muestra la comparativa entre las curvas de aceleraciones que experimenta la horma tanto en el ensayo físico como el simulado durante el ensayo de impacto lateral con el impactador plano.

**Figura 3.22.** Curva de aceleración: impacto lateral imp. plano



El ensayo físico muestra una aceleración máxima de 3.141,50 m/s<sup>2</sup>, mientras que en el ensayo simulado el pico es de 2.819,99 m/s<sup>2</sup>, lo que refleja una diferencia del 10,24% entre ambos valores. El pico en el ensayo físico se alcanza en 36 ms, mientras que en la simulación ocurre ligeramente antes, en 45 ms, lo que indica un desfase temporal más pronunciado en comparación con los ensayos previos. Luego del impacto, se presentan oscilaciones las cuales se deben a que tanto en el ensayo físico como en el simulado la horma no se encontraba completamente fijada, lo que le otorga mayor libertad de movimiento y genera fuerzas de reacción luego de que el impacto haya terminado. En la Tabla 3.4 se presenta la comparativa a manera de resumen junto con los valores permitidos y definir si el casco aprueba o no.

**Tabla 3.4.** Aceleraciones en la horma: Ensayo Físico vs Simulado

Ensayo	Aceleración máxima ensayo físico (m/s <sup>2</sup> )	Aceleración máxima ensayo simulado (m/s <sup>2</sup> )	Valor permitido (INEN) (m/s <sup>2</sup> )	Error (%)	Aprueba
<b>Impacto Vertical Semiesférico</b>	1.899,20	1.784,84		6,02	SI
<b>Impacto Vertical Plano</b>	1.920,32	1.908,42	2.697,75	0,62	SI
<b>Impacto Lateral</b>	2.819,99	3.141,50		11,4	NO

De igual forma establecemos la Tabla 3.5 con las fuerzas calculadas mediante la ecuación. Los resultados obtenidos se comparan directamente con el umbral de la normativa para determinar si el casco aprobado mantiene la integridad estructural bajo condiciones de impacto. Este análisis es crucial, ya que una transmisión de fuerza por encima del límite podría generar lesiones graves en el usuario, mientras que una fuerza inferior garantiza que el casco disipa adecuadamente la energía del impacto sin comprometer la seguridad del usuario.

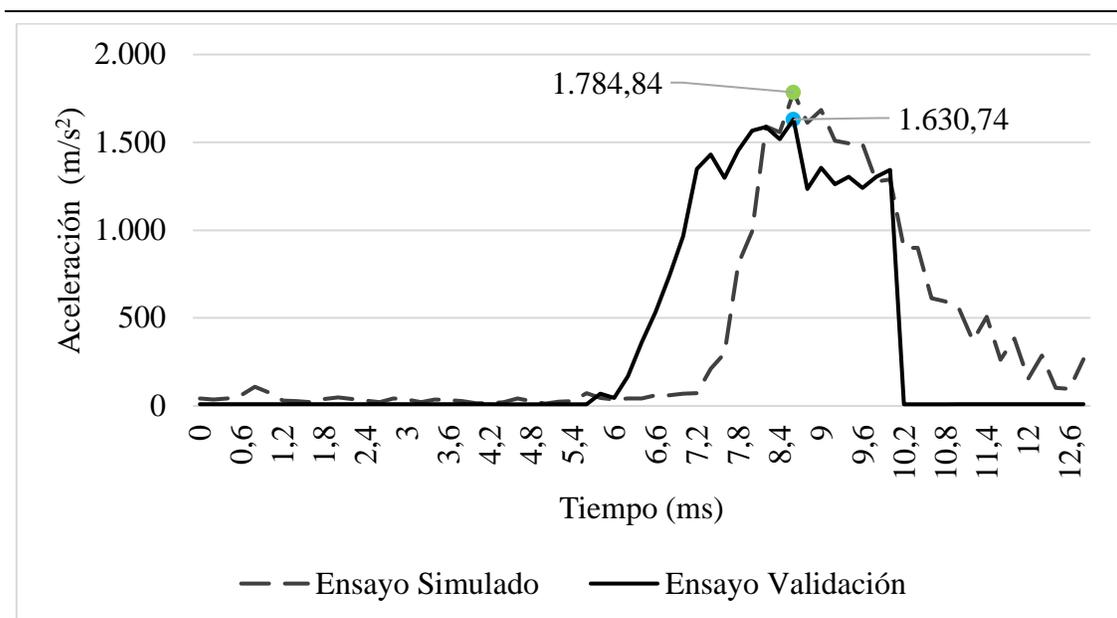
**Tabla 3.5.** Fuerzas en la horma: Ensayo Físico vs Simulado

Ensayo	Fuerza Máxima Ensayo Físico (kN)	Fuerza Máxima Ensayo Simulado (kN)	Valor permitido (INEN) (kN)	Error (%)	Aprueba
<b>Impacto Vertical Semiesférico</b>	9,50	8,92		6,02	SI
<b>Impacto Vertical Plano</b>	9,60	9,54	15,00	0,62	SI
<b>Impacto Lateral</b>	14,10	15,71		11,4	NO

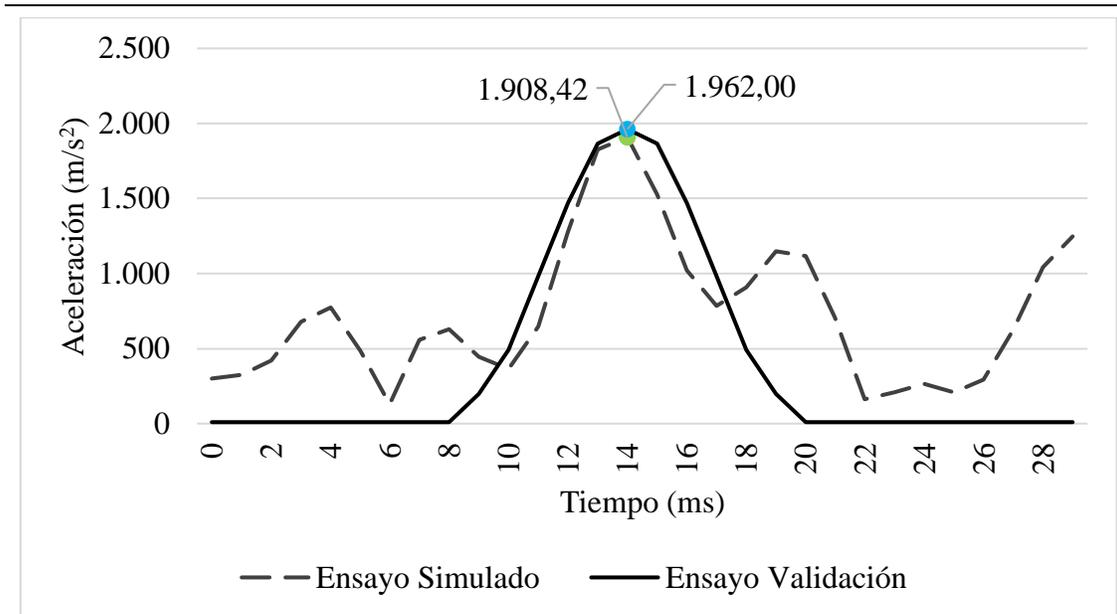
### 3.2.3.2. Validación de Ensayos

Con el fin de validar los ensayos se obtuvo las curvas de la Figura 3.23 donde se resume las aceleraciones obtenidas para los ensayos simulados y de validación.

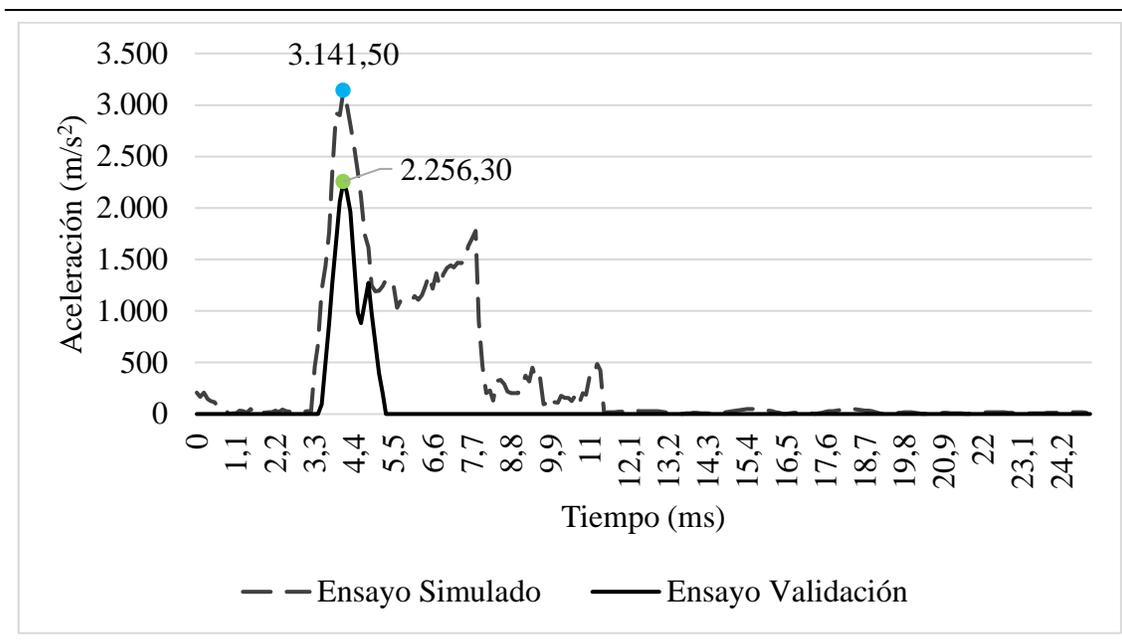
**Figura 3.23.** Aceleraciones Obtenidas en los impactos



**a. Impacto Vertical Imp. Semiesférico**



**b. Impacto Imp. Vertical Plano**



c. Impacto Lateral Imp. Plano

Los resultados de validación se obtuvieron de [52]; [53] y de [54] respectivamente. Con el análisis de las gráficas bibliográficas y nuestras graficas simuladas podemos decir que sugieren que el modelo FEM ofrece una representación adecuada del comportamiento del casco bajo estas condiciones de impacto.

Además, analizando el comportamiento de las curvas podemos evidenciar que existen diferencias en cuanto a el “ruido” en los 3 tipos de ensayo, esto se debe principalmente a que el ensayo físico al utilizar una horma que se encuentra fijada a una placa tiene un comportamiento estático en comparación al Dummy ya que este reacciona en conjunto a todo el cuerpo por lo que las fuerzas de reacción ocasionan picos luego del impacto, desde luego este factor no afecta directamente al interés de esta investigación que es la aceleración y fuerza máxima transmitida a la horma ya que estos picos son más bajos que la aceleración máxima registrada. En la Tabla 3.6 se evidencia los errores registrados. Además de las curvas se presentan unas tablas resumen de los datos obtenidos.

**Tabla 3.6.** Aceleración transmitida a la horma

<b>Ensayo</b>	<b>Aceleración Máxima Ensayo Validación (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Aceleración Máxima Ensayo Simulado (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Valor permitido (INEN) (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Error (%)</b>	<b>Aprueba</b>
<b>Impacto Vertical Semiesférico</b>	1.630,74	1.784,84		9,45	SI
<b>Impacto Vertical Plano</b>	1.962,00	1.908,42	2.697,75	2,73	SI
<b>Impacto Lateral</b>	2.256,30	3.141,50		39,23	NO

En la Tabla 3.7 se calcula fuerza que se transmite a la horma, mediante la ecuación Los valores obtenidos permiten evaluar si el casco cumple con los requisitos de absorción de impacto establecidos en la normativa NTE INEN 2669:2013, que regula los límites de fuerza máxima que un casco debe transmitir a la cabeza simulada. La normativa establece que la fuerza transmitida no debe superar los 15 kN para garantizar una adecuada protección en caso de accidente

**Tabla 3.7.** Fuerza en el centro de la horma

<b>Ensayo</b>	<b>Fuerza máxima ensayo físico (kN)</b>	<b>Fuerza máxima ensayo simulado (kN)</b>	<b>Valor permitido (INEN) (kN)</b>	<b>Error (%)</b>	<b>Aprueba</b>
<b>Impacto Vertical Semiesférico</b>	8,15	8,92		9,45	SI
<b>Impacto Vertical Plano</b>	9,81	9,54	15,00	2,73	SI
<b>Impacto Lateral</b>	11,28	15,71		39,23	NO

Una diferencia destacable se encuentra en el impacto lateral, donde se observan mayores variaciones en la comparativa. Esto se debe, en gran parte, a la mayor libertad de movimiento de la horma simulada, que no reproduce las características físicas de la horma real. Este factor introduce comportamientos no previstos, generando mayores discrepancias entre los ensayos adicionales, el punto de impacto puede verse alterado por los componentes de sujeción del visor en los laterales del casco, elementos que no fueron considerados en la simulación, sin embargo, las curvas resultantes. muestra un comportamiento similar en las gráficas, y la ausencia de una elevada energía de Hourglass sugieren la validez del ensayo con una limitación en cuanto a este tipo de impacto.

## CAPÍTULO IV

### 4. Conclusiones y Recomendaciones

#### 4.1. Conclusiones

- A partir del análisis técnico de la normativa nacional (NTE INEN 2669:2013) y de las normativas internacionales (DOT y ECE), se optó por la norma INEN, ya que está alineada con los estándares internacionales mencionados y es la que se aplica actualmente en el ámbito local. Se estableció que esta normativa y los ensayos asociados son efectivos para velocidades en carretera de hasta 30 km/h. Sin embargo, cuando se excede esta velocidad, se compromete la protección de otras partes del cuerpo y aumenta el riesgo de lesiones cerebrales graves, lo que pone en evidencia las limitaciones de la normativa en escenarios de mayor velocidad.
- El equipo utilizado para el ensayo de rigidez permitió someter el casco a una carga máxima de 630 N en los ejes longitudinal y transversal, según lo estipulado en la normativa nacional. La carga se aplicó de manera manual mediante una prensa hidráulica. En cuanto al ensayo de absorción de impacto, se diseñó una estructura de 3 metros de altura equipada con un sistema de guías y liberación, lo que permitió que el impactador cayera libremente sobre el casco, alcanzando la velocidad especificada por la normativa correspondiente. Por lo tanto, los equipos diseñados hicieron posible evaluar los cascos bajo los requisitos mínimos establecidos en la norma INEN.
- Dentro del análisis de elementos finitos se utilizó en el casco un mallado tipo Shell para los impactadores y la carcasa, mientras que para la espuma de protección se empleó un mallado de tipo sólido. En el ensayo de rigidez, se ingresó la curva de carga especificada por la norma INEN, lo que permitió evaluar la deformación del casco bajo condiciones de carga controlada. En el ensayo de absorción de impacto, el Dummy equipado con un acelerómetro integrado facilitó la recolección de datos en el centro de la horma. Además, se definió la velocidad de los impactadores y los puntos de impacto, tomando como referencia el casco real mediante escaneo y modelado 3D. El modelo también incorporó la curva de comportamiento del material del casco

evaluado (90% resina poliéster; 10% fibra de vidrio), lo que hizo posible analizar su respuesta estructural bajo las condiciones de prueba.

- Con la finalidad de validar el método de ensayo se realizó comparaciones entre el ensayo físico y simulado donde se obtuvo para el ensayo de rigidez un error de 8,57% en el eje longitudinal y un error de 0% en el eje transversal respecto a la deformación final bajo las mismas condiciones de carga. Por otro lado, en el ensayo de absorción de impacto se obtuvieron errores de 6,02% en el primer impacto vertical, 0,62% en el segundo impacto vertical y de 11,4% en el impacto lateral. Se determinó que con desviaciones menores al 20% es viable la homologación de cascos bajo el método FEM.
- Aun cuando el método FEM es viable, los datos obtenidos en este estudio sugieren que los cascos de gama baja analizados no cumplen con los requisitos de rigidez transversal ni longitudinal de deformación máxima de 15 mm, así como no cumple con la absorción de impacto en la zona lateral con una aceleración de hasta 275 G ( $2.697,75 \text{ m/s}^2$ ) en el centro de la horma.

## 4.2. Recomendaciones

- Se recomienda incorporar pruebas de rigidez a cargas mayores a los 630 N y velocidades superiores a los 7 m/s en absorción de impacto en la normativa NTE INEN 2669:2013. Implementar estas condiciones garantizaría una protección más efectiva para los usuarios en carreteras y reducir los riesgos en velocidades superiores a los 30 km/h, reduciendo así la probabilidad de lesiones graves, especialmente las cerebrales, que se ven comprometidas en situaciones de impacto severo.
- Desarrollar con precisión un modelo exacto de la anatomía de la cabeza humana es demasiado complejo, lo que dificulta obtener resultados confiables y reproducibles. Por esta razón, es necesario realizar mayor investigación para definir hasta qué punto el modelo debe asemejarse a la realidad biológica.
- Emplear equipos no homologados puede influir en los resultados obtenidos, comprometiendo la precisión de los datos. Por ello, es recomendable utilizar equipos debidamente certificados para realizar las pruebas, con el objetivo de obtener mediciones más confiables y comparables. Esto aseguraría la validez de los resultados y permitiría evaluar mejor el comportamiento del casco en condiciones de ensayo estandarizadas.
- Ampliar la investigación a una mayor variedad de modelos de cascos, incluyendo aquellos de gama media y alta, así como diferentes tipologías como cascos abiertos, semiabiertos y abatibles. Esto permitiría evaluar la viabilidad y aplicabilidad del método FEM en un espectro más amplio de diseños y materiales, obteniendo datos comparativos para mejorar la precisión del modelo.
- Se recomienda realizar un estudio de caracterización detallada de los materiales utilizados en la fabricación de los cascos para obtener curvas de comportamiento más precisas y realistas. Lo que facilitará la identificación de posibles limitaciones en los materiales actuales y su influencia en la seguridad del usuario.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AEADE, “Anuario 2022,” *Anuario 2022*, vol. 1, no. Ventas anuales por tipo de motos en unidades 2013-2022, p. 103, 2022.
- [2] Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador, “Visor de Siniestrabilidad Nacional,” 2022. [Online]. Available: <https://www.ant.gob.ec/visor-de-siniestrabilidad-estadisticas/>
- [3] INEN, “RTE-086-1R,” 2015, Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: [www.normalizacion.gob.ec](http://www.normalizacion.gob.ec)
- [4] S. Ortiz, “EL COMERCIO,” 2016, *Quito*. [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/seguridad/transito-casco-motociclista-seguro-accidente.html>
- [5] Asamblea Nacional, *LOTTTSV. SECCIÓN 1 DE LOS DOCUMENTOS HABILITANTES DEL VEHÍCULO*, 2021, p. 54. [Online]. Available: [http://esacc.corteconstitucional.gob.ec/storage/api/v1/10\\_DWL\\_FL/eyJjYXJwZXRhIjoiYm8iLCJ1dWlkIjoiMjAzM2FiNjMtNTIzNC00NGY4LThjNDEtZTAzYzZjMzRlMzhjLnBkZiJ9](http://esacc.corteconstitucional.gob.ec/storage/api/v1/10_DWL_FL/eyJjYXJwZXRhIjoiYm8iLCJ1dWlkIjoiMjAzM2FiNjMtNTIzNC00NGY4LThjNDEtZTAzYzZjMzRlMzhjLnBkZiJ9)
- [6] G. Cobo, “Comunidad motera Sitio oficial de motociclismo en Ecuador,” *HOMOLOGACIÓN*, vital a la hora de comprar un casco. Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.motociclismo.ec/post/homologación#:~:text=El Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización %28INEN%29 es,ejercicios controlados para medición de resistencia y calidad>
- [7] N. Lema and D. Morocho, “Análisis de los cascos para motociclistas mediante ensayos destructivos para la verificación del cumplimiento de la homologación que se comercializan en la ciudad de Cuenca,” 2020, Accessed: May 28, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19354>
- [8] SENPLADES, “Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025,” 2021. Accessed: May 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.planificacion.gob.ec/wp->

content/uploads/2021/09/Plan-de-Creacio%CC%81n-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado.pdf

- [9] J. Machado, “Motociclistas provocan la mayoría de accidentes de tránsito.” Accessed: Mar. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/motos-accidentes-transito-vias/>
- [10] V. H. Gironda Ramos, “Sistema Experto para la Asistencia Técnica en la Seguridad Activa de Motocicletas BMW,” 2014, Accessed: Mar. 31, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/7828>
- [11] L. David Berrones-Sanz, “Análisis de los accidentes y las lesiones de los motociclistas en México,” *Gac Med Mex*, vol. 153, pp. 662–671, 2017, doi: 10.24875/GMM.17002812.
- [12] J. Martin, “La historia de los cascos de moto: De la muerte de Lawrence de Arabia a la realidad aumentada.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.motorpasionmoto.com/accesorios/historia-cascos-moto-muerte-lawrence-arabia-a-realidad-aumentada>
- [13] FIA, “Helmets: A Road Manual For Decision-Makers and Practitioners, Second Edition,” 2023.
- [14] UNITED NATIONS, “R022r5e,” 2021.
- [15] INEN, “NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2669:2013 CASCOS DE PROTECCIÓN PARA EL USO DE MOTOCICLETAS,” pp. 11–18, 2013.
- [16] “Global status report on road safety 2023”.
- [17] Diario La Hora Ecuador, “Aumentaron los accidentes de tránsito con motos en 2023 – Diario La Hora.” Accessed: Mar. 31, 2024. [Online]. Available: [https://www.lahora.com.ec/loja/aumentaron-los-accidentes-de-transito-con-motos-en-2023/#google\\_vignette](https://www.lahora.com.ec/loja/aumentaron-los-accidentes-de-transito-con-motos-en-2023/#google_vignette)

- [18] CAN, “ACCIDENTES DE TRÁNSITO EN LA COMUNIDAD ANDINA,” 2020. [Online]. Available: <https://www.comunidadandina.org/DocOficialesFiles/DEstadisticos/SGDE957.pdf>
- [19] S. I. de S. E. 911, “En 2023, al 9-1-1 se han reportado 32.687 accidentes de tránsito con motos – Servicio Integrado de Seguridad ECU 911.” Accessed: Apr. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecu911.gob.ec/en-2023-al-9-1-1-se-han-reportado-32-687-accidentes-de-transito-con-motos/#>
- [20] Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador – ANT, “Visor de siniestralidad – Estadísticas – Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador – ANT.” Accessed: Apr. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.ant.gob.ec/visor-de-siniestralidad-estadisticas/>
- [21] Motorcyclist Attorney, “7 lesiones más comunes por accidentes de motocicleta | Abogado Motociclista.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://motorcyclistattorney.com/es/lesiones-por-accidentes-de-moto/>
- [22] UNECE, *Uniform provisions concerning the approval of protective helmets and their visors for drivers and passengers of motor cycles and mopeds*. 2022. [Online]. Available: <https://unece.org/sites/default/files/2022-07/R022r5am1e.pdf>
- [23] Auto Crash, “Laboratorio de cascos: su seguridad es el objetivo.” Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.revistaautocrash.com/laboratorio-cascos-seguridad-objetivo/>
- [24] L. I. Institute, “49 CFR § 571.218 - Norma No. 218; Cascos de moto.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/49/571.218>
- [25] E. Napoles, E. Olivares, and R. González, “Una introducción al Análisis por Elementos Finitos: aplicaciones y ejemplos,” 2015, Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/283151622>
- [26] H. Bagudu, G. Junnarkar, V. Pamulapati, M. Alberts, G. Bursell, and S. Rastogi, “Implementación de Ansys LS-DYNA en una máquina virtual de Azure.”

- [27] B. V. Enríquez Bustamante, “Estudio del comportamiento de un corrector de camber y caster usando elementos finitos para su alineación en un vehículo con suspensión tipo MCPHERSON,” 2020. Accessed: Jul. 18, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10222>
- [28] ABASOLO BILBAO, M. I. K. E. L., AGUIRREBEITIA CELAYA, J. O. S. U., CORIA MARTÍNEZ, I. B. A. I., & HERAS MIGUEL, I. K. E. R. (2017). *Guía práctica de elementos finitos en estática*. Ediciones Paraninfo, SA.
- [29] Dassault Systemes, “Requisitos del sistema | SOLIDWORKS.” Accessed: Apr. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/es/support/system-requirements>
- [30] P. Dadvand *et al.*, “Migration of a generic multi-physics framework to HPC environments,” *Comput Fluids*, vol. 80, no. 1, pp. 301–309, 2013, doi: 10.1016/J.COMPFLUID.2012.02.004.
- [31] P. Dadvand *et al.*, “Migration of a generic multi-physics framework to HPC environments,” *Comput Fluids*, vol. 80, no. 1, pp. 301–309, 2013, doi: 10.1016/J.COMPFLUID.2012.02.004.
- [32] R. J. Crawford, “Processing of Plastics,” *Plastics Engineering*, pp. 245–342, 1998, doi: 10.1016/B978-075063764-0/50006-6.
- [33] DYNAmore GmbH, “Hourglass.” Accessed: Sep. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.dynasupport.com/howtos/element/hourglass>
- [34] J. Njuguna, Z. Mouti, and K. Westwood, “Influence of temperature on mechanical properties of short glass fibre-reinforced polyamide 6 and 66 composites for automotive oil pan application,” *Lightweight Composite Structures in Transport: Design, Manufacturing, Analysis and Performance*, pp. 219–237, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-1-78242-325-6.00009-8.
- [35] Arduino, “UNO R3 | Arduino Documentation.” Accessed: Jul. 06, 2024. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>

- [36] Vishay Precision Group, “S-Beam Load Cell Model 60001,” 2010, Accessed: Jul. 06, 2024. [Online]. Available: [www.vishaypgloadcells.com](http://www.vishaypgloadcells.com)
- [37] AVIA, “24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales”.
- [38] Perez and J. Avila, “Tableta protoboard. En Implementación de circuitos lógicos,” Portal Académico del CCH, UNAM. Accessed: Jul. 06, 2024. [Online]. Available: <https://portalacademico.cch.unam.mx/cibernetica1/implementacion-de-circuitos-logicos/tableta-protoboard>
- [39] SHINING, “3D Scanner, Handheld 3D Scanner for 3D Printer SHINING 3D Einstar.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.einstar.com/>
- [40] R. Meier, “CoolTerm.” Accessed: Aug. 28, 2024. [Online]. Available: [https://freeware.the-meiers.org/CoolTerm\\_ReadMe.txt.html](https://freeware.the-meiers.org/CoolTerm_ReadMe.txt.html)
- [41] Inamhi, “Pronostico por Localidades.” Accessed: May 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.inamhi.gob.ec/pronostico/PronosticoEcuador.pdf>
- [42] MOVIDELNOR EP, “Niebla y lluvia factores de riesgo en la carretera.”
- [43] “Amplificador HX711 con Arduino para crear una báscula digital.” Accessed: Jun. 18, 2024. [Online]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/hx711-arduino-bascula-digital/>
- [44] J. de la Figal, “Simulación por el Método de los Elementos Finitos,” 2011.
- [45] L. Moreno, J. Florez, and B. Hernández, “Caracterización mecánica de compuestos poliéster/fibra de guadua y poliéster/fibra de guadua-vidrio,” 2018, *Ku Leuven. Science, Engineering and Technology*,. Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/849/84959041005/html/>
- [46] S. Kongwat, T. Nueanim, and H. Hasegawa, “FE Analysis of Motorcycle Helmet Performance under Severe Accidents,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 11, 2022, doi: 10.3390/app12115676.

- [47] Seismous, “Análisis por elemento finito: qué es y cómo funciona.” Accessed: Jul. 18, 2023. [Online]. Available: <https://seismous.com/analisis-por-elemento-finito-que-es-y-como-funciona/>
- [48] D. Salvador de Cruz, “Diseño y análisis de un RIG para estudio de cargo crash,” Mar. 2020, Accessed: Jul. 18, 2023. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/31665>
- [49] ANSYS. Inc, “LSDYNA Dummy Models Overview and Downloads.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://lsdyna.ansys.com/lstc-dummy-models-overview/>
- [50] F. Ayala and A. Chulde, “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN VEHÍCULO MONOPLAZA ELÉCTRICO BAJO CONDICIONES DE IMPACTO MEDIANTE SOFTWARE DE INGENIERÍA CAD/CAE,” 2022.
- [51] LS-DYNA SUPPORT, “Hourglass.” Accessed: Sep. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.dynasupport.com/howtos/element/hourglass>
- [52] F. A. O. Fernandes, R. J. Alves de Sousa, M. Ptak, and J. Wilhelm, “Certified Motorcycle Helmets: Computational Evaluation of the Efficacy of Standard Requirements with Finite Element Models,” *Mathematical and Computational Applications*, vol. 25, no. 1, p. 12, Feb. 2020, doi: 10.3390/MCA25010012.
- [53] S. Meng, “Towards improved motorcycle helmet test methods for head impact protection Using experimental and numerical methods”.
- [54] Li-Tung, Chih-Han, and Guan-Liang, “Fit Effect of Motorcycle Helmet-A Finite Element Modeling,” pp. 189–191, 2001.

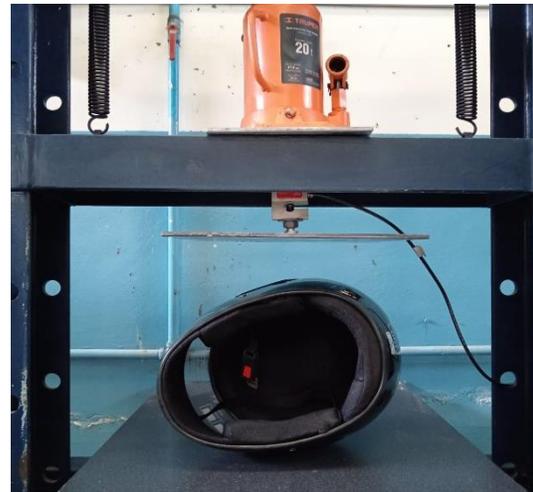
## ANEXOS

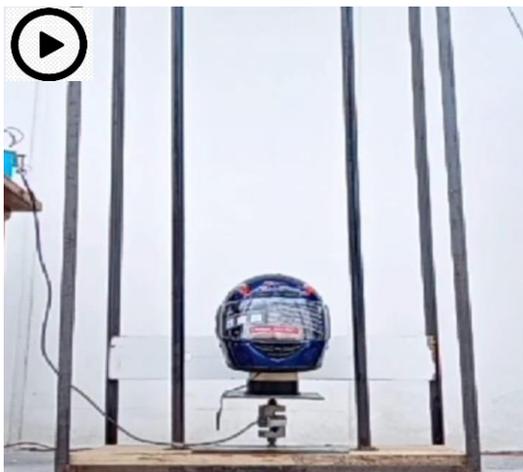
### Anexo I. Cascos de gama baja.



### Anexo II. Acondicionamiento en agua



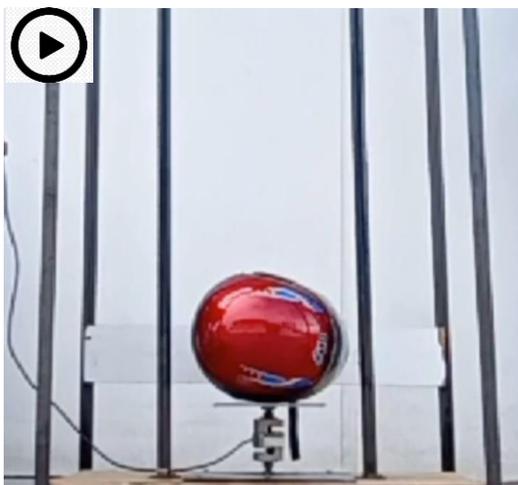
**Anexo III. Ensayo Experimental de Rigidez****a. Durante el ensayo de rigidez****b. Antes del ensayo de rigidez****c. Daños visibles luego del ensayo****d. Después del ensayo de rigidez**

**Anexo IV. Ensayo Experimental Absorción de Impacto**

a. Ensayo Absorción de Impacto Vertical  
Impactador Semiesférico



b. Ensayo Absorción de Impacto Vertical  
Impactador Plano

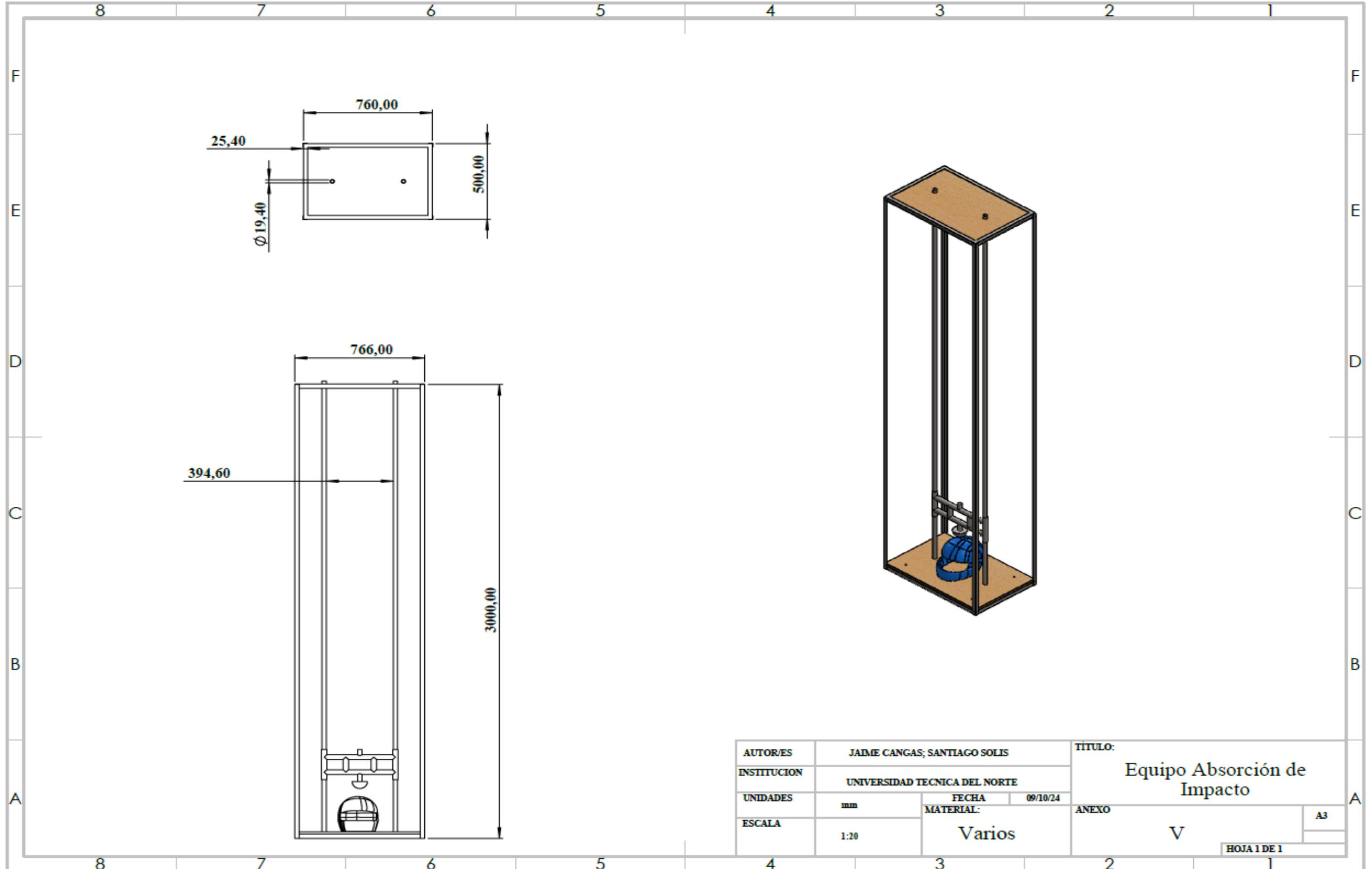


c. Ensayo Absorción de Impacto Lateral



d. Daños visibles luego del ensayo

Anexo V. Planos Equipo de Absorción de Impacto



AUTOR/ES	JAIME CANGAS; SANTIAGO SOLIS		TITULO:	
INSTITUCION	UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE		Equipo Absorción de Impacto	
UNIDADES	mm	FECHA	09/10/24	ANEXO
ESCALA	1:20	MATERIAL:	Varios	
			V	A3
HOJA 1 DE 1				