



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA FURGONETA DE TIPO M2  
APLICANDO LA CARGA DISPUESTA DEL ANEXO 7 DE CEPE  
R66 MEDIANTE ANÁLISIS COMPUTACIONAL”**

**Trabajo de integración curricular**

Tipo: Proyecto de investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTOR:**

**EDISON FELIPE YAUTIBUG YUQUILEMA**

Riobamba – Ecuador

2021



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA FURGONETA DE TIPO M2  
APLICANDO LA CARGA DISPUESTA DEL ANEXO 7 DE CEPE  
R66 MEDIANTE ANÁLISIS COMPUTACIONAL”**

**Trabajo de integración curricular**

Tipo: Proyecto de investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTOR: EDISON FELIPE YAUTIBUG YUQUILEMA**

**DIRECTOR: Ing. EDWIN RODOLFO POZO SAFLA Mag.**

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Edison Felipe Yautibug Yuquilema

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

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

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

Riobamba, 29 de noviembre de 2021



---

**EDISON FELIPE YAUTIBUG YUQUILEMA**

**CI: 606471956-7**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

El Tribunal del Trabajo de Integración curricular certifica que: El trabajo de integración curricular; tipo: Proyecto de investigación, **ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA FURGONETA DE TIPO M2 APLICANDO LA CARGA DISPUESTA DEL ANEXO 7 DE CEPE R66 MEDIANTE ANÁLISIS COMPUTACIONAL**, realizado por el señor: **EDISON FELIPE YAUTIBUG YUQUILEMA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

|  | FIRMA | FECHA      |
|--|-------|------------|
| Ing. Juan Carlos Rocha Hoyos Mag.<br><b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>                        | _____ | 29-11-2021 |
| Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla Mag.<br><b>DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b> | _____ | 29-11-2021 |
| Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba Mag.<br><b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>                     | _____ | 29-11-2021 |

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de integración curricular le dedico a Dios, por guiarme en el camino, A mis padres por enseñarme el camino del esfuerzo y la superación, a mis hermanos Silvia, Darío, Jhostin por ser el impulso de motivación. A mis maestros que formaron parte de mi vida estudiantil, ya que aportaron con sus conocimientos para poder cumplir una etapa de mi vida.

Edison

## **AGRADECIMIENTO**

El más sincero agradecimiento a Dios, por darme la vida, la salud, el entendimiento. A mis padres por su apoyo y esfuerzo incondicional en toda mi vida, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por darme la oportunidad de obtener una profesión y ser una ayuda para la sociedad. Al ing. Edwin Pozo, Ing. Miguel Aquino por su gestión en el presente trabajo de integración curricular. A los docentes de la carrera por compartir sus conocimientos.

Edison

## TABLA DE CONTENIDO

|                         |      |
|-------------------------|------|
| ÍNDICE DE TABLAS.....   | x    |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....  | xi   |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS..... | xiii |
| ÍNDICE DE ANEXOS .....  | xiv  |
| RESUMEN.....            | xv   |
| SUMMARY .....           | xvi  |
| INTRODUCCIÓN .....      | 1    |

### CAPITULO I

|   |    |
|---|----|
| 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....  | 2  |
| 1.1. Antecedentes .....   | 2  |
| 1.2. Justificación .....  | 3  |
| 1.3. Problema .....   | 6  |
| 1.3.1. <i>Introducción del problema</i> .....   | 6  |
| 1.3.2. <i>Delimitación del problema</i> .....   | 6  |
| 1.3.3. <i>Formulación del problema</i> .....  | 6  |
| 1.4. Objetivos .....  | 7  |
| 1.4.1. <i>Objetivo general</i> .....  | 7  |
| 1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....   | 7  |
| 1.5. Hipótesis .....  | 7  |
| 1.6. Estado del arte .....  | 8  |
| 1.6.1. <i>Estudio de resistencia de la superestructura, autobús.</i> .....                    | 8  |
| 1.6.2. <i>El vehículo completamente cargado y la incidencia en el espacio residual.</i> ..... | 8  |
| 1.6.3. <i>Ensayo cuasi estático en la sección de superestructura según CEPE R66.</i> .....    | 9  |
| 1.7. CEPE/ONU Reglamento n° 66. ....  | 10 |
| 1.8. Clasificación de vehículos. ....   | 10 |
| 1.9. Vehículos pertenecientes a la subcategoría M2. ....                                      | 11 |
| 1.10. Tipología de ensayos de vuelco Reglamento CEPE n °66 .....                              | 11 |
| 1.10.1. <i>Ensayo de vuelco básico como método de homologación</i> .....                      | 11 |
| 1.10.2. <i>Ensayo de vuelco utilizando secciones de carrocería.</i> .....                     | 12 |
| 1.10.3. <i>Ensayo de carga cuasi estática en la sección de carrocería.</i> .....              | 12 |
| 1.10.4. <i>Cálculo cuasi estático de componentes como método equivalente.</i> .....           | 12 |
| 1.10.5. <i>Simulación de vuelco de un vehículo completo por ordenador.</i> .....              | 13 |
| 1.11. Definición del espacio residual .....   | 13 |
| 1.12. Descripción general Método de elementos finitos .....                                   | 14 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.13. | Tipos de elementos .....   | 15 |
| 1.14. | Comparación entre métodos implícitos y explícitos.....           | 16 |
| 1.15. | Problemas no lineales.....                                       | 17 |
| 1.16. | Hourglass .....  | 17 |
| 1.17. | Ensayo de aplastamiento en el techo del vehículo FMVSS-216 ..... | 18 |

## CAPITULO II

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2.       | MARCO METODOLÓGICO.....   | 19 |
| 2.1.     | Diseño de la investigación .....  | 19 |
| 2.2.     | Enfoque de la investigación .....   | 19 |
| 2.3.     | Alcance de la investigación.....  | 19 |
| 2.4.     | Población y muestra .....   | 20 |
| 2.5.     | VARIABLES DE ANÁLISIS.....  | 20 |
| 2.5.1.   | <i>Variables independientes</i> .....                                     | 20 |
| 2.5.2.   | <i>Variables dependientes</i> .....                                       | 20 |
| 2.6.     | Metodología de resolución: modelado, software de elementos finitos .....  | 21 |
| 2.7.     | Metodología propuesta .....   | 22 |
| 2.8.     | Modelado de la furgoneta en el Software Solid Works.....                  | 23 |
| 2.9.     | HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN.....   | 24 |
| 2.9.1.   | <i>Metodología de resolución de la herramienta de simulación.</i> .....   | 24 |
| 2.9.2.   | <i>Ansys en el análisis de problemas no lineales</i> .....                | 25 |
| 2.9.3.   | <i>Ls-dyna</i> .....  | 26 |
| 2.10.    | Simulación del impacto del péndulo base a CEPE R66 anexo 7.....           | 26 |
| 2.10.1.  | <i>Cálculo del centro de gravedad</i> .....                               | 26 |
| 2.10.2.  | <i>Cálculo de la energía total que absorbe estructura.</i> .....          | 27 |
| 2.10.3.  | <i>Cálculo de la dirección de la carga aplicada</i> .....                 | 28 |
| 2.10.4.  | <i>Configuración de unidades</i> .....                                    | 29 |
| 2.10.5.  | <i>Importación de la furgoneta y mallado</i> .....                        | 29 |
| 2.10.6.  | <i>Propiedades del material utilizado</i> .....                           | 31 |
| 2.10.7.  | <i>Condiciones de contorno y restricciones</i> .....                      | 33 |
| 2.10.8.  | <i>Condiciones de contacto</i> .....                                      | 34 |
| 2.10.9.  | <i>Asignación de cargas</i> .....   | 35 |
| 2.10.10. | <i>Configuración de tiempo de simulación y resultados de salida</i> ..... | 35 |
| 2.10.11. | <i>Ejecución en base a las configuraciones del pre-proceso.</i> .....     | 36 |
| 2.10.12. | <i>Pos-proceso obtención de graficas</i> .....                            | 36 |
| 2.11.    | Simulación de la carga ejercida Ensayo FMVSS-216 .....                    | 37 |
| 2.11.1.  | <i>Cálculo de la carga ejercida para el ensayo FMVSS-216</i> .....        | 37 |
| 2.11.2.  | <i>Configuración de unidades</i> .....                                    | 37 |
| 2.11.3.  | <i>Importación de la furgoneta y mallado</i> .....                        | 37 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2.11.4.  | <i>Propiedades del material utilizado</i> .....                           | 39 |
| 2.11.5.  | <i>Condiciones de contorno y restricciones</i> .....                      | 41 |
| 2.11.6.  | <i>Condiciones de contacto</i> .....                                      | 41 |
| 2.11.7.  | <i>Asignación de cargas</i> .....   | 42 |
| 2.11.8.  | <i>Configuración de tiempo de simulación y resultados de salida</i> ..... | 43 |
| 2.11.9.  | <i>Ejecución en base a las configuraciones del pre-proceso.</i> .....     | 43 |
| 2.11.10. | <i>Pos-proceso obtención de graficas</i> .....                            | 43 |

### **CAPÍTULO III**

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| <b>3.</b>   | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....                      | <b>44</b> |
| <b>3.1.</b> | <b>Resultados de la simulación</b> .....                               | <b>44</b> |
| 3.1.1.      | <i>Simulación 1 impacto del péndulo base a CEPE R66 anexo 7.</i> ..... | 44        |
| 3.1.2.      | <i>Simulación 2 impacto del péndulo base a CEPE R66 anexo 7.</i> ..... | 48        |
| 3.1.3.      | <i>Simulación 3 de la carga ejercida Ensayo FMVSS -216.</i> .....      | 53        |
| 3.1.4.      | <i>Simulación 4 de la carga ejercida Ensayo FMVSS-216.</i> .....       | 58        |
| <b>3.2.</b> | <b>Validación de resultados mediante la energía de Hourglass</b> ..... | <b>63</b> |
| <b>3.3.</b> | <b>Análisis estadístico</b> .....                                      | <b>63</b> |
| <b>3.4.</b> | <b>Discusión</b> .....   | <b>69</b> |
|             | <b>CONCLUSIONES</b> .....  | <b>71</b> |
|             | <b>RECOMENDACIONES</b> .....   | <b>73</b> |
|             | <b>GLOSARIO</b>  |           |
|             | <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  |           |
|             | <b>ANEXOS</b>  |           |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Tabla 1-1:</b>  | Clasificación de vehículos .....   | 10 |
| <b>Tabla 2-1:</b>  | Vehículo subcategoría M2.....  | 11 |
| <b>Tabla 1-2:</b>  | Variable dependiente.....  | 21 |
| <b>Tabla 2-2:</b>  | Dimensiones generales de la furgoneta .....                                | 23 |
| <b>Tabla 3-2:</b>  | Ansysis en problemas no lineales.....                                      | 25 |
| <b>Tabla 4-2:</b>  | Centro de gravedad de furgoneta.....                                       | 26 |
| <b>Tabla 5-2:</b>  | Tabla de resultados, cálculos.....   | 28 |
| <b>Tabla 6-2:</b>  | Magnitudes consistentes en el programa.....                                | 29 |
| <b>Tabla 7-2:</b>  | Resultados de mallado para simulación impacto por péndulo.....             | 30 |
| <b>Tabla 8-2:</b>  | Descripción, tipo de elemento, tipo de material.....                       | 31 |
| <b>Tabla 9-2:</b>  | Propiedades del material, recubrimiento externo.....                       | 32 |
| <b>Tabla 10-2:</b> | Propiedades del material, elemento estructural.....                        | 32 |
| <b>Tabla 11-2:</b> | Propiedades del material rígido, péndulo.....                              | 33 |
| <b>Tabla 12-2:</b> | Resultados de mallado para simulación ensayo FMVSS-216.....                | 38 |
| <b>Tabla 13-2:</b> | Descripción, tipo de elemento, tipo de material.....                       | 39 |
| <b>Tabla 14-2:</b> | Propiedades del material, recubrimiento externo.....                       | 39 |
| <b>Tabla 15-2:</b> | Propiedades del material, elemento estructural.....                        | 39 |
| <b>Tabla 16-2:</b> | Propiedades del material rígido.....                                       | 41 |
| <b>Tabla 1-3:</b>  | Validación de resultados en la simulación.....                             | 63 |
| <b>Tabla 2-3:</b>  | Deformación máxima, respecto al eje X.....                                 | 63 |
| <b>Tabla 3-3:</b>  | Deformación máxima, respecto al eje Y.....                                 | 63 |
| <b>Tabla 4-3:</b>  | Medias de la deformación máxima, respecto al eje X.....                    | 64 |
| <b>Tabla 5-3:</b>  | ANOVA para la deformación máxima, respecto eje X.....                      | 64 |
| <b>Tabla 6-3:</b>  | Diferencias significativas. Método (LSD) deformaciones máximas, eje X..... | 64 |
| <b>Tabla 7-3:</b>  | Medias de la deformación máxima, respecto al eje Y.....                    | 66 |
| <b>Tabla 8-3:</b>  | ANOVA para la deformación máxima, respecto eje Y.....                      | 66 |
| <b>Tabla 9-3:</b>  | Diferencias significativas. Método (LSD) deformaciones máximas, eje Y..... | 66 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                     |   |    |
|---------------------|---|----|
| <b>Figura 1-1:</b>  | Direccionamiento al Reglamento de estudio. ....                         | 5  |
| <b>Figura 2-1:</b>  | Ensayo de vuelco completo como método básico.....                       | 11 |
| <b>Figura 3-1:</b>  | Ensayo de vuelco de sección de carrocería.....                          | 12 |
| <b>Figura 4-1:</b>  | Ensayo de vuelco de sección de carrocería.....                          | 12 |
| <b>Figura 5-1:</b>  | Ensayo por ordenador como método equivalente. ....                      | 13 |
| <b>Figura 6-1:</b>  | Disposición lateral del espacio residual. ....                          | 13 |
| <b>Figura 7-1:</b>  | Disposición longitudinal del espacio residual.....                      | 14 |
| <b>Figura 8-1:</b>  | Elemento tipo Shell (4) y (3) nodos.....                                | 15 |
| <b>Figura 9-1:</b>  | Elemento tipo sólido 3D. ....   | 16 |
| <b>Figura 10-1:</b> | Curva esfuerzo- deformación.....  | 17 |
| <b>Figura 11-1:</b> | Ensayo FMVSS-216. ....  | 18 |
| <b>Figura 1-2:</b>  | Esquema metodológico.....   | 22 |
| <b>Figura 2-2:</b>  | Modelado del volumen superficial.....                                   | 23 |
| <b>Figura 3-2:</b>  | Coquizado de elementos estructurales.....                               | 23 |
| <b>Figura 4-2:</b>  | Modelado del espacio residual.....                                      | 24 |
| <b>Figura 5-2:</b>  | Angulo de inestabilidad lateral y movimiento vertical del CDG.....      | 27 |
| <b>Figura 6-2:</b>  | Altura del péndulo por SW.....  | 28 |
| <b>Figura 7-2:</b>  | Mallado de la furgoneta.....  | 29 |
| <b>Figura 8-2:</b>  | Mallado de todos los elementos.....                                     | 30 |
| <b>Figura 9-2:</b>  | Descripción de los elementos para simulación, Impacto péndulo.....      | 31 |
| <b>Figura 10-2:</b> | Partes restringidas para la simulación.....                             | 34 |
| <b>Figura 11-2:</b> | Importación, Mallado de la furgoneta.....                               | 37 |
| <b>Figura 12-2:</b> | Mallado de todos los elementos.....                                     | 38 |
| <b>Figura 13-2:</b> | Partes restringidas para la simulación.....                             | 41 |
| <b>Figura 1-3:</b>  | Vista frontal – simulación 1, impacto del péndulo anexo 7 CEPE R66..... | 44 |
| <b>Figura 2-3:</b>  | Distribución de tensión – criterio Von Misses.....                      | 46 |

|                     |  |    |
|---------------------|--|----|
| <b>Figura 4-3:</b>  | Vista frontal – simulación 2 del impacto del péndulo anexo 7 CEPE R66..... | 49 |
| <b>Figura 5-3:</b>  | Distribución de tensión – criterio Von Misses. ....                        | 51 |
| <b>Figura 6-3:</b>  | Nodos seleccionados para el criterio del espacio residual. ....            | 51 |
| <b>Figura 7-3:</b>  | Vista frontal- simulación 3, carga ejercida ensayo FMVSS-216. ....         | 53 |
| <b>Figura 8-3:</b>  | Distribución de tensión –Criterio de Von Misses. ....                      | 56 |
| <b>Figura 9-3:</b>  | Nodos seleccionados para el criterio de espacio residual. ....             | 56 |
| <b>Figura 10-3:</b> | Vista frontal- simulación de la carga ejercida ensayo FMVSS-216. ....      | 58 |
| <b>Figura 11-3:</b> | Distribución de tensión –Criterio de Von Misses. ....                      | 61 |
| <b>Figura 12-3:</b> | Nodos seleccionados para el criterio de espacio residual. ....             | 61 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|                      |   |    |
|----------------------|---|----|
| <b>Gráfico 1-1:</b>  | Participación de vehículos importados frente a los ensamblados.....   | 4  |
| <b>Gráfico 2-1:</b>  | Vehículos comerciales: VAN, Camiones, buses; a) Participación de ventas por provincia; b) Participacion de ventas por marca. .... | 4  |
| <b>Gráfico 3-1:</b>  | a) Nivel de energía vehículo vacío. b) Nivel de anergia vehículo completo. ...  | 8  |
| <b>Gráfico 4-1:</b>  | a) Carga- deformación. b) Energía – deformación. ....   | 9  |
| <b>Gráfico 1-3:</b>  | Niveles de energía en el ensayo de vuelco equivalente.....  | 45 |
| <b>Gráfico 2-3:</b>  | Desplazamiento resultante máximo.....   | 46 |
| <b>Gráfico 3-3:</b>  | Criterio del espacio residual simulación 1 respecto al eje X.....   | 47 |
| <b>Gráfico 4-3:</b>  | Criterio del espacio residual simulación 1 respecto al eje Y.....   | 48 |
| <b>Gráfico 5-3:</b>  | Niveles de energía en el ensayo de vuelco equivalente.....  | 50 |
| <b>Gráfico 6-3:</b>  | Deformación- desplazamiento resultante. ....  | 50 |
| <b>Gráfico 7-3:</b>  | Criterio del espacio residual simulación 2 respecto al eje X.....   | 52 |
| <b>Gráfico 8-3:</b>  | Criterio del espacio residual simulación 2 respecto al eje Y.....   | 52 |
| <b>Gráfico 9-3:</b>  | Niveles de energía FMVSS-216.....   | 54 |
| <b>Gráfico 10-3:</b> | Desplazamiento resultante-FMVSS 216. ....   | 55 |
| <b>Gráfico 11-3:</b> | Criterio del espacio residual simulación 3 respecto al eje X.....   | 57 |
| <b>Gráfico 12-3:</b> | Criterio del espacio residual simulación 3 respecto al eje Y.....   | 57 |
| <b>Gráfico 13-3:</b> | Niveles de energía simulación 4 FMVSS-216. ....   | 59 |
| <b>Gráfico 14-3:</b> | Desplazamiento resultante-FMVSS 216. ....   | 60 |
| <b>Gráfico 15-3:</b> | Criterio del espacio residual, simulación 4 respecto al eje X.....  | 62 |
| <b>Gráfico 16-3:</b> | Criterio del espacio residual simulación 4 respecto al eje Y.....   | 62 |
| <b>Gráfico 17-3:</b> | Deformación máxima frente a la simulación, eje X. ....  | 65 |
| <b>Gráfico 18-3:</b> | Comparativo general, simulaciones, deformación, puntos, respecto del eje X. 65  |    |
| <b>Gráfico 19-3:</b> | Deformación máxima frente a la simulación, eje Y. ....  | 67 |
| <b>Gráfico 20-3:</b> | Comparativo general, simulaciones, deformación, puntos, respecto del eje Y  | 67 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

**Anexo A:** Procedimiento metodológico conforme al reglamento CEPE R66 Anexo 7.

**Anexo B:** Procedimiento metodológico del ensayo FMVSS-216.

**Anexo C:** Dimensiones generales del modelo de furgoneta.

## RESUMEN

En el presente trabajo de integración curricular, tipo investigación se tuvo como objetivo analizar la estructura de una furgoneta tipo M2, aplicando la carga dispuesta en el anexo 7 CEPE R66 mediante análisis computacional para evaluarse la resistencia de la estructura y la incidencia en la zona de seguridad del pasajero. Este documento presenta una metodología para la simulación de impactos de vuelco en furgonetas. En su inicio se realizó una revisión bibliográfica con información específica con base teoría al estudio, seguido se modeló la estructura de la furgoneta utilizando un software CAD en base a las dimensiones generales que fueron adquiridas de los catálogos. En el software CAE teniendo en cuenta la no linealidad del material y los parámetros necesarios, se realizó 4 simulaciones, dos simulaciones del impacto del péndulo reglamento CEPE R66 anexo 7, y dos simulaciones de la carga ejercida con el ensayo FMVSS-216, con el fin de conocer el comportamiento al variarse la carga. En los resultados de las simulaciones se comparó los valores de energía, desplazamiento resultante, distribución de tensión, y el criterio del espacio residual validándose los resultados por medio de la energía de Hourglass, donde se concluye que el reglamento CEPE R66 anexo 7 presenta valores de deformación mayor que el ensayo FMVSS-216, con una incidencia mayor en el espacio de supervivencia, mostrándose en las 4 simulaciones un mayor riesgo para los pasajeros ubicados del área delantera. El marco posterior de la estructura presenta una mayor resistencia frente a la parte delantera. Por ello con el procedimiento metodológico descrito en el documento se recomienda realizar un estudio individual conforme al reglamento R66 anexo 7, con otras propiedades del material u añadiéndose elementos estructurales que presenten una mayor resistencia y que no invada la zona de seguridad del pasajero.

**Palabras clave:** <ANÁLISIS ESTRUCTURAL> <ESPACIO DE SUPERVIVENCIA> <IMPACTO DE VUELCO > <MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS(MEF)> <SIMULACIÓN DE IMPACTO>.



Firmado electrónicamente por:  
**HOLGER GERMAN  
RAMOS UVIDIA**

0067-DBRA-UPT-2022

2022-01-18

## SUMMARY

The objective of this curricular integration work was to analyze the structure of a van type M2, applying the load provided in Annex 7 ECE R66 through computational analysis to evaluate the resistance of the body shell and the incidence in the safety zone of the passenger. This document presents a methodology for the simulation of vans rollover impacts. It was carried out a bibliographic review at baseline, with specific information of theoretical based on the study. The van structure was developed based on the general dimensions acquired from the catalogs and using CAD software. Four simulations were performed in CAE software taking into account the nonlinearity of the material and the necessary parameters. Two simulations of the impact of the pendulum regulation ECE R66 annex 7 and two simulations of the load exerted with the test simulations of the load exerted with the FMVSS216 test, to know the behavior when the load is varied. The values of energy, resultant displacement, strain distribution, and residual space criterion were compared in the simulation results through Hourglass energy. It concluded that the regulation ECE R66 annex 7 presents higher deformation values than the FMVSS-216 test, with a higher incidence in the survival space. The four simulations show a higher risk for passengers located in the front area, the rear frame of the structure presents higher resistance compared to the front part. Therefore, with the methodological procedure described in the document, it is recommended to carry out an individual study according to the regulation R66 annex 7, with other material properties or adding structural elements that present a higher resistance and do not invade the passenger safety zone.

**Keywords:** <STRUCTURAL ANALYSIS> <SURVIVAL SPACE> <ROLLOVER IMPACT> <FINITE ELEMENT METHOD (FEM)> <SIMULATION OF IMPACT >.



Firmado electrónicamente por:  
**PATRICIA PILAR  
MOYOTA AMAGUAYA**

## **INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de pruebas experimentales completas resulta muy costoso, por ello el desarrollo de modelos confiables con simulación de impactos, puede ser una alternativa de solución que predice los accidentes en el mundo real. La presente investigación:” análisis estructural de una furgoneta de tipo M2 aplicando la carga dispuesta del anexo 7 de CEPE R66 mediante análisis computacional” consiste en una prueba que evalúa la resistencia de la estructura equivalente a una prueba de vuelco y la incidencia en el espacio de supervivencia. Por otra parte, el ensayo FMVSS-216 se trata de un ensayo cuasi-estático, con una carga ejercida en el techo de la furgoneta, que han sido aplicados generalmente en los Estados Unidos y gran parte de Europa para evaluar la resistencia de la estructura.

El presente trabajo de investigación consta de tres capítulos de acuerdo al modelo general para proyecto de titulación: tipo investigación, a continuación, se presenta una descripción breve de los capítulos.

**CAPÍTULO I, MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.** Se hace una revisión de los antecedentes, la justificación, planteamiento del problema, los objetivos, el estado del arte, seguido del marco teórico requerido para la investigación.

**CAPITULO II. MARCO METODOLÓGICO.** Se aplican el diseño de la investigación, el enfoque, el alcance de la investigación, la descripción del procedimiento para la simulación, por el reglamento CEPE n°66 y el ensayo FMVSS-216, así también introducción de parámetros y los valores que permitan obtener los valores correctos de las simulaciones.

**CAPITULI III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.** Se presenta los resultados obtenidos en las 4 simulaciones al variar la carga, el análisis estadístico comparativo de las deformaciones máximas de cada simulación, la discusión de los resultados.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES,** se extraen las conclusiones pertinentes de los resultados obtenidos. Finalmente se menciona las recomendaciones pertinentes para este tipo de trabajos de investigación.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.** Finalmente se detalló las referencias bibliográficas que forman un respaldo importante para el presente proyecto.

## CAPITULO I

### 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 1.1. Antecedentes

Según el estudio de: (Zhang et al. ,2012, p. 3)desarrolló la simulación de un ensayo de vuelco de una sección de carrocería en base al reglamento CEPE-R66, empleó el modelo de elementos finitos para la simulación y análisis de resistencia en la superestructura. Con el autobús modelado se determinó la energía que absorbe todas las secciones del cuerpo durante y después de la prueba. En la metodología se estableció el modelo de elemento finitos para la prueba de la sección de la carrocería. En los resultados se evaluaron las características de rigidez, resistencia, deformación de la superestructura, como también la invasión al espacio de supervivencia de los pasajeros. Se concluyó que el resultado de la prueba de la sección de carrocería puede aproximarse mediante el análisis de elementos finitos.

En la Universidad Copperbelt, Kitwe-Zambia, en el Departamento de Ingeniería Mecánica y el centro de investigación de seguridad de vehículos y tráfico en China, en abril de 2015, desarrollaron el modelado de un autobús en un programa CAD, el modelo geométrico se utilizó para evaluar la resistencia de la superestructura del autobús y la capacidad de absorción de energía en impactos de vuelco, respaldado por el reglamento CEPE-nº66, utilizaron método de elementos finitos MEF, para la respectiva simulación computacional, donde se verificó la protección de los pasajeros y los elementos estructurales que presentan gran capacidad de resistencia(Chirwa, Li y Qian ,2015, p. 10).

Según el estudio de: (Abdul Hamid y Li ,2019, p. 8) analizó el espacio de supervivencia de un autobús en el que trata de cuantificar el índice de deformación. El estudio menciona que el reglamento nº 66 CEPE da criterios de pasa/falla, detalla que la norma no cuantifica la deformación de la estructura. Para su estudio toma en cuenta las dimensiones del espacio residual definido por el reglamento nº 66, sugiere otro índice de deformación, que el autor nombra índice de deformación de área. El autor señala que se utiliza en choques reales donde la estructura sufre daños graves. Al presentarse una estructura totalmente colapsada, donde la estructura penetra el espacio de supervivencia, trata de cuantificar los danos, en dos dimensiones. El artículo permite conocer el avance de estudios en los ensayos de vuelco en autobuses. Para la furgoneta en estudio se tomará lo definido por el reglamento.

En la Universidad de Carlos III de Madrid en el departamento de Ingeniería Mecánica en octubre del 2016 (Núñez Milán ,2016, p. 70), realizó una simulación de impacto de vuelco, en la estructura de un bus, conforme al reglamento R66, empleando el software Ls-Dyna, en el procedimiento que empleó el autor, menciona las condiciones, materiales y la utilidad del método de elementos finitos. Del mismo modo realizó el modelado de la estructura, como resultado de la simulación realizó el análisis de energías, a su vez comprobó si el modelo supera la prueba del reglamento mencionado.

En base a los antecedentes mostrados, es evidente que las simulaciones computacionales, mediante el método de elementos finitos para verificar la resistencia de una estructura, conforme al reglamento CEPE R66, se han realizado principalmente en buses subcategoría M3, el reglamento (CEPE-R66 ,2011), tiene alcance para vehículos pertenecientes a la subcategoría M2, M3.

## **1.2. Justificación**

Las pruebas de aplastamiento cuasi-estáticas o dinámicas se han utilizado de forma amplia generalmente en los EE.UU. y gran parte de Europa. El desarrollo de pruebas experimentales completas resulta muy costoso, el desarrollo de modelos confiables con simulación de aplastamiento en techos, puede ser una alternativa de solución que predice los accidentes en el mundo real(Chirwa ,2005, p. 3).

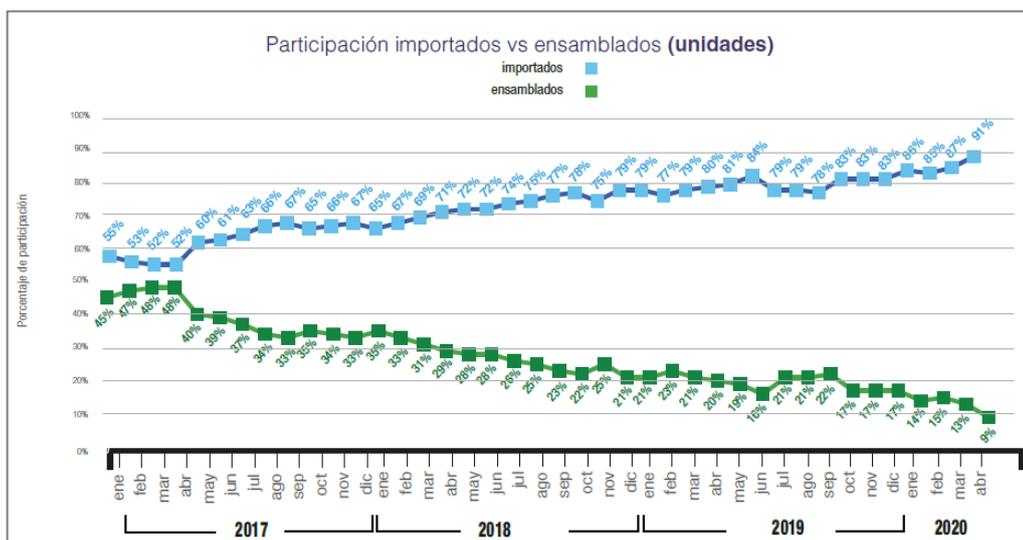
La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, Reglamento n° 66 para la posterior homologación, consiste en una prueba que asegura que ninguna parte se desplace e invada la zona de supervivencia, a su vez que ningún elemento del espacio de supervivencia sobresalga la estructura(Arroba ,2013, p. 6).

Según el estudio de(Cepeda ,2020, p. 1), en Ecuador existen más de 5000 víctimas mortales al año, por causas relacionadas a accidentes de tránsito. En temas relacionados al transporte público, los vuelcos de autobuses causan preocupación. La inserción de tecnologías permite simular, optimizar, y obtener un mejor entendimiento de lo que sucede durante un impacto. El método de elementos finitos es utilizado para ejecutar los distintos ensayos de volcadura, siempre aplicando de una manera adecuada.

En el último anuario 2019 de AEADE (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador) el total de vehículos motorizados matriculados muestra un total de 2'403.651, del cual el 2,19% del total pertenece a las furgonetas. La venta anual de vehículos por segmento de unidades del año 2019 fue de 4.678 furgonetas. Desde el año 2016-2019 tiene un incremento de ventas del 1.3%, este tipo de vehículos es utilizado sobre todo en el sector escolar.

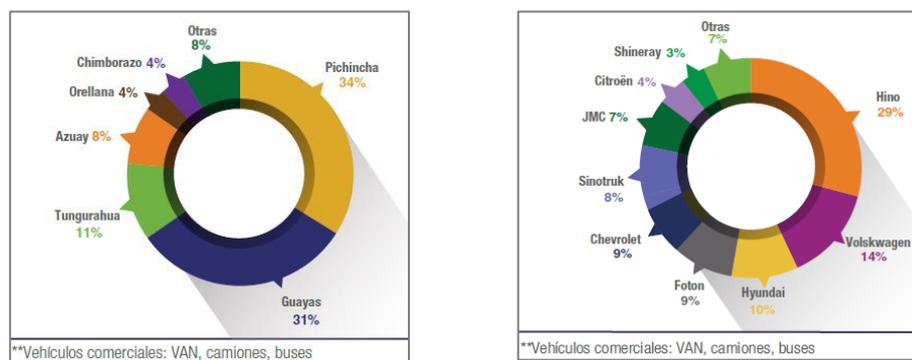
La industria automotriz en el país es muy reducida comparada con otros países de la región y el mundo, las pocas empresas que fabrican automóviles están en el área de dedicadas a la construcción de carrocerías y autopartes, el mismo que representan el desarrollo tecnológico del país. Actualmente existen aproximadamente 60 empresas de carrocerías, más de un centenar de empresas que se dedican a la fabricación de autopartes y accesorios de buses, generando miles de plazas de trabajo en esta área productiva.

De acuerdo al boletín (AEADE ,2020, p. 8), ( gráfica 1-1), la participación de vehículos importados frente a los ensamblados, claramente indica que durante los últimos 4 años los vehículos importados tienen un aumento significativo, mientras que los vehículos ensamblados en el país presenta una disminución hasta debajo del 10 %.



**Gráfico 1-1:** Participación de vehículos importados frente a los ensamblados.

Fuente: (AEADE ,2020, p. 8)

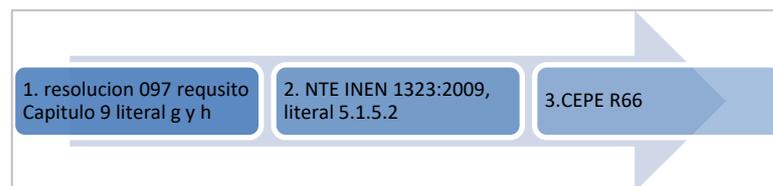


**Gráfico 2-1:** Vehículos comerciales: VAN, Camiones, buses; a) Participación de ventas por provincia; b) Participación de ventas por marca.

Fuente: (AEADE ,2020, p. 8)

En la participación de ventas de vehículos,( gráfica 2-1) (AEADE ,2020, p. 8)comerciales por provincia, la provincia con mayores ventas es Pichincha, en la participación de ventas se destacan Hino, Volkswagen y Hyundai.

Según el reglamento de homologación de automóviles y dispositivos (ANT, 2016) y lo indicado en el capítulo noveno literal g y h indica que los fabricantes o importadores que desean comercializar un automotor de clase **M2(furgonetas)** y **M3(autobuses)** en el país deben presentar un informe de ensayo favorable que evalué la resistencia de la estructura de la furgoneta según los requisitos del NTE INEN 1323, esta norma indica algunos requisitos de ensayos que se deben realizar. **El presente estudio se centró en el ensayo de vuelco de la furgoneta TIPO M2**, el mismo es basado por el anexo 7 CEPE R66.



**Figura 1-1:** Direccionamiento al Reglamento de estudio.

**Realizado por:** Yautibug, Edison, 2020

Según el reglamento(CEPE-R66 ,2011), que hace referencia a la resistencia en vuelcos de la estructura, y la incidencia en el espacio residual, permite evaluar la resistencia estructural en vehículos de subcategoría M2 Y M3. Existe diferentes formas de ensayo de vuelco al analizar la estructura de un autobús basados en el reglamento CEPE/ ONU R66. Los métodos de ensayos básicos y equivalentes son: **a)** Ensayo de vuelco de autobús completo como método básico. **b)** Ensayo de vuelco utilizando secciones de carrocería. **c)** ensayo de carga cuasi estático como método equivalente. **d)** Cálculo cuasi estático de componentes como método equivalente. **e)** simulación de vuelco de un vehículo completo por ordenador como método equivalente.

Si bien en el país es obligatorio el cumplimiento de la regulación CEPE R66 para verificar la resistencia en vuelcos de los automotores de clase M2 y M3 destinados a transporte de pasajeros, solo se lo realiza en autobuses que corresponden a clase M3, mientras que para las furgonetas de clase M2 importadas no se pide este requisito, por esta razón este proyecto tiene como objetivo realizar un estudio del ensayo de vuelco en furgonetas y así poder evaluar si este requisito es indispensable para verificar la seguridad en estos modelos.

### **1.3. Problema**

#### ***1.3.1. Introducción del problema***

El estudio de resistencia estructural y la incidencia en el espacio residual por la reglamentación CEPE R66, tiene el alcance para vehículos de subcategoría M2 y M3, generalmente estos análisis se realizan en autobuses que pertenecen a la subcategoría M3, mientras que para las furgonetas que pertenecen a la subcategoría M2 no se encuentran estudios referentes a la reglamentación R66.

En relación al estudio que se realizó años atrás, existía un laboratorio de ensayos que estaba enfocado al análisis de resistencia estructural de autobuses, que contaba con la designación del Ministerio de Industrias y Productividad del Ecuador, ejecutaba ensayos bajo la norma NTE INEN :2009 y evaluaba la deformación a la combinación de cargas (Arroba Arroba ,2013, p. 24).

En la actualidad se conoce que distintos laboratorios acreditados, realizan ensayos computacionales en relación al anexo 9 CEPE n° 66, cabe mencionar que no se conoce la existencia de leyes que exijan el control a importadores de furgonetas el cumplimiento del reglamento mencionado. Las distintas causas podrían estar relacionados al desconocimiento de los recursos tecnológicos para el desarrollo de los ensayos, que podrían verificar la resistencia estructural de la furgoneta. Por tal efecto no se conoce la validez de los resultados entregados por los distintos laboratorios que realizan ensayos computacionales de vuelco según reglamento CEPE n°66.

#### ***1.3.2. Delimitación del problema***

El presente estudio no se realizará ensayos físicos, tampoco la construcción de la sección carrocería, se realizará el modelado de la furgoneta por el software Solid Works, de acuerdo a las características que tiene los vehículos más comunes en el país. Se utilizará un software con método de elementos finitos para la simulación, se hará uso de artículos científicos, libros, normas que estén relacionadas al tema de estudio.

#### ***1.3.3. Formulación del problema***

¿Al simular el impacto del péndulo en el techo de la furgoneta según el ensayo descrito en el anexo 7 CEPE R66 con el software de método de elementos finitos invade en la zona de seguridad del pasajero?

## **1.4. Objetivos**

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

Analizar la estructura de una furgoneta de tipo M2 aplicando la carga dispuesta del anexo 7 de CEPE R66 mediante la simulación de elementos finitos para el estudio de la deformación y la incidencia en la zona de seguridad del pasajero.

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

Investigar los modelos de furgonetas de transporte de pasajeros más utilizados en el país en las distintas fuentes bibliográficas para dimensionarse una estructura en relación a características encontradas.

Modelar la estructura de una furgoneta tipo M2 con las dimensiones y características importantes halladas en la investigación en el programa SOLIDWORK para diferenciarse en la respectiva simulación.

Simular la carga de aplastamiento en el techo de la furgoneta según el ensayo descrito en el anexo 7 CEPE R66 en un software de método de elementos finitos para verificarse la deformación de la estructura y la invasión en la zona de seguridad del pasajero.

Simular la carga de aplastamiento en el techo de la furgoneta según el ensayo descrito en FMVSS N° 216 en un software de elementos finitos para verificarse la deformación de la estructura y la invasión en la zona de seguridad del pasajero.

Analizar los resultados de simulación entre los ensayos descritos en el estudio para compararse la deformación de la estructura e incidencia en la zona de seguridad del pasajero.

## **1.5. Hipótesis**

**Hi:** La estructura del modelo de furgoneta más común en el país, presenta condiciones favorables con respecto a la resistencia para la seguridad de pasajero al ser ensayo por medio de simulación computacional con el ANEXO 7 de CEPE R66.

**Ho:** La estructura del modelo de furgoneta más común en el país, no presenta condiciones favorables con respecto a la resistencia para la seguridad de pasajero al ser ensayo por medio de simulación computacional con el ANEXO 7 de CEPE R66

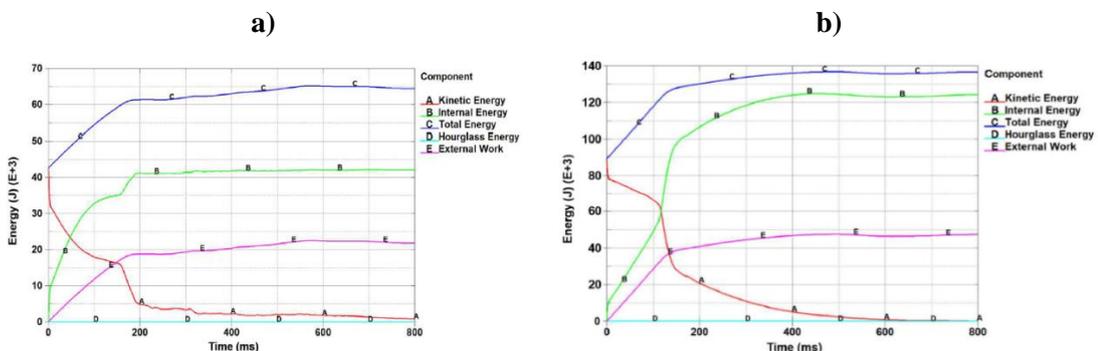
## 1.6. Estado del arte

### 1.6.1. Estudio de resistencia de la superestructura, autobús.

En el estudio realizado por: (Karliński et al. ,2014, p. 11) presenta el modelo de una superestructura de un autobús tipo furgoneta y su análisis de resistencia en toda la superestructura, el mismo que evaluó por medio del reglamento CEPE/ONU R66, para dicho estudio utilizó el método de elementos finitos en la simulación, tuvo en cuenta la no linealidad de los materiales, y de geometría. En su estudio determinó que la resistencia de la superestructura depende del marco trasero, a la vez observó que la mayor deformación se ubica en la parte delantera de la superestructura, donde la seguridad en el momento del vuelco es mayor. El autobús cumplió los requisitos de deformación y no invade el espacio residual. Por parte del estudio menciona que las distintas modificaciones en la superestructura, recorte de pared entre otros, cambia la resistencia de la superestructura drásticamente, debido al cambio de los distintos elementos que garantizan la rigidez de la superestructura.

### 1.6.2. El vehículo completamente cargado y la incidencia en el espacio residual.

De acuerdo al estudio de (Wicaksono et al. ,2017, p. 8) utilizó el método de elementos finitos, estudiaron dos condiciones en la incidencia del espacio residual. El primero con el vehículo vacío y el segundo con el vehículo completo. En el estudio, las dos condiciones de prueba muestran que la estructura invade la zona de supervivencia de los pasajeros, por tal efecto no cumplió la norma de seguridad CEPE R66. Sin embargo, podría destacarse que en su estudio demuestra que al aumentar el peso en el vehículo genera directamente un aumento en la energía potencial. Del presente estudio podría acogerse el concepto de proporcionalidad entre el peso y el aumento de la energía potencial de un vehículo, esto en base a una prueba dinámica. Se diferencia del presente artículo por realizar en análisis en una furgoneta que pertenece a la subcategoría M2, específicamente está relacionado al ensayo cuasi estático de CEPE-R66.



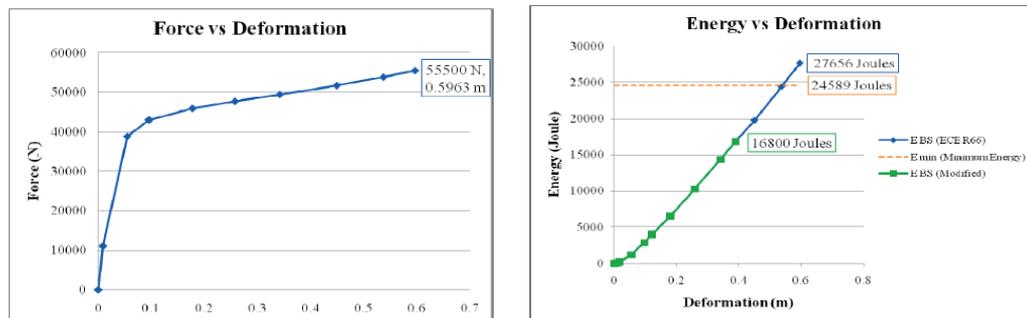
**Gráfico 3-1:** a) Nivel de energía vehículo vacío. b) Nivel de energía vehículo completo.

Fuente(Wicaksono et al. ,2017, p. 8)

Los resultados muestran el comportamiento de energía desde que el vehículo topa con el piso hasta un tiempo definido. La energía cinética es absorbida por la estructura, y se transforma en energía interna, la energía interna conforme aumenta hasta el final de la simulación, menciona que la energía total es la suma de la energía cinética y el trabajo externo debido a la gravedad. Al comparar las figuras con el vehículo completamente cargado, la energía cinética que absorberá el vehículo es mayor (Wicaksono et al. ,2017, p. 8). En nuestro estudio que es cuasi estático, es importante enfocar que, no se mostrara todas las energías, solo lo indicado el ANEXO 7, que contiene de la energía interna y la deformación.

### 1.6.3. Ensayo cuasi estático en la sección de superestructura según CEPE R66.

Se realizó un estudio, aplicando el anexo 7 CEPE R66 por: (Mihradi et al. ,2015, p. 6) que evaluó la capacidad de absorción de energía de una sección de estructura, en el límite de espacio residual. Los autores investigaron mediante el modelo de elementos finitos computacional. En la sección de la estructura aplico la carga cuasi estática basada con el reglamento n° 66, posteriormente evaluó la capacidad de absorción de la energía hasta el momento que empieza invadir la zona de supervivencia. Por medio de su estudio obtuvo la curva de carga frente a la deformación como muestra en la gráfica 4-1.



**Gráfico 4-1:** a) Carga- deformación. b) Energía – deformación.

**Fuente:** (Mihradi et al. ,2015, p. 6)

En la gráfica 4-1 mostrada se aprecia los valores de energía antes de incidir el espacio residual. La energía mínima calculada esta intermedia entre la energía con espacio residual original y el espacio residual modificado, Al aumentar la dimensión del espacio residual se reduce la capacidad de absorción de energía. Los autores mencionan que no existe diferencia significativa si se aplica la carga al lado derecho o izquierdo (Mihradi et al. ,2015, p. 6). El presente estudio se basó en el reglamento CEPE n° 66, anexo7, que es un tema relacionado, la diferencia radica en el modelo del vehículo utilizado.

### 1.7. CEPE/ONU Reglamento n° 66.

El reglamento (CEPE-R66 ,2011, p. 9) está dirigido a la subcategorías de vehículos M2 y M3, estos vehículos están destinados al transporte de pasajeros y su respectivo equipaje. La categoría M se subdivide como se muestra a continuación:

- **M1:** Los vehículos tiene un máximo de 8 plazas para los pasajeros, sin incluir al conductor, solo lleva pasajeros sentados(CEPE-R66 ,2011).
- **M2:** Los vehículos tiene más de 8 plazas, en el que la masa no supera las 5 toneladas, llevan pasajeros sentados y de pie(CEPE-R66 ,2011).
- **M3:** Es la subcategoría que abarca a todos los vehículos con más de 8 plazas, y la masa supera las 5 toneladas, lleva pasajeros sentados y parados(CEPE-R66 ,2011).

### 1.8. Clasificación de vehículos.

En el Ecuador la clasificación de vehículos está bajo la norma (NTE INEN 2656 ,2016)(Instituto Ecuatoriano de Normalización), encargado en la clasificación de los distintos vehículos, que se relaciona para el criterio de homologación que tiene la Unión Europa. Véase la **Tabla 1-1**

**Tabla 1-1:** Clasificación de vehículos

|   | <b>Categoría</b>  | <b>Descripción</b>  |
|---|---|---|
| L |  | Son todos los vehículos motorizados que comprende de una, dos, tres o cuatro ruedas para el uso terrestre.                                |
| M |  | Principalmente vehículos de motor que tiene de cuatro ruedas o más, que están contruidos específicamente para el transporte de pasajeros. |
| N |  | Son todos los vehículos motorizados que comprende de cuatro ruedas o más, su función él es transporte de carga                            |
| O |  | Son todos los vehículos no motorizada, que son remolcados por un vehículo con motor.  |

Fuente:(NTE INEN 2656 ,2016)

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

## 1.9. Vehículos pertenecientes a la subcategoría M2.

En la tabla 2-1 se detalla la clasificación de la subcategoría M2, en específico, el tipo furgoneta de pasajeros/van que se tomara de referencia para el modelado y la simulación por el método de elementos finitos, la características se detalla en el documento (NTE INEN 2656 ,2016, p. 6).

**Tabla 2-1:** Vehículo subcategoría M2.

| Tipo                       |   | Descripción   |
|----------------------------|---|---|
| Van/furgoneta de pasajeros |  | Descripción véase en:<br>- NTE INEN 3833, 3.1.1.4.1<br>- NTE INEN 3833, 3.1.2.1 |
| Microbús                   |  | Descripción véase en:<br>- NTE INEN 3833, 3.1.2                                 |

Fuente: (NTE INEN 2656 ,2016, p. 6)

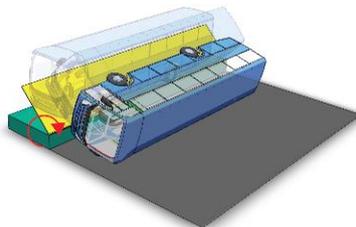
Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

## 1.10. Tipología de ensayos de vuelco Reglamento CEPE n °66

Existe diferentes formas de ensayo de vuelco al analizar la estructura de un autobús basados en el reglamento CEPE/ ONU R66. Los métodos de ensayos básicos y equivalentes son:

### 1.10.1. Ensayo de vuelco básico como método de homologación

El ANEXO 5, (CEPE-R66 ,2011, p. 25) Consiste en volcar al automotor completo terminado por medio de una rampa basculante que gira a una velocidad angular relativamente baja hasta que el auto pierda estabilidad lateral y vuelque, lo que se mide en este ensayo y los demás es que la zona de seguridad o de supervivencia que se encuentra en el interior en compartimiento del habitáculo de pasajeros no sea invadido por algún elemento estructura después del ensayo de vuelco.

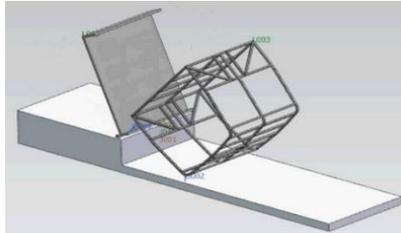


**Figura 2-1:** Ensayo de vuelco completo como método básico.

Fuente: (Wicaksono et al. ,2017)

### ***1.10.2. Ensayo de vuelco utilizando secciones de carrocería.***

El ANEXO 6, (CEPE-R66 ,2011, p. 30) Este es un ensayo equivalente en el que se vuelca una sección crítica de la estructura de la furgoneta de bus con las mismas condiciones del ensayo descrito en el ANEXO 6.

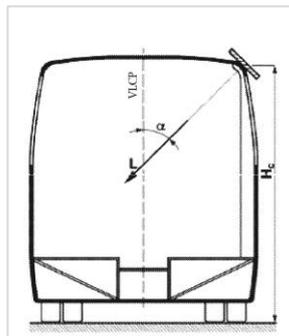


**Figura 3-1:** Ensayo de vuelco de sección de carrocería.

Fuente: (García ,2019, p. 16)

### ***1.10.3. Ensayo de carga cuasi estática en la sección de carrocería.***

El ANEXO 7, (CEPE-R66 ,2011, p. 32) Es un ensayo cuasi estático se ubica a la sección de la furgoneta de manera recta y fija al piso y es impactada por una carga en la zona lateral de la furgoneta, La energía debe tener la misma magnitud que el que se produciría en un ensayo de vuelco según el ANEXO 5 y 6 al que corresponda.



**Figura 4-1:** Ensayo de vuelco de sección de carrocería.

Fuente: (CEPE-R66 ,2011, p. 32)

### ***1.10.4. Cálculo cuasi estático de componentes como método equivalente.***

El ANEXO 8, (CEPE-R66 ,2011) es un ensayo cuasi estático de componentes como un método equivalente . Estudia las zonas plásticas, bisagras plásticas, en el que considera las partes rígidas y elásticas en el cálculo. En el análisis no pueden mezclar las características estáticas con dinámicas.

### 1.10.5. Simulación de vuelco de un vehículo completo por ordenador.

El ANEXO 9, (CEPE-R66 ,2011, p. 44) Este es un ensayo utilizando un software especializado de elementos finitos, en que se replica lo indicado en el ensayo del ANEXO 5, cabe destacar que este es un método válido equivalente para la homologación de un automotor.

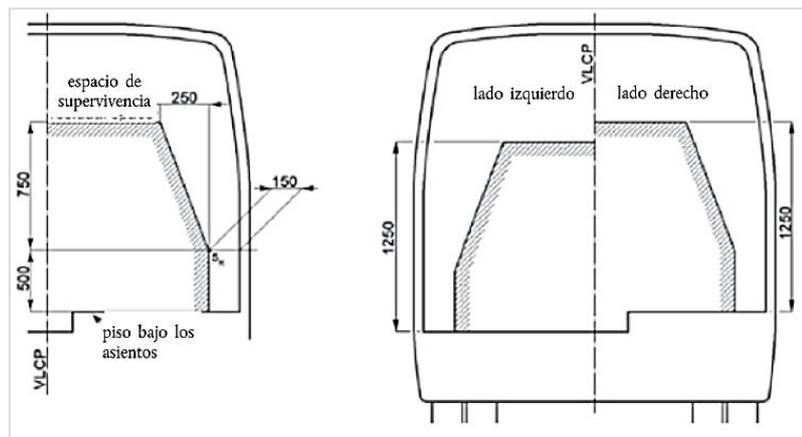


**Figura 5-1:** Ensayo por ordenador como método equivalente.

Fuente: Yautibug, Edison,2021

### 1.11. Definición del espacio residual

Los espacios residuales tienen reglas idénticas para todos los vehículos, en gran parte la ubicación del espacio residual va depender de la forma, la suspensión del vehículo, también de la ubicación que tenga los asientos. Las dimensiones definidas por el reglamento, no puede ser menor, pero sí de dimensiones mayores, ya que aumentaría los márgenes de seguridad y permitiría una mejor protección a los pasajeros(Karliński et al. ,2014, p. 4).

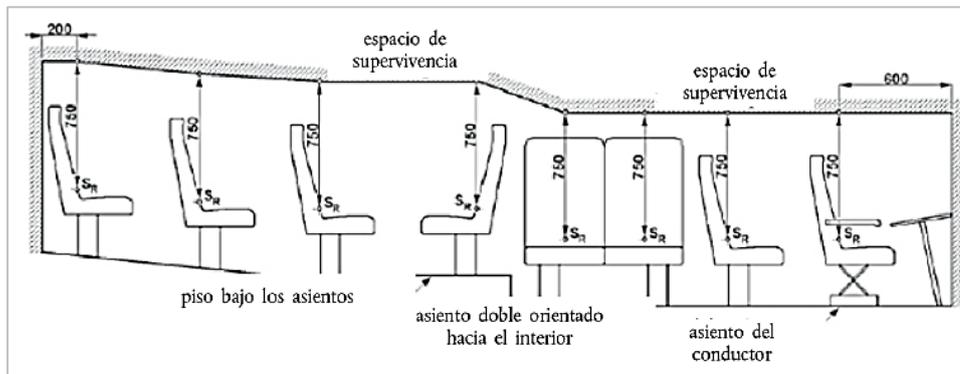


**Figura 6-1:** Disposición lateral del espacio residual.

Fuente: (CEPE-R66 ,2011, p. 9)

El volumen del espacio residual del vehículo define un plano transversal vertical, que se encuentra dentro del vehículo, con la periferia a lo largo del vehículo, como describe el reglamento CEPE/ONU R66, véase fig. 6-1. Los distintos puntos característicos  $S_R$  se mueven a lo largo del vehículo en un plano transversal vertical, a lo largo de las líneas rectas, véase fig. 7-1. El punto  $S_R$  se encuentra en el respaldo de cada asiento exterior, que puede estar orientado hacia adelante o atrás, también se puede suponer 500mm por encima del piso del asiento, por otro lado, la

superficie de la pared lateral es de 150mm. Es importante destacar que no se debe tomar en cuenta los pasos de rueda u otras variaciones. Aplica las mismas dimensiones para asientos enfrentados con el plano central. Por último el punto  $S_R$  para el asiento exterior trasero con menos de 200mm, el espacio residual encara interior de la pared trasera que tiene el vehículo(Karliński et al. ,2014, p. 4).



**Figura 7-1:** Disposición longitudinal del espacio residual.

Fuente: (CEPE-R66 ,2011, p. 9)

### 1.12. Descripción general Método de elementos finitos

El concepto básico en el análisis de elementos finitos es que se encuentra solución a problemas complicados que son sustituidos por uno más simple, está claro que la solución es aproximada al problema y no una solución exacta, es posible mejorar empleando un mayor tiempo en el cálculo(Colorado ,2008, p. 43).

El método de elementos finitos en la actualidad es el método más utilizado, ya que brinda precisión en los resultados. Es importante destacar que las pruebas experimentales en los vehículos son muy costosas, debido a lo mencionado el método es una alternativa para el análisis debido a su precisión, facilidad y economía. Los distintos investigadores han realizado simulaciones numéricas que permiten analizar distintas situaciones(Wicaksono et al. ,2017, p. 2).

El método de elementos finitos que es utilizado para simular ensayos de vuelco, permite un mejor entendimiento mediante la simulación. La tecnología aplicada de manera correcta, permite verificar la seguridad de los vehículos de transporte que circulan en Ecuador y Latinoamérica, disminuyendo los costos en las materias prima (Cepeda ,2020, p. 2).

El proceso ordenado para encontrar la solución de un problema por elementos finitos es el siguiente:

- Discretización de la estructura: En este primer paso se divide la estructura en elementos, estos elementos definen la interrelación entre los grados de libertad de un nodo y los del siguiente. Los elementos pueden ser: líneas (barras y vigas), áreas (placas en 2D o 3D), o sólidos (“bricks” (ladrillos) o tetraedros) (Colorado ,2008, p. 43). El tipo de elemento seleccionado va depender del modelo geométrico que se utilice para el análisis, es importante tomar en cuenta

que el número de elementos están directamente relacionados en la precisión de la solución, es decir al aumentar el número de elementos se puede conseguir una solución más exacta.

- Selección de un modelo de interpolación: el paso dos no se puede predecir de forma exacta el desplazamiento de una estructura bajo cierta carga. La solución asumida deber ser simple en el punto de vista computacional(Colorado ,2008, p. 44).
- Obtención de la matriz de rigidez: En el tercer paso se obtiene la matriz de rigidez de los elementos y el vector de cargas. En relación al modelo de interpolación asumido que en lo posterior es utilizado en condijo de equilibrio(Colorado ,2008, p. 47).
- Ensamble de las ecuaciones: El cuarto paso permite generar las ecuaciones generales de equilibrio. Ecuación 1. El vector de carga y la matriz de rigidez de todos los elementos se ensambla para obtener las ecuaciones de equilibrio. Estas se presentan como:

$$[K]\vec{U} = \vec{F} \quad (1)$$

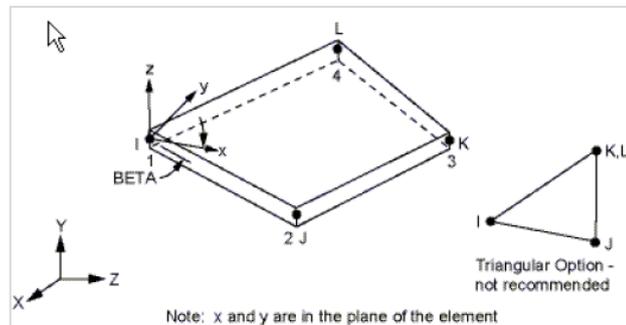
Donde:  $[K]$  es la matriz de rigidez ensamblada,  $\vec{F}$  vector de fuerzas nodales y  $\vec{U}$  el vector de desplazamientos nodales.

- Solución de los desplazamientos nodales: Las ecuaciones de equilibrio ensamblados, cumplen las condiciones de contorno del problema, a su vez se obtiene la solución de los desplazamientos nodales.

En la actualidad con la ayuda del software se oculta los pasos antes mencionados, ya que la herramienta del software de método de elementos finitos divide en tres partes que proporciona una mayor sencillez, estas etapas son; el pre-proceso, proceso o ejecución y el pos-proceso.

### 1.13. Tipos de elementos

Los elementos tipo Shell y elementos tipo solido 3D se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales). El elemento tipo Shell, según (García Gayol ,2009, p. 54) se utiliza para el análisis con deformaciones plásticas.

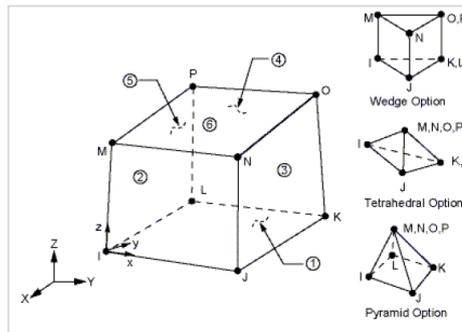


**Figura 8-1:** Elemento tipo Shell (4) y (3) nodos.

Fuente: (García Gayol ,2009, p. 54)

Estos elementos permiten las cargas normales y en el plano, ya que el componente estructural se comporta como una chapa, por lo tanto, se utiliza los elementos tipo Shell, estos elementos poseen 3(tres) o 4(cuatro) nodos y doce grados de libertad, en la figura 8-1 se muestra el modelo del elemento tipo Shell.

El elemento tipo solido 3D, puede usar el espesor asignado del péndulo, para impacto contra el vehículo. Estos elementos solidos 3D se emplean en análisis explícitos (no lineales) el cual poseen 8(ocho) nodos y 9 (nueve) grados de libertad(García Gayol ,2009, p. 50).



**Figura 9-1:** Elemento tipo sólido 3D.

Fuente: (García Gayol ,2009, p. 50)

#### 1.14. Comparación entre métodos implícitos y explícitos.

En un análisis por elementos finitos la solución de un proceso se puede optar por dos métodos diferentes de tiempo implícito y el tiempo explícito, el impacto del péndulo presenta un análisis explícito, sin embargo, se detalla los dos tipos de métodos existentes.

**Método de tiempo implícito:** Este método se aplica para obtener la solución con problemas que estén relacionados a análisis estáticos/ cuasi estáticas. Ecuación 2. Es decir, el análisis de una estructura que presenta cargas permanentes o semipermanentes. En este método los elementos no sufren grandes aceleraciones, la deformación se genera a baja velocidad(Colorado ,2008, p. 44).

$$[K]\vec{U}_{t+\Delta t} = \vec{F}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

Dónde:

[K]: es la matriz de rigidez

$\vec{U}$ : ES el vector de desplazamiento

$\vec{F}$ : Es el vector fuerza

La matriz de rigidez [K] es estable con problemas lineales , los pasos temporales son largos en el análisis y que a su vez disminuye el tiempo del cálculo(Colorado ,2008, p. 44).

**Método de tiempos explícitos:** En el análisis de elementos finitos computacional, este método se aplica para obtener la solución con problemas que estén relacionados a análisis dinámicos, el análisis presenta grandes deformaciones y velocidades, como es el caso de impactos o un proceso

de mecanizado con alta velocidad. Ecuación 3. Las aceleraciones se determinan en un tiempo  $t$  y este método se rige bajo el siguiente modelo matemático (Arroba ,2013, p. 31).

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F_{ext}\} \quad (3)$$

Donde:

$[M]$ : Es la matriz de masa

$[D]$ : Matriz de amortiguación

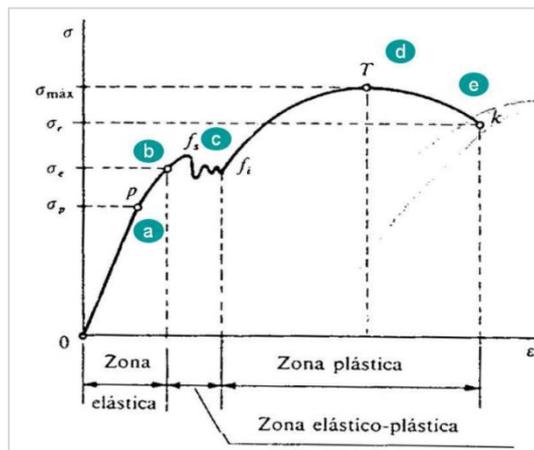
$[K]$ : Matriz de rigidez

$\{u\}$ : Vector Desplazamiento

El método explícito es eficiente en fenómenos rápidos, como el tema de impactos, que son eventos a muy altas velocidades, en particular bastante útil en la simulación de eventos con problemas de no linealidad, involucrándose grandes deformaciones(Arroba ,2013, p. 32).

### 1.15. Problemas no lineales

De acuerdo a (Alonso Henández ,2015, p. 39) los parámetros que se analizan no todos pueden definirse por ecuaciones lineales. El comportamiento de un material de manera lineal es hasta llegar al límite elástico. Sobre este punto se comporta de manera no lineal.



**Figura 10-1:** Curva esfuerzo- deformación.

Fuente: (Alonso Henández ,2015, p. 39)

En el presente estudio se va analizar la deformación de la estructura por medio del impacto del péndulo, también la carga ejercida sobre el travesaño lateral superior de la furgoneta, por lo tanto, en el análisis el material sobrepasa la zona elástica.

### 1.16. Hourglass

El Hourglass es un modo de distorsión, con estados matemáticos físicamente no posibles, de energía cero y no poseen rigidez, estos pueden afectar la precisión de la solución, conduciendo a resultados erróneos de tensión, deformación. Una alta energía de Hourglass comparada con la energía interna del sistema indica que requiere más anulación(Islam, Netula y Singh ,2019, p. 6).

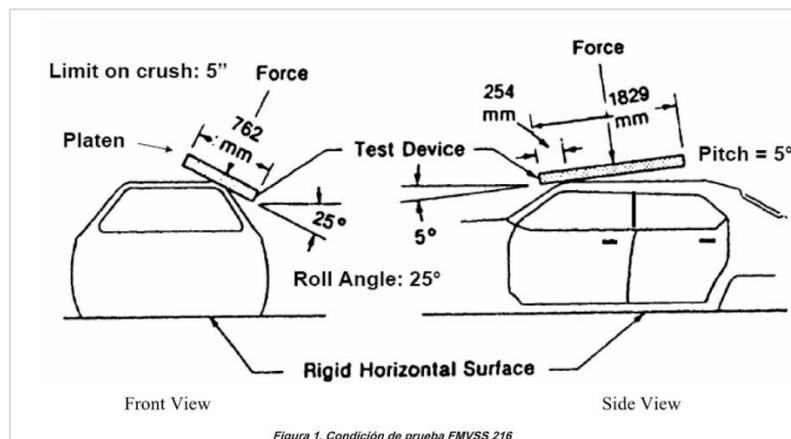
Es importante en la simulación este parámetro, ya que debe ser minimizado en concordancia con la energía interna, que no deberá superar el 10%, siendo el porcentaje ideal el cero. Generalmente se reduce al mejorar la calidad de la malla, en efecto incrementa el tiempo de ejecución del software (Islam, Netula y Singh ,2019, p. 6).

### 1.17. Ensayo de aplastamiento en el techo del vehículo FMVSS-216

El ensayo cuasi estático FMVSS- 216 no tiene vigencia en el Ecuador, estos estudios referentes al ensayo se han realizado por Estados Unidos y gran parte de Europa. En el presente estudio se pretende comparar los resultados de carga-deformación, y la incidencia en el espacio residual con el reglamento CEPE n° 66.

La publicación por NHTSA (Administración Nacional de Seguridad de Trafico en Carretera) en relación al Ensayo FMVSS-216 ha estado en vigor desde 1971. Presenta el requisito de aplastamiento en el techo del vehículo de pasajeros. Originalmente requería que el techo debe soportar una carga de 1.5 veces el peso bruto vehicular, con una deformación no mayor a 127mmde aplastamiento. El mismo estándar se aplica para camionetas y furgonetas(Kulkarni & Marks ,2011, p. 2).

En el año 2009 el mismo estándar se extendió para vehículos con un peso vehicular no superior a las 10.000 libras equivalente a 4,536 toneladas. Esta regla establece que el vehículo debe soportar 1.5 veces el peso bruto vehicular antes de alcanzar 127mm de deformación, la aplicación de la fuerte está ubicado en lado lateral del vehículo (Kulkarni & Marks ,2011, p. 2)..



**Figura 11-1:** Ensayo FMVSS-216.

**Fuente:** (Kulkarni y Marks ,2011, p. 4)

## CAPITULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

En relación al objetivo principal de la investigación, que es analizar la estructura de una furgoneta de tipo M2 aplicando la carga dispuesta del anexo 7 de CEPE R66 mediante la simulación de elementos finitos para el estudio de la deformación y la incidencia en la zona de seguridad del pasajero, adicional con el ensayo FMVSS-216, se procedió a detallar los puntos pertinentes del marco metodológico.

#### 2.1. Diseño de la investigación

**Experimental:** (Bernal ,2010, p. 136) revela que la investigación experimental “analiza el efecto producido por la acción o manipulación de una o más variables independientes sobre una o varias dependientes”. El presente estudio es experimental ya que por medio de la simulación computacional se experimentó el comportamiento de la estructura y la incidencia en el espacio de supervivencia, al impactar o ejercer la carga en el travesaño superior lateral, que es una prueba equivalente al impacto de vuelvo.

**Bibliográfica:** Se realizó una búsqueda de directrices pertinentes, de las diferentes fuentes como libros, manuales, artículos científicos, tesis, página web y documentos relacionados el tema de estudio, por tal motivo es bibliográfica.

#### 2.2. Enfoque de la investigación

**Cuantitativo:** Con base a (Colomé y Femenia ,2018, p. 14).” El fenómeno se describe por medio de los diferentes datos medibles” En el presente proyecto de investigación se muestra un enfoque cuantitativo, debido a la naturaleza de los resultados se presentan con datos medibles a causa del impacto del péndulo o la carga ejercida sobre la estructura de la furgoneta, que a su vez permitió compararse estos valores.

#### 2.3. Alcance de la investigación.

**Descriptivo:** De acuerdo a (Colomé y Femenia ,2018, p. 16) el contexto cuantitativo, permite determinar las características medibles de un objeto, que se considera más relevante en la investigación. Es descriptiva ya que se describió la metodología empleada, así también el comportamiento de la estructura al impactar el péndulo o la carga ejercida.

**Explicativa:** Como expresa(Bernal ,2010, p. 136) “presenta resultados a las causas o motivos generados por los fenómenos en la variable independiente”. la presente investigación en base a los resultados se realizó una explicación si la estructura presenta resistencia para proteger la zona de los pasajeros.

## **2.4. Población y muestra**

**Población:** En concepto la población en el presente estudio hace relación a las furgonetas/VAN perteneciente a la subcategoría M2 de la clasificación vehicular según (NTE INEN 2656 ,2016, p. 6), que están destinados al transporte de pasajeros , con una capacidad mayor a 8 plazas, que no supera 5 toneladas.

**Muestra:** El modelo geométrico presenta las características y dimensiones de la furgoneta, más común en el país, destinada al transporte de pasajeros. Las dimensiones generales se detallan en la tabla 2-2.

## **2.5. Variables de análisis**

### **2.5.1. Variables independientes**

Modelo geométrico de la furgoneta: El en presente estudio, el volumen superficial, conjuntamente con los elementos estructurales de la furgoneta forman parte del modelo geométrico.

### **2.5.2. Variables dependientes**

En base al objetivo principal del presente estudio, se analiza el comportamiento de la estructura por medio del impacto o la carga efectuada en los dos ensayos descritos.

Simulación del impacto del péndulo en el travesañ superior lateral del techo reglamento Anexo 7 CEPE-R66

- Deformación de la estructura
- Desplazamiento resultante
- Comportamiento de las energías: cinética, interna, total
- Incidencia en el espacio de supervivencia
- Energía de Hourglass

Simulación de la carga ejercida en el travesañ superior lateral del techo ensayo FMVSS-216

- Deformación de la estructura
- Desplazamiento resultante
- Comportamiento de las energías: cinética, interna, total
- Incidencia en el espacio de supervivencia.
- Energía de Hourglass

**Tabla 1-2:** Variable dependiente.

| Descripción  | Niveles                            | Indicadores                          | Índice                    |
|--|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Resistencia de la estructura (Furgoneta) con Impacto del péndulo anexo Anexo7 CEPE R66 | Masa del péndulo con 1 tonelada    | Deformación                          | Desplazamiento resultante |
|  | Masa del péndulo Con 1.5 toneladas | Incidencia, espacio de supervivencia | Puntos A,B,C,D,E,F        |
| Resistencia de la estructura (Furgoneta) con Carga ejercida ensayo FMVSS-216           | Carga 1.5 veces PBV                | Deformación                          | Desplazamiento resultante |
|  | Carga 3 veces PBV                  | Incidencia, espacio de supervivencia | Puntos A,B,C,D,E,F        |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020.

## 2.6. Metodología de resolución: modelado, software de elementos finitos

El programa de elementos finitos se caracteriza por la disposición de tres etapas para el desarrollo de todo el procedimiento, estos son:

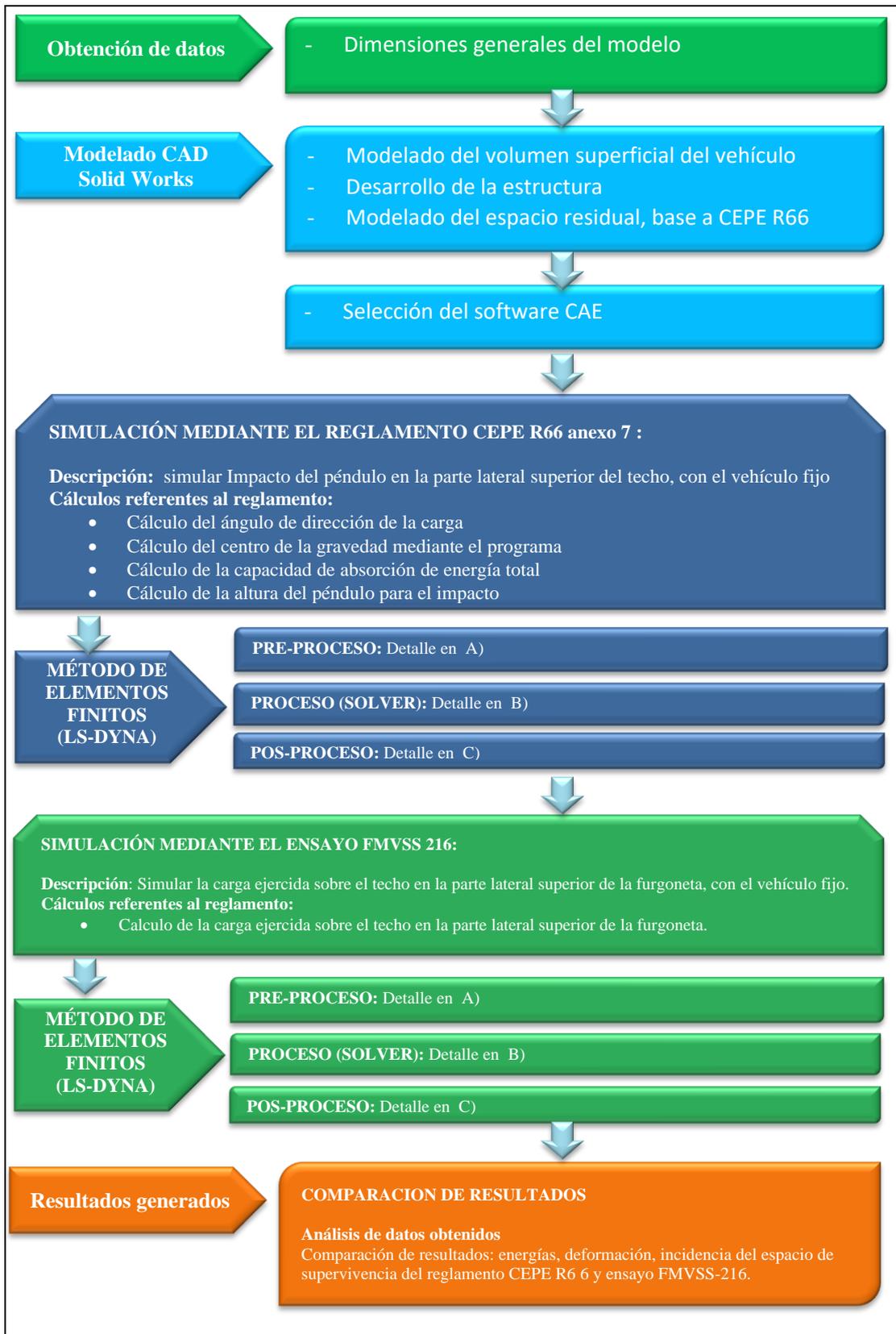
**A) Pre-procesador:** En esta etapa se desarrolla el modelo y se realiza las configuraciones pertinentes para la simulación(Núñez Milán ,2016, p. 41), estas operaciones son:

- Configuración de unidades
- Importar el modelado
- Mallado
- Propiedades del material y espesor de sección de los elementos
- Condiciones de contorno y restricciones
- Asignación de cargas en relación al cálculo
- Condiciones de contacto
- Configuración tiempo de simulación y resultados de salida

**B) Proceso (Ejecución):** En esta segunda etapa el programa realiza el cálculo, en relación a las configuraciones del pre -proceso. En el sol ver se introducen todos los parámetros en el cálculo y genera las ecuaciones internas para mostrar en lo posterior la solución(Núñez Milán ,2016, p. 41).

**C) Pos-proceso:** En esta tercera etapa, se visualiza los resultados ya sea de manera gráfica o numérica para el respectivo análisis(Núñez Milán ,2016, p. 41).

## 2.7. Metodología propuesta



**Figura 1-2:** Esquema metodológico.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

## 2.8. Modelado de la furgoneta en el Software Solid Works.

**Geometría:** Las dimensiones generales se obtuvieron del catálogo de una furgoneta utilizada en el país, se toma cuenta las características generales de la parte estructural de la furgoneta más común en el país, sin señalar a ninguna marca, es importante destacar que no es objeto de estudio entrar en detalle en el diseño del vehículo. Las dimensiones se detallan a continuación.

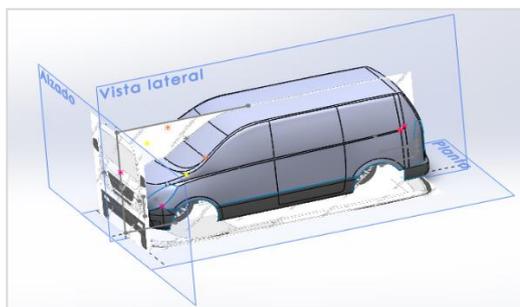
**Tabla 2-2:** Dimensiones generales de la furgoneta

| Características      | Dimensiones |
|----------------------|-------------|
| Distancia entre ejes | 3200mm      |
| Ancho del vehículo   | 1920mm      |
| Altura               | 1935mm      |
| Longitud             | 5125mm      |

Fuente:(Hyundai ,2020)

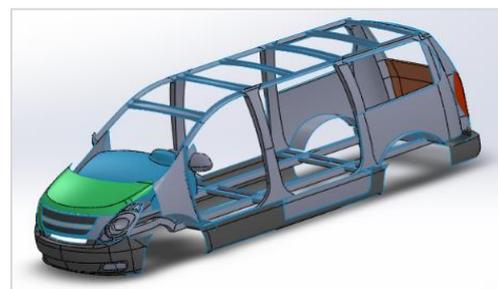
Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

Para el modelado se obtuvieron 4 imágenes con vista frontal, lateral, superior y posterior, en conjunto con las dimensiones generales, permite la obtención de las dimensiones del modelo en el software CAD Solid Works. Se utilizó elemento tipo Shell, base (García Gayol ,2009, p. 53), se utiliza para el análisis con deformaciones plásticas, dinámicos explícitos (no lineales), debido a su bajo consumo computacional. En su inicio se definió el volumen superficial véase figura 2-2, seguido se procedió al coquizado de los elementos estructurales véase Anexo C, figura 3-2 como: parantes, travesaños laterales, travesaño posterior, travesaño frontal, bastidor. El bastidor está conformado por dos largueros y travesaños, ubicados de forma transversal, que a su vez están conectados con los parantes de la furgoneta, que son componentes que soportan la carga y permite una mejor resistencia de la estructura.



**Figura 2-2:** Modelado del volumen superficial.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020



**Figura 3-2:** Coquizado de elementos estructurales.

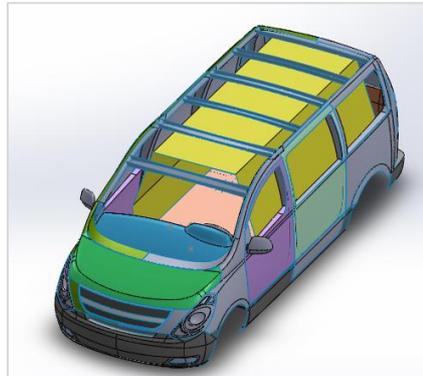
Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

### 2.8.1. Modelado del espacio residual

En base a lo descrito en el capítulo I, del presente documento apartado 1.11, las dimensiones del espacio residual son los mismos para todos los vehículos. El reglamento(CEPE-R66 ,2011, p. 9) en la

sección de requisitos y especificaciones indica las dimensiones del espacio de supervivencia. El espacio de supervivencia o compartimento de viajeros se encuentra en la parte interna.

El compartimento de viajeros figura 4-2, son espacios destinados a ser utilizados por los viajeros(CEPE-R66 ,2011, p. 9). El modelado del espacio de supervivencia que se realizó el programa salid Works, presenta elementos tipo Shell.



**Figura 4-2:** Modelado del espacio residual.

**Realizado por:** Yautibug, Edison, 2020

## 2.9. Herramientas de simulación

### 2.9.1. Metodología de resolución de la herramienta de simulación.

El programa Ansys y Ls-Dyna permiten obtener soluciones a problemas de distinta naturaleza con métodos de resolución diferentes.

**ANSYS:** *Es un programa de elementos finitos que da solución a proceso implícitos, es decir resuelve sistemas estáticos o cuasi-estáticos (fuerzas aplicadas en grandes lapsos de tiempo) en los que el sistema se comporta de forma lineal, se resuelve en una interacción, definida en grandes intervalos de tiempo, ya que la solución converge fácilmente mostrando una gran estabilidad, de manera que utiliza pocos recursos computacionales*(García Gayol ,2009, p. 37).

**LS-DYNA:** *Resuelve procesos explícitos, es decir problemas dinámicos en los que se producen problemas de impactos, de contactos entre superficies, grandes deformaciones y múltiples no linealidades. Como la solución implícita depende del tiempo (el tiempo total del transcurso del proceso se divide en intervalos muy pequeños), el sistema debe resolverse completamente (campos de tensión y deformación) para cada intervalo de tiempo hasta llegar a completar el tiempo total de la simulación. Exige por lo tanto muchos recursos y tiempo del CPU para dar solución, cuyo grado de convergencia depende del número de intervalos en el que se haya dividido el tiempo total*(García Gayol ,2009, p. 37).

### 2.9.2. Ansys en el análisis de problemas no lineales

Ansys LS-DYNA: es un programa de simulación muy utilizado, para simular el comportamiento de los materiales en periodos muy cortos, con cargas severas. Puede simular problemas de deformación extrema con el uso del solucionador explícito. El análisis se puede realizar a través de una pieza o de todo el sistema, una mejor capacidad del computador reduce el tiempo de simulación, así también permite la comprobación del modelo geométrico (Ansys, 2019, p. 1).

**Tabla 3-2:** Ansys en problemas no lineales.

| <b>Capacidad del programa Ansys Ls-Dyna</b>                |   |
|--|---|
|  | <b>Descripción</b>  |
| <b>Análisis estructural no lineal<br/>Explicit Dinamic</b> | Realiza simulaciones de articulaciones sometidas a impacto (caídas o colisiones). Que permiten enlaces cinemáticos, una amplia variedad de formulación de contactos y la interacción entre los componentes del modelo.<br><br>En el que utiliza el solucionador explícito rápido de LS-DYNA para una mejor capacidad de simulación, que no podría resolver utilizando los métodos implícitos.   |
| <b>Workbench Ls-dyna</b>                                   | Tiene integrado el solucionador Ls-Dyna, con el flujo de trabajo del Ansys estándar, utiliza la misma interfaz, con resultados de corto tiempo de respuesta. Utiliza el pre-procesamiento y pos-procesamiento de Ansys.<br><br>El programa Workbench de Ls-Dyna, en su entorno de trabajo, no permite definir el material por el usuario, en el presente proyecto es necesario definir la curva de esfuerzo-deformación del material. |
| <b>Combinación de elementos y contactos</b>                | Contiene una amplia gama de opciones de contacto de Ls-dyna, que detecta de forma automática el contacto entre sólidos, conchas o vigas, el contacto entre parte separadas, elementos individuales, contactos simples y compuestos.   |

Fuente (Ansys, 2019, p. 1)

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

El programa se ha utilizado en diferentes aplicaciones como: la industria automotriz, aeroespacial, interacciones de la estructura del suelo, formado de metales, fluidos incompresibles, y electromagnetismo, en la tabla se muestra los módulos con simulaciones de tiempo explícito (Ansys, 2019, p. 1).

### 2.9.3. *Ls-dyna*

Es un software de elementos finitos, que puede simular situaciones complejas del mundo real, basado principalmente el cálculo de elementos finitos con sistemas no lineales, de una dinámica transitoria, mediante la integración del tiempo explícito(Hernández ,2015, p. 48). El software es utilizado en la industria aeroespacial, construcción, aplicaciones militares, y la industria automotriz. Los problemas de no linealidad del material corresponden a las grandes deformaciones en el objeto de estudio, por otra parte, la dinámica transitoria se refiere a eventos de corto tiempo a alta velocidad, En el presente proyecto se empleó este software para análisis de impacto y la carga que se ejerce sobre la estructura, también pueden realizar otros análisis como: explosiones, manufacturación del material, colisiones entre otros.

El programa fue desarrollado por la empresa Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Los manuales y tutoriales para el uso del programa están disponibles en su página web y se puede descargar gratuitamente. Por otra parte, se programa LS-DYNA tiene el programa de pre y pos-procesamiento llamado LS-PREPOS, disponible de forma gratuita en su página web, que fue fundamental para el desarrollo de este proyecto(Hernández ,2015, p. 49). El programa permite realizar todas las configuraciones y ajustes que corresponde al pre-procesamiento como: el mallado, condiciones de contorno, condiciones de contacto, ajustes de movimiento, tiempo de duración, ajuste de salida de datos. Este módulo también permite analizar los resultados de forma numérica y gráfica. LS-DYNA y LS-PREPOST son programas especializados para el análisis de problemas explícitos no lineales, en el área automotriz se destaca los impactos, accidentes, entre otros.

## 2.10. Simulación del impacto del péndulo base a CEPE R66 anexo 7.

### 2.10.1. *Cálculo del centro de gravedad*

Una de las ventajas del programa LS-PrePost es que permite obtener el CDG, sin embargo, es importante tomar en cuenta previamente el mallado, asignar el espesor de la sección, asignar el material a toda la furgoneta, sin agregar otros elementos que van a formar parte en la simulación. Seleccionar Element Tools > Measure> Inertia, elegir la opción All y activar Global, para medir en base a los ejes global. Véase Anexo A. Los valores obtenidos son:

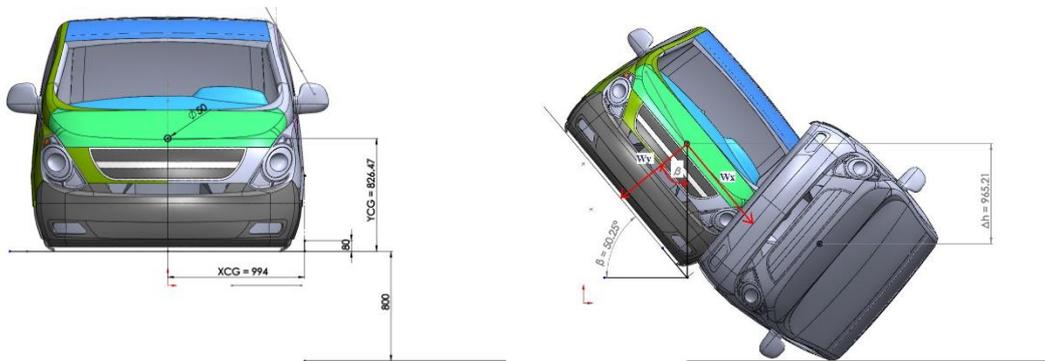
**Tabla 4-2:** Centro de gravedad de furgoneta

|   |        |
|---|--------|
| x | 944    |
| y | 826.47 |
| z | 2813   |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

## Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral y el movimiento vertical del centro de gravedad.

En cuanto al ángulo de inestabilidad lateral se ubicó los puntos encontrados por medio del programa, tabla 4-2. El movimiento del centro de gravedad se giró del punto de pivota miento, (o), Ecuación 4. Donde la inestabilidad se produce en el instante que punto del CDG coincide con la línea vertical del punto de pivote. Seguido en el cálculo del movimiento vertical se debe rotar desde el punto de inestabilidad lateral, hasta que el travesaño superior de la furgoneta tope la rampa inferior, que está ubicada a 800mm debajo del pivote. Figura 5-2. La dimensión del movimiento vertical es determinada por la proyección de líneas horizontales de los dos puntos donde se encuentran los puntos de gravedad(CEPE-R66 ,2011, p. 9).



**Figura 5-2:** Ángulo de inestabilidad lateral y movimiento vertical del CDG.

**Fuente:** Apéndice Anexo 7 (CEPE-R66 ,2011, p. 9)

**Realizado por:** Yautibug, Edison, 2020

$$\sum M = 0, \quad N = 0 \quad (4)$$

$$-XCG.Wy + YCG.Wx = 0 \quad (5)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{XCG}{YCG}\right) \quad (6)$$

El ángulo de inestabilidad se determina en el instante que el centro de gravedad del vehículo, al rotar está completamente vertical en relación al punto del pivote. Ecuación 5, Ecuación 6. En el que el valor  $\beta$  es igual a  $50.25^\circ$ , a su vez el movimiento vertical  $\Delta h$  es igual a 965.21mm, cálculo que en lo posterior se utiliza para determinar la energía total que absorbe la estructura.

### 2.10.2. Cálculo de la energía total que absorbe estructura.

En relación al literal 4.2.1 Anexo 7 (CEPE-R66 ,2011, p. 34). Ecuación 7. Define que la fórmula para determinar la energía total que absorbe la estructura es:

$$E_T = 0.75Mg\Delta h \quad (7)$$

Para el cálculo el valor de (M) se tomó peso bruto vehicular que tiene el vehículo. Seguido de la gravedad (g) que es de  $9.81\text{m/s}^2$  y el movimiento vertical(  $\Delta h$  ) es de 956.21 mm.

### 2.10.3. Cálculo de la dirección de la carga aplicada

En relación a lo indicado por el anexo 7 (CEPE-R66, 2011, p. 32) literal 3.2.2 el cálculo de la dirección de la carga. Ecuación 8. Depende del plano central longitudinal vertical, el cual indica que el ángulo de inclinación  $\alpha$  se determina con la fórmula descrita en el presente apartado.  $H_c$  es la altura medida desde el plano horizontal sobre el cual se encuentra el vehículo al travesaño superior.

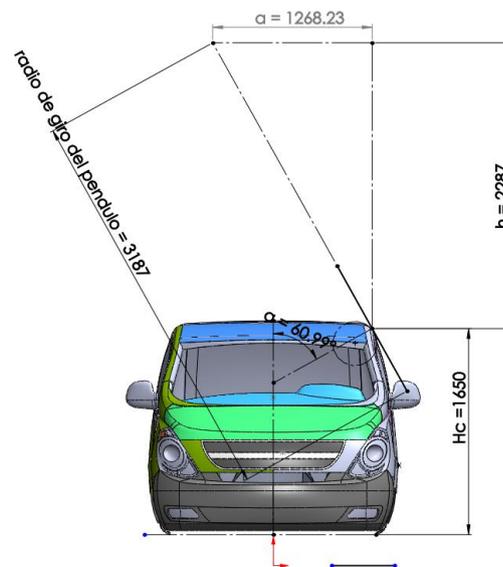
$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{800}{H_c}\right) \quad (8)$$

**Tabla 5-2:** Tabla de resultados, cálculos.

| Magnitud   | Valor    | Unidad           | Observación  |
|------------|----------|------------------|--|
| $\beta$    | 50.25    | °                | ángulo de estabilidad Apéndice anexo7 (CEPE-R66, 2011)                       |
| $\Delta h$ | 0.965    | m                | Movimiento vertical del CDG Calculada en SW                                  |
| $m$        | 3160     | Kg               | Según ficha técnica PBV  |
| $g$        | 9.8      | m/s <sup>2</sup> | Gravedad   |
| $E_t$      | 22413.09 | N.m              | Energía total absorbe la estructura, ANEXO 7, literal 4.2.1. Según CEPE R66. |
| $H_c$      | 1650     | mm               | Calculada en SW  |
| $\alpha$   | 60.99    | °                | Ángulo dirección de carga aplicada ANEXO 7, literal 3.2.2. Según CEPE R66    |
| $m_p$      | 1000     | Kg               | Masa del péndulo   |
| $h$        | 2.287,05 | m                | Ecuación energía potencial   |
| $a$        | 1268.23  | mm               | Calculada en SW  |

Fuente: Fórmulas anexo 7 (CEPE-R66, 2011, p. 32)

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020



**Figura 6-2:** Altura del péndulo por SW.

Fuente: Apéndice Anexo 7 (CEPE-R66, 2011, p. 32)

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

#### 2.10.4. Configuración de unidades

Como expresa (Núñez Milán ,2016, p. 50).La configuración de unidades en el programa LS-PrePost es de suma importancia, ya que se debe tener consistencia en relación al funcionamiento del programa. El programa interpreta directamente valores. Es por ese motivo que el usuario debe comprobar las unidades.

La configuración de unidades, al abrir Ls-PrePost se selecciona a Settings> Post settings> HIC/CSI Constant> unidades de tiempo seleccionar sec > contante gravitacional de 9810 mm/s<sup>2</sup>, al importar el modelado es importante comprobar los valores consistentes tabla 6-2y anexo A.

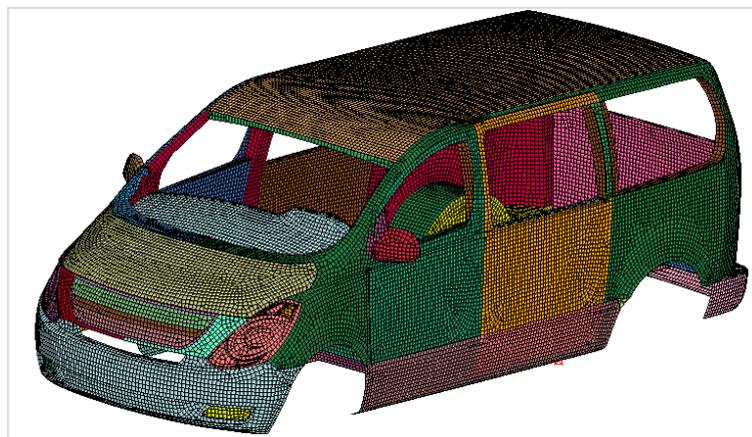
**Tabla 6-2:** Magnitudes consistentes en el programa.

| Magnitudes | Unidad de medida | Símbolo |
|------------|------------------|---------|
| Masa       | toneladas        | Tn      |
| Tiempo     | Segundos         | s       |
| Longitud   | Milímetros       | mm      |
| Fuerza     | Newton           | N       |
| Tensión    | Mega Pascales    | Mpa     |
| Energía    |                  | N.mm    |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

#### 2.10.5. Importación de la furgoneta y mallado

El modelado de la furgoneta se importó al programa LS-PrePost con formato STEP, Seguido se realiza el mallado, para ello se seleccionó Element and Mesh>Auto Mesher, esta opción genera un mallado automático de elementos cuadrados y triángulos tipo Shell 2D de con tamaño óptimo que considera (Chirwa, Li y Qian ,2015, p. 6) de 25mm. véase figura 7-2 y Anexo A.

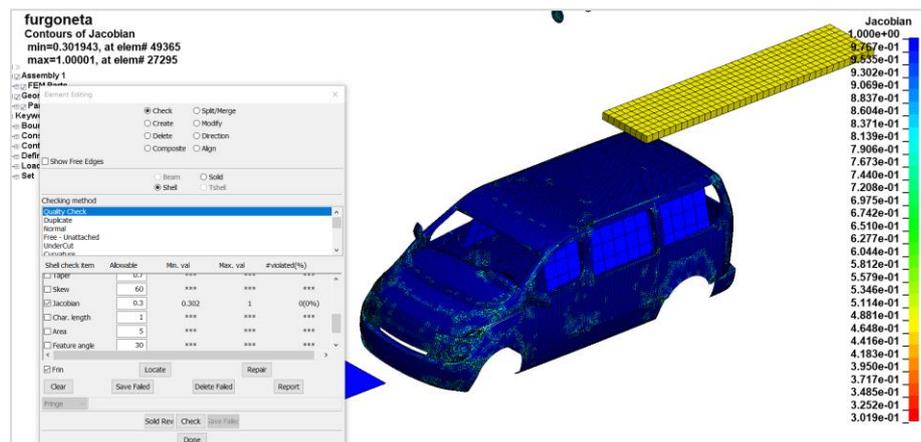


**Figura 7-2:** Mallado de la furgoneta.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

Conviene especificar que en la comprobación de la malla se verificó la existencia de nodos duplicados, puesto que generan error en las simulaciones, para ello se seleccionó Element Tools, >Duplicate Nodes, en la ventana que se muestra con Merge Dup Nodes, se unificó los nodos duplicados. La calidad de la malla se comprobó seleccionando Model>Checking>Quality Check por el criterio de Jacobiano con un índice de 0.3, en el proceso de mejorar la malla, se puede realizar de forma manual, es importante una calidad alta, para la precisión de los resultados.

Seguido se importó los demás elementos que forman parte de la simulación. El tamaño del elemento tipo Shell 2D para el espacio de supervivencia de 200mm, para el péndulo elemento tipo Solid 3D, con un tamaño de malla de 25mm. véase la figura 8-2. Como afirma (Carman ,2014, p. 2), los elementos triangulares tienen mayor adaptabilidad en zonas curvas, pero presenta mayor densidad que incrementa el tiempo de simulación, a diferencia de los elementos de geometría rectangular con adaptabilidad en zonas planas, sin ningún problema , con menor consumo de recurso computacional, seguido se recomienda guardar el archivo con formato .K.



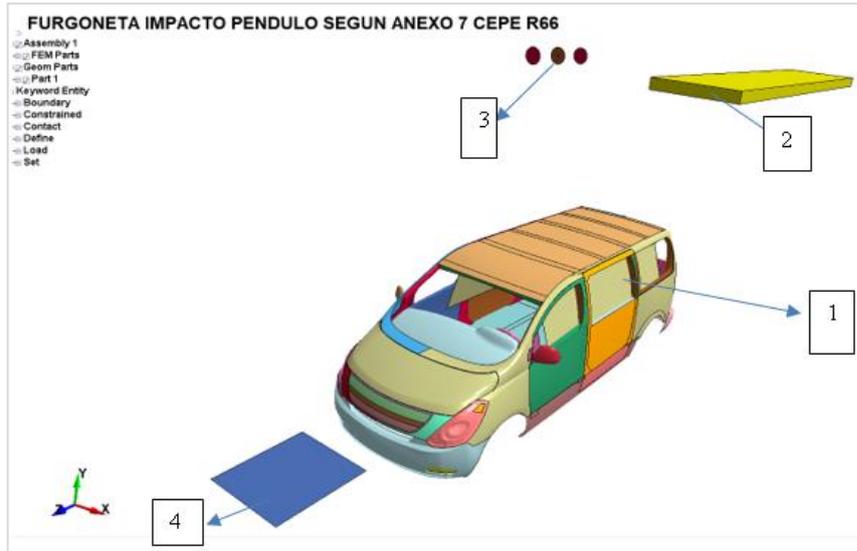
**Figura 8-2:** Mallado de todos los elementos.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

**Tabla 7-2:** Resultados de mallado para simulación impacto por péndulo.

| Componente      | Total de elementos | Numero de nodos | Tipo de elementos |
|-----------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| Modelo completo | 79561              | 77967           | Shell y Solid     |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020



**Figura 9-2:** Descripción de los elementos para simulación, Impacto péndulo.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

**Tabla 8-2:** Descripción, tipo de elemento, tipo de material.

| No | Descripción            | Tipo de elemento | Tipo de material    | Observación                                       |
|----|------------------------|------------------|---------------------|---|
| 1  | Furgoneta              | Shell 2D         | No lineal con falla |   |
| 2  | Péndulo                | Solid 3D         | Rígido              |   |
| 3  | Eje de giro de péndulo | Shell 2D         | Rígido              |   |
| 4  | Referencia piso        | Shell 2D         | Rígido              | Se utiliza para generar estabilidad en simulación |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

### 2.10.6. Propiedades del material utilizado

Respecto a las propiedades del material en la tabla 8-2, se muestra las propiedades asignadas en la furgoneta y el péndulo, seguido se detalló las propiedades de los elementos.

#### Propiedad del material utilizado en la estructura de la furgoneta

La propiedad del material que se empleó en el proyecto corresponde a la parte estructural de un automóvil Toyota Yaris 2010, que fue desarrollado por NCAC (Centro Nacional de análisis de Choques) de la Universidad George Washington en Virginia y se ha utilizado para varios programas de NHTSA (Administración Nacional de Seguridad de Tráfico en Carreteras.). Existen diferentes modelos disponibles en la página web para todo el público (NHTSA, 2013, p. 2). Se obtuvieron dos curvas con la propiedades que se detalla en la tabla 9-2, tabla 10-2.

**Tabla 9-2:** Propiedades del material, recubrimiento externo.

|                                  |                      |                     |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|
| Densidad                         | $7.8 \times 10^{-9}$ | Ton/mm <sup>3</sup> |
| Módulo de elasticidad            | $2 \times 10^5$      | Mpa                 |
| Radio de Poisson                 | 0.3                  | s/u                 |
| Límite de fluencia               | 271                  | MPa                 |
| Resistencia a la tracción máxima | 390                  | Mpa                 |

Fuente: Modelos de NCAC (NHTSA ,2013, p. 2).

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

**Tabla 10-2:** Propiedades del material, elemento estructural.

|                                  |                      |                     |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|
| Densidad                         | $7.8 \times 10^{-9}$ | Ton/mm <sup>3</sup> |
| Módulo de elasticidad            | $2 \times 10^5$      | Mpa                 |
| Radio de Poisson                 | 0.3                  | s/u                 |
| Límite de fluencia               | 350                  | MPa                 |
| Resistencia a la tracción máxima | 650                  | Mpa                 |

Fuente: Modelos de NCAC (NHTSA ,2013)

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

El modelo del material en base (Karliński et al. ,2014; García Gayol ,2009, p. 56). Es un modelo de ecuación elasto plástico que relaciona la tensión de fluencia con la deformación, incluye el efecto de velocidad de deformación, común para el acero. Se seleccionó Model and Part>Keyword Manager >MAT>024-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY, seguido se ingresó las curvas y propiedades del material de las tablas 9-2,10-2 indistintamente En el Anexo A. Se observa en más detalle.

Al relacionar la curva y propiedades del material del recubrimiento externo (DIPAC ,2021, p. 1) da a conocer las propiedades del material estructural laminado acero ASTM A36 con límite de fluencia 250MPa y la resistencia máxima a la tracción de 400 a 550 MPa, es un acero aleado de una composición química de carbono, magnesio, fósforo, azufre, silicio y cobre. Según (Ramirez ,2016) el carbono es el principal elemento que proporciona dureza y alta resistencia al acero. El magnesio al combinarse con azufre aumenta la capacidad en el endurecimiento. El fósforo presenta gran resistencia la tensión, contribuye a la corrosión, pero dificulta la soldadura. El azufre mejora la maquinabilidad. El cobre aumenta la resistencia a la corrosión.

Las propiedades relacionados al material del elemento estructural (DIPAC ,2021, p. 1) indica las propiedades del material estructural laminado acero ASTM A570 G50 presenta un límite de fluencia 350MPa , resistencia máxima a la tracción mayor a 450MPa,es un acero aleado con una composición de carbono, magnesio, fósforo, azufre.

Después de ingresar las propiedades del material, Se creó una sección tipo Shell con base a (Chirwa, Li y Qian ,2015; Wicaksono et al. ,2017) se asignó con espesor de 2mm para toda la estructura y recubrimiento, y de 3mm para los travesaños inferiores y largueros. Para ello se selecciona Model and Part>Keyword Manager >SECTION>SHELL, más detalle en el anexo 3. El material y la sección que se crearon se asignó al recubrimiento externo y la estructura de la furgoneta, indistintamente, para ello se seleccionó: Model and Part >Part Data >Assign, véase anexo A.

### **Propiedades del material utilizado en el péndulo**

El modelo del material (*RIGID*) como dice (García Gayol ,2009, p. 59)es un cuerpo sólido, idealizado en un tamaño determinado, que no presenta deformación alguna, únicamente transmite la masa aplicada sobre la estructura, independiente de las fuerzas externas aplicadas sobre el cuerpo, disminuye los tiempos de solución, permite el mallado con un tamaño relativamente grande, reduciendo así el tiempo computacional. La densidad asignada en el péndulo se insertó para que tenga 1 Ton masa, Las dimensiones del mismo abarca toda área lateral de la estructura con 3900 mm de longitud, 76mm de ancho y 100 mm de espesor. Se seleccionó Model and Part>Keyword Manager>MAT>020-RIGID, de modo similar se ingresó las propiedades de la tabla 11-2.

**Tabla 11-2:** Propiedades del material rígido, péndulo.

|                       | <b>Valor</b>           | <b>Unidad</b>       |
|-----------------------|------------------------|---------------------|
| Densidad              | $3.370 \times 10^{-9}$ | Ton/mm <sup>3</sup> |
| Módulo de elasticidad | $2.10^5$               | MPa                 |
| Radio de Poisson      | 0.3                    | s/u                 |

**Realizado por:** Edison, Yautibug, 2020

La sección asignada para el péndulo se idealiza con el mismo espesor del cuerpo rígido. Se seleccionó Model and Part>Keyword Manager >SECTION>SOLID, manteniéndose la configuración del miso en default. La propiedad y el material creados se asignó al péndulo seleccionando Model and Part >Keyword Manager >PART> PART. En el eje de giro del péndulo y la referencia se tiene un elemento tipo Shell 2D, tiene una sección de 2mm, el cual no presenta deformación, como también la referencia, se ingresa en base a lo descrito en párrafos anteriores

#### **2.10.7. Condiciones de contorno y restricciones**

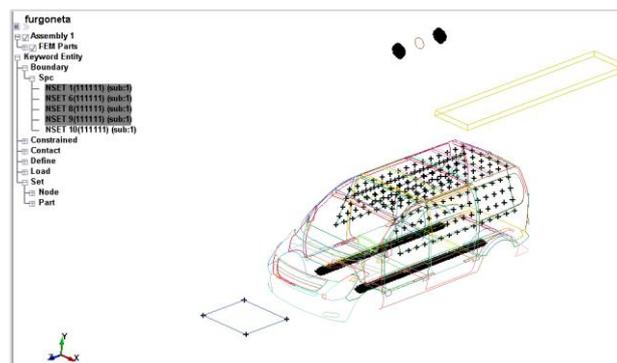
Las configuraciones de contorno y restricciones pertinentes son la parte esencial en la simulación, para ello primero configuró movimiento del péndulo, seguido las restricciones al movimiento de la furgoneta que deberá permanecer inmóvil durante el impacto generado por el péndulo.

## Configuraciones para el movimiento del péndulo

En base al(Manual Keyword Ls-Dyna ,2014, p. 814) `CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET` permite definir nodos adicionales para cuerpos rígidos, permitiendo generar soportes para el giro del péndulo. Posterior la opción `CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE`, permite generar rotaciones alrededor de los soportes (Manual Keyword Ls-Dyna ,2014, p. 814).A continuación la fusión de dos cuerpos rígidos con `CONSTRAINED_RIGID_BODIES`, permite definir un cuerpo rígido esclavo (péndulo), con otro cuerpo rígido maestro (soportes-junta) (Manual Keyword Ls-Dyna ,2014, p. 814).

## Restricciones, condiciones de contorno

En la simulación, se restringe el movimiento rotacional, traslacional de los elementos como: bastidor, los soportes del eje de giro del péndulo, el piso referencial, el espacio residual. Para ello se seleccionó `Model and Part>Entity Creation>Boundary>Spc>Cre>ByPart`, la última opción varia, dependiendo del punto a restringir (Manual Keyword Ls-Dyna ,2014, p. 1024). Para la activación se selecciona la restricción de rotación y traslación en todos los ejes locales véase figura 10-2.



**Figura 10-2:** Partes restringidas para la simulación.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

### 2.10.8. Condiciones de contacto

El programa contiene contactos realistas entre componentes o partes del análisis explícito según (García Gayol ,2009, p. 63). Es importante generar conjuntos o `SET_PART_LIST`, para definir el al elemento que recibe y del que genera el impacto. Se seleccionó `Model and Part>Entity creation>SetData>*SET_PART>Area`, para generar estos dos grupos véase Anexo A.

### Condiciones de contacto utilizados

**Contacto automático de superficie única:** Se establece cuando una superficie de un cuerpo hace contacto ella misma, o con superficie externa de otro cuerpo. Las fuerzas en las superficies son iguales a cero(García Gayol ,2009, p. 63).Para aquello se selecciona `Model and Part >Keyword Manager>CONTACT>AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE`.

**Contacto de superficie a superficie** (*AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE*): Se establece cuando la superficie de un cuerpo penetra en la de otro, este tipo de contacto permite grandes deformaciones, funciona bien en área de contacto relativamente grandes, no tiene restricciones en cuanto a la geometría de las áreas en contacto. Se utiliza componentes nodales o partes para establecer las superficies de contacto (García Gayol, 2009, p. 63). En la superficie esclava se genera la deformación, sin embargo la superficie maestra no presenta deformación, ya que es un elemento rígido. Los coeficientes estático y dinámico son de 0.3 y 0.2 respectivamente. véase anexo A.

### **Opciones de contacto**

De acuerdo con (García Gayol, 2009, p. 65) la opción *DEFORMABLE\_TO\_RIGID* al iniciar el cálculo, transforma propiedades deformables a rígidos, los materiales rígidos presentan menor cantidad de cálculos en la simulación y disminuye los recursos computacionales. En el descenso del péndulo hasta antes de contacto entre superficies no presentará ninguna deformación por aquello se puede transformó todos los elementos deformables a rígidos.

En el instante que el péndulo impacta al travesañ superior se requiere que la furgoneta retome la propiedad original deformable de forma automática, con el fin de obtener resultados numéricos. Como expresa (García Gayol, 2009, p. 65) la opción *DEFORMABLE\_TO\_RIGID\_AUTOMATIC* al presentarse el contacto entre las dos superficies, revisa y evalúa las dos caras de los elementos Shell y permite el contacto entre cuerpos rígidos y deformables.

#### **2.10.9. Asignación de cargas**

El péndulo desciende por efecto de la gravedad, para ello, se asignó la curva con el valor de la aceleración constante de  $9800\text{mm/s}^2$ . se seleccionó Model and Part> Keyword Manager> DEFINE>CURVE, seguido se generó la curva constante de la gravedad con 9800 en el eje vertical y un rango de tiempo de 0 a de 1000 en el eje horizontal, véase anexo A.

En segunda instancia se define la dirección que va tener la carga, para ello se seleccionó Model and Part> Keyword Manager> LOAD> BODY\_Y. La última opción define la dirección que tiene la gravedad en relación a la altura de la estructura, insertando en esta opción la curva de gravedad creada con anterioridad.

#### **2.10.10. Configuración de tiempo de simulación y resultados de salida**

**Control de tiempo:** Se asigna tiempo que durará la simulación, no requiere que coincida con la del proceso. Hay ocasiones en el que tarda mucho la simulación, sin ser necesario, por ello se elige un tiempo que interesa analizar (García Gayol, 2009, p. 70).

El tiempo de simulación en el tema de impacto de acuerdo a (Chirwa, Li & Qian ,2015; Wicaksono et al. ,2017) tiene una duración de 0.3s tomando en cuenta el descenso del péndulo se asignó, un tiempo de simulación de 1s. Se seleccionó Keyword Manager >CONTROL> TERMINATION. El valor se asignó en el parámetro END TIME, como señala (Núñez Milán ,2016, p. 65).

**Control de energías:** Esta opción permite activar el cálculo de las energías, que se presentan durante la simulación, incluido la energía de Hourglass, estos archivos se informan en ASCII de DATABASE\_OPTIONS(Manual Keyword Ls-Dyna ,2014, p. 1110) véase anexo A.

**Control de Hourglass:** En esta opción se seleccionó, el coeficiente de Hourglass que se presenta con valores positivos cercanos a cero, en este caso 0.05, este coeficiente no debe ser mayor a 0.15 que puede causar inestabilidad en los resultados(Manual Keyword Ls-Dyna ,2014, p. 1269).

**Control del tamaño del paso de tiempo:** define del paso de tiempo para las soluciones de cálculo, de modo similar el estudio de (Illescas Pérez ,2009, p. 93) se ingresó un paso de tiempo de  $1.0 \mu s$ .

**Configuración de datos de salida:** para los resultados de deformación se activa DATABASE, que genere archivos con la información de los resultados. Se ingresó un incremento de tiempo 10ms en base (Illescas Pérez ,2009, p. 67). Se seleccionó DATABASE>BINARY\_D3PLOT, para los resultados de deformación. El resultado del comportamiento de las energías se habilita en ASCII de DATABASE\_OPTIONS, con el intervalo similar al presente párrafo.

#### ***2.10.11. Ejecución en base a las configuraciones del pre-proceso.***

Se dio inicio al procesamiento dirigiéndose a la ventana del programa, donde se seleccionó el icono start LS-DYNA analysis> seleccionar el archivo> seleccionar la capacidad del computador > ejecutar la simulación. El tiempo de procesamiento computacional que se empleó para ejecutar es de 4 horas con 32 minutos, utilizándose un computador Intel Core i5, de 4 núcleos cada uno con 2.20GHz y 4 Gb de memoria RAM, los resultados se muestran en el capítulo III.

#### ***2.10.12. Pos-proceso obtención de graficas***

En esta etapa se visualizó los resultados numéricos y gráficos de la simulación, los pasos requeridos son: Abrir LS-PREPOST>File >open>LS-DYNA Binary Plot, seguido se obtuvo los resultados que se requieren para el análisis, en el capítulo III se presentó los resultados de forma detallada.

## **2.11. Simulación de la carga ejercida Ensayo FMVSS-216**

### **2.11.1. Cálculo de la carga ejercida para el ensayo FMVSS-216**

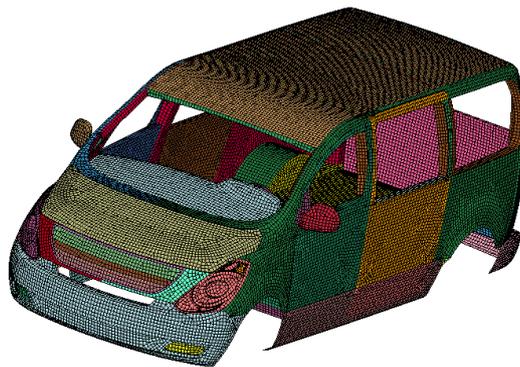
En base a la carga indicada en el ensayo FMVSS-216, la carga ejercida en el techo, específicamente en el travesaño superior lateral del vehículo, debe soportar una carga de 1.5 veces el peso bruto vehicular, con un peso bruto vehicular de 3160kg se obtuvo una fuerza de 46452N. El estándar se aplica para camionetas y furgonetas(Kulkarni & Marks ,2011, p. 2).

### **2.11.2. Configuración de unidades**

Es importante recordar la configuración de unidades en el programa de acuerdo a la tabla 6-2 que se mencionó en el procedimiento de la simulación anterior. De acuerdo a (Núñez Milán ,2016, p. 50). La configuración de unidades debe tener consistencia en relación a la operatividad del programa.

### **2.11.3. Importación de la furgoneta y mallado**

De modo similar a las configuraciones del reglamento anterior, el modelado de la furgoneta se importa al programa LS-PrePost con formato STEP, Seguido se realiza el mallado, en el que se selecciona Element and Mesh>Auto Mesher, esta opción genera un mallado automático con elementos cuadrados y triángulos tipo Shell 2D, como considera (Chirwa, Li y Qian ,2015; Karliński et al. ,2014) el tamaño del mallado es de 25mm. Con el fin de comparar la resistencia de la estructura se tomó el modelo mallado del procedimiento anterior. véase figura 11-2 y anexo B.



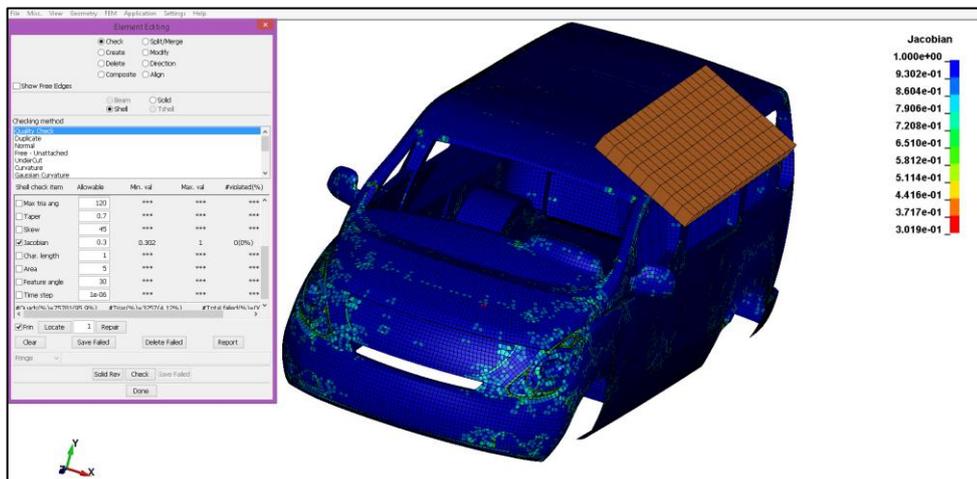
**Figura 11-2:** Importación, Mallado de la furgoneta.

**Realizado por:** Yautibug, Edison, 2020

En forma similar en la comprobación de la malla se verificó la existencia de nodos duplicados, que generan error en las simulaciones, para ello se seleccionó Element Tools, >Duplicate Nodes, en la ventana que se muestra con Merge Dup Nodes, se unificó los nodos duplicados.

Por otra parte, la calidad de la malla se comprobó seleccionando Model>Checking>Quality Check por el criterio de Jacobiano con un índice de 0.3, como se menciona en el procedimiento del reglamento anterior, cabe recalcar que, en el proceso de mejorar la malla, se puede realizar de forma manual, una calidad alta, presenta mayor precisión de los resultados. Véase anexo B.

En la simulación del ensayo FMVSS-216, después del mallado de la estructura, se importa las partes que intervienen en la simulación como es: el espacio de supervivencia Shell 2D con un tamaño de 200mm. La platina rígida de tipo solido 3D con un tamaño de 100mm, figura 12-2. Ciertamente (Carman ,2014, p. 2) afirma que los elementos triangulares presentan mayor adaptabilidad en zonas curvas, pero tiene mayor densidad que incrementa el tiempo de simulación, de otro modo los elementos de geometría rectangular tienen mayor adaptabilidad en zonas planas, sin ningún problema , destacando un menor recurso computacional, seguido se recomienda guardar el archivo con formato .K.



**Figura 12-2:** Mallado de todos los elementos.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

**Tabla 12-2:** Resultados de mallado para simulación ensayo FMVSS-216.

| Componente      | Total de elementos | Numero de nodos | Tipo de elementos |
|-----------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| Modelo completo | 79190              | 77607           | Shell y Solid     |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

**Tabla 13-2:** Descripción, tipo de elemento, tipo de material.

| No | Descripción              | Tipo de elemento | Tipo de material    | Observación |
|----|--------------------------|------------------|---------------------|-------------|
| 1  | Furgoneta                | Shell 2D         | No lineal con falla |             |
| 2  | Platina                  | Solid 3D         | Rígido              |             |
| 3  | Espacio de supervivencia | Shell 2D         | Rígido              |             |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

#### 2.11.4. Propiedades del material utilizado

Respecto a las propiedades del material en la tabla 13-2, se asignó las mismas propiedades del material empleado en la simulación anterior, las propiedades asignadas en la furgoneta y la platina, se detalla a continuación.

#### Propiedad del material utilizado en la estructura de la furgoneta

Como se mencionó con anterioridad, la propiedad del material corresponde a la parte estructural de un automóvil Toyota Yaris 2010, que fue desarrollado por NCAC (Centro Nacional de análisis de Choques) de la Universidad George Washington en Virginia y se ha utilizado para varios programas de NHTSA (Administración Nacional de Seguridad de Tráfico en Carreteras.). Existen diferentes modelos disponibles en la página web para todo el público(NHTSA ,2013, p. 2).Se obtuvieron dos curvas con la propiedades que se detalla en la tabla 14-2, tabla 15-2.

**Tabla 14-2:** Propiedades del material, recubrimiento externo.

|                                  |                      |                     |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|
| Densidad                         | $7.8 \times 10^{-9}$ | Ton/mm <sup>3</sup> |
| Módulo de elasticidad            | $2 \times 10^5$      | Mpa                 |
| Radio de Poisson                 | 0.3                  | s/u                 |
| Límite de fluencia               | 271                  | MPa                 |
| Resistencia a la tracción máxima | 390                  | Mpa                 |

Fuente: Modelos de NCAC (NHTSA ,2013, p. 2).

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

**Tabla 15-2:** Propiedades del material, elemento estructural.

|                                  |                      |                     |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|
| Densidad                         | $7.8 \times 10^{-9}$ | Ton/mm <sup>3</sup> |
| Módulo de elasticidad            | $2 \times 10^5$      | Mpa                 |
| Radio de Poisson                 | 0.3                  | s/u                 |
| Límite de fluencia               | 350                  | MPa                 |
| Resistencia a la tracción máxima | 650                  | Mpa                 |

Fuente: Modelos de NCA(NHTSA ,2013, p. 2).

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

De igual forma el modelo del material en base (Karliński et al. ,2014; García Gayol ,2009, p. 56).. Presenta un modelo elasto plástico que relaciona la tensión de fluencia con la deformación, incluye el efecto de velocidad de deformación, común para el acero. Se seleccionó Model and Part>Keyword Manager >MAT>024-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY, del mismo modo se ingresó las curvas y propiedades del material de las tablas 14-2,15-2 indistintamente. En el Anexo B. Se observa en más detalle.

En forma similar se relaciona la curva y propiedades del material del recubrimiento externo (DIPAC ,2021, p. 1) menciona que las propiedades del material estructural laminado acero ASTM A36 con límite de fluencia 250MPa y la resistencia máxima a la tracción de 400 a 550 MPa, es un acero aleado de una composición química de carbono, magnesio, fósforo, azufre, silicio y cobre. Según (Ramirez ,2016, p. 2) el carbono es el principal elemento que proporciona dureza y alta resistencia al acero. El magnesio al combinarse con azufre aumenta la capacidad en el endurecimiento. El fósforo presenta gran resistencia la tensión, contribuye a la corrosión, pero dificulta la soldadura. El azufre mejora la maquinabilidad. El cobre aumenta la resistencia a la corrosión.

En cuanto a las propiedades relacionados al material del elemento estructural(DIPAC ,2021, p. 1) señala las propiedades del material estructural laminado acero ASTM A570 G50 presenta un límite de fluencia 350MPa , resistencia máxima a la tracción mayor a 450MPa,es un acero aleado con una composición de carbono, magnesio, fósforo, azufre.

De igual forma después de ingresar las propiedades del material, Se creó una sección tipo Shell con base a (Chirwa, Li y Qian ,2015; Wicaksono et al. ,2017) se asignó con espesor de 2mm para toda la estructura y recubrimiento, y de 3mm para los travesaños inferiores y largueros, donde se seleccionó Model and Part>Keyword Manager >SECTION>SHELL, El material y la sección que se crearon se asignó al recubrimiento externo y la estructura de la furgoneta, indistintamente, para ello se seleccionó: Model and Part >Part Data >Assign, véase Anexo B.

### **Propiedades del material elemento sólido**

Del mismo modo , el modelo del material (RIGID) como menciona (García Gayol ,2009, p. 59) es un cuerpo sólido, idealizado con su tamaño determinado, independiente de las fuerzas externas aplicadas sobre el cuerpo, no presenta deformación alguna, transmite la carga aplicada sobre la estructura y permite el mallado con un tamaño relativamente grande, reduciendo así el tiempo computacional. La platina respecto al ensayo FMVSS-216 presenta 1829 mm de longitud, 762mm de ancho. Con el detalle de 25° de balanceo y de 5° del ángulo de caída según lo descrito por

(Kulkarni & Marks ,2011). Se seleccionó Model and Part>Keyword Manager>MAT>020-RIGID, de modo similar se ingresó las propiedades de la tabla 16-2 y anexo B.

**Tabla 16-2:** Propiedades del material rígido.

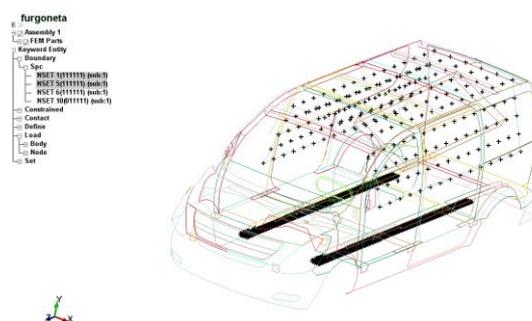
|                       | Valor                | Unidad              |
|-----------------------|----------------------|---------------------|
| Densidad              | $7.8 \times 10^{-9}$ | Ton/mm <sup>3</sup> |
| Módulo de elasticidad | 0.3                  | MPa                 |
| Radio de Poisson      | 0.3                  | s/u                 |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

La sección asignada para el elemento sólido se idealiza con el mismo espesor del cuerpo rígido. Se seleccionó Model and Part>Keyword Manager >SECTION>SOLID, manteniéndose la configuración del miso en default, de igual forma la sección y el material creados se asignó al elemento sólido para ello se seleccionó Model and Part >Keyword Manager >PART> PART.

### 2.11.5. Condiciones de contorno y restricciones

Las configuraciones de contorno y restricciones pertinentes son la parte esencial en la simulación, para ello se restringió el movimiento de la furgoneta que deberá permanecer inmóvil durante la la carga ejercida. En la simulación, se restringe el movimiento rotacional, traslacional de los elementos como: bastidor, el espacio residual. Para ello se seleccionó Model and Part>Entity Creation>Boundary>Spc>Cre>ByPart, la última opción depende de la parte o conjunto de nodos a restringir (Manual Keyword Ls-Dyna ,2014). Para la activación se selecciona la restricción de rotación y traslación en todos los ejes locales véase figura 13-2.



**Figura 13-2:** Partes restringidas para la simulación.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2020

### 2.11.6. Condiciones de contacto

Respecto a este tema el programa contiene contactos realistas entre componentes o partes del análisis explícito según (García Gayol ,2009, p. 65). Es importante generar conjuntos o

SET\_PART\_LIST, para definir el al elemento que recibe y del que genera el impacto. Se seleccionó Model and Part>Entity creation>SetData>\*SET\_PART>Area, para generar estos dos grupos véase Anexo B.

### **Condiciones de contacto utilizados**

**Contacto automático de superficie única:** de igual forma se establece cuando la superficie de un cuerpo hace contacto ella misma, o con superficie externa de otro cuerpo. Las fuerzas en las superficies son iguales a cero(García Gayol ,2009, p. 63).Para aquello se selecciona Model and Part >Keyword Manager>CONTACT>AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE.

**Contacto de superficie a superficie (AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE):** de igual forma se establece cuando la superficie de un cuerpo penetra en la de otro, este tipo de contacto permite grandes deformaciones, funciona bien en área de contacto relativamente grandes, no tiene restricciones en cuanto a la geometría de las áreas en contacto. Se utiliza componentes nodales o partes para establecer las superficies de contacto(García Gayol ,2009, p. 65).En la superficie esclava se genera la deformación, sin embargo la superficie maestra no presenta deformación, ya que es un elemento rígido. Los coeficientes estático y dinámico son de 0.3 y 0.2 respectivamente. véase Anexo B.

#### **2.11.7. Asignación de cargas**

En el elemento sólido se generó un set de nodos con el fin de asignar la carga de forma distribuida para ello se seleccionó Entity Creation >Set Data >SET\_NODE>Create > by part . Seguido con los pasos similares, dentro de Entity Creation>Define >coordinate > créate se generó un sistema de referencia para la dirección que tuvo la carga véase Anexo B.

Posterior se asignó dos curvas. Primera la curva con el valor de la aceleración constante de  $9800\text{mm/s}^2$  para ello se seleccionó Model and Part> Keyword Manager> DEFINE>CURVE, seguido se generó la curva constante de la gravedad con 9800 en el eje vertical y un rango de tiempo de 0 a de 1000 en el eje horizontal, véase anexo 8. La segunda curva hace referencia a la carga normal, que se ejerce en la platina con las dimensiones que indica el ensayo.

En segunda instancia se define la dirección que va tener la carga, para ello se seleccionó Model and Part> Keyword Manager> LOAD> BODY\_Y. La última opción define la dirección que tiene la gravedad en relación a la altura de la estructura, insertando en esta opción la curva de gravedad creada con anterioridad. Por último, el set de nodos, la curva de carga, y el sistema de referencia permitió asignar la carga sobre la platina.

### ***2.11.8. Configuración de tiempo de simulación y resultados de salida***

**Control de tiempo:** Se asigna tiempo que durará la simulación, no requiere que coincida con la del proceso. Hay ocasiones en el que tarda mucho la simulación, sin ser necesario, por ello se elige un tiempo que interesa analizar (García Gayol, 2009, p. 70). El tiempo de simulación en base a (Chirwa, Li y Qian, 2015; Wicaksono et al., 2017) tiene una duración de 0.3s, debido a las pocas configuraciones se ingresó un tiempo de simulación de 0.15s.

**Control de energías:** Por otra parte se activó el cálculo de las energías, que se presentan durante la simulación, incluido la energía de Hourglass, estos archivos se informan en ASCII de DATABASE\_OPTIONS (Manual Keyword Ls-Dyna, 2014, p. 1110).

**Control de Hourglass:** de manera similar se seleccionó, el coeficiente de Hourglass que presentan valores positivos cercanos a cero, en este caso 0.05, este coeficiente no debe ser mayor a 0.15 que puede causar inestabilidad en los resultados (Manual Keyword Ls-Dyna, 2014, p. 1269).

**Control del tamaño del paso de tiempo:** del mismo modo se definió el paso de tiempo para las soluciones de cálculo, basado en (Illescas Pérez, 2009, p. 93) se ingresó un paso de tiempo de  $1.0 \mu s$ .

**Configuración de datos de salida:** Por otra parte, para los resultados de deformación se activa DATABASE, que genere archivos con la información de los resultados. Se ingresó un incremento de tiempo 5ms en base (Illescas Pérez, 2009, p. 67). Se seleccionó DATABASE>BINARY\_D3PLOT, para los resultados de deformación. El resultado del comportamiento de las energías se habilita en ASCII de DATABASE\_OPTIONS, con el intervalo similar al presente párrafo.

### ***2.11.9. Ejecución en base a las configuraciones del pre-proceso.***

En esta segunda etapa se procedió al procesamiento dirigiéndose a la ventana del programa, donde se seleccionó el icono start LS-DYNA analysis> seleccionar el archivo> seleccionar la capacidad del computador > ejecutar la simulación. El tiempo de procesamiento computacional que se empleó para ejecutar es de 2 horas con 21 minutos, utilizándose un computador Intel Core i5, de 4 núcleos cada uno con 2.20GHz y 4 Gb de memoria RAM, los resultados se muestran en el capítulo III.

### ***2.11.10. Pos-proceso obtención de graficas***

Del mismo modo en esta etapa se visualizó los resultados numéricos y gráficos de la simulación, los pasos requeridos son: Abrir LS-PREPOST>File >open>LS-DYNA Binary Plot, seguido se obtuvo los resultados que se requieren para el análisis, se ilustra por medio de las 6 imágenes la simulación de la carga ejercida en el capítulo III se presentó los resultados de forma detallada.

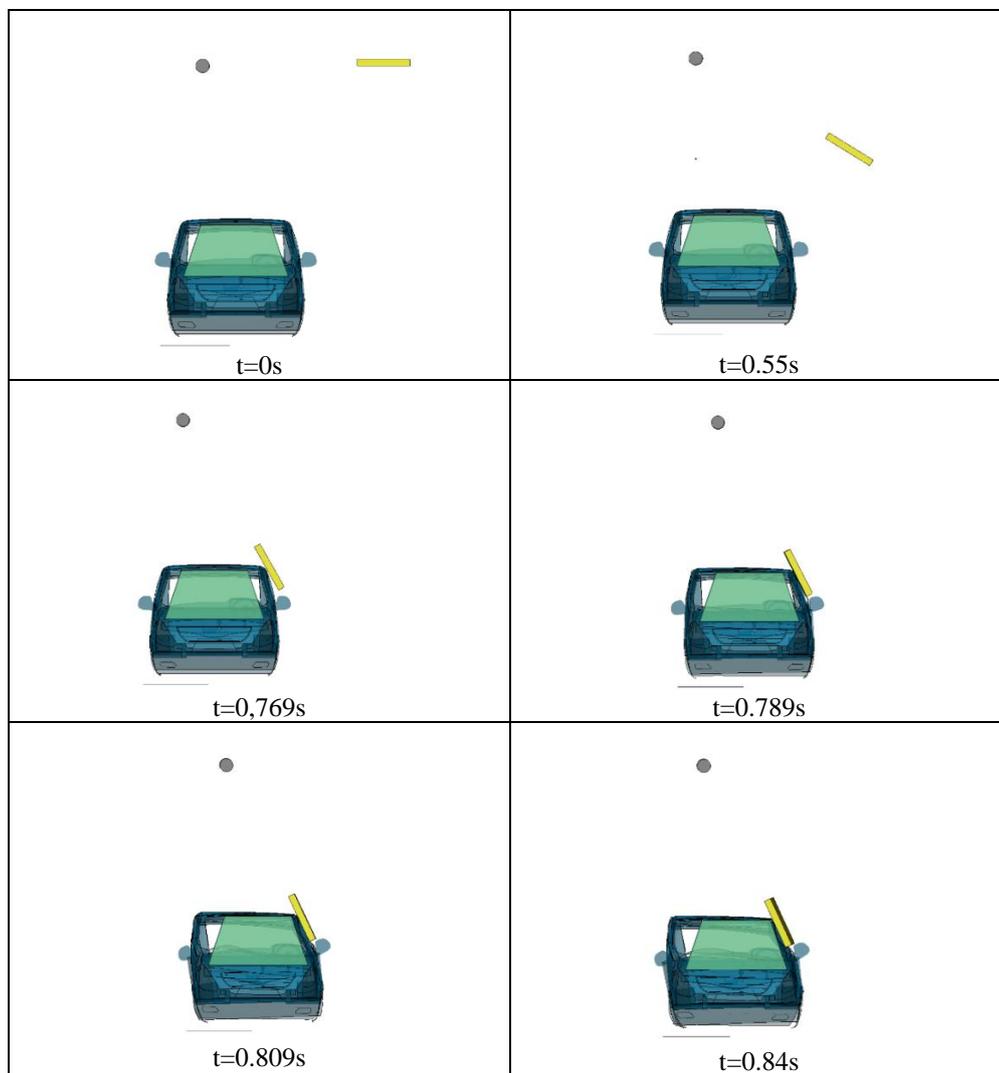
## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo muestra el resultado de 4 simulaciones, dos simulaciones del impacto del péndulo reglamento CEPE R66 anexo 7, y dos simulaciones de la carga ejercida con el ensayo FMVSS-216, con el fin de conocer el comportamiento estructura al variar las cargas.

#### 3.1. Resultados de la simulación

##### 3.1.1. Simulación 1 impacto del péndulo base a CEPE R66 anexo 7.



**Figura 1-3:** Vista frontal – simulación 1, impacto del péndulo anexo 7 CEPE R66.

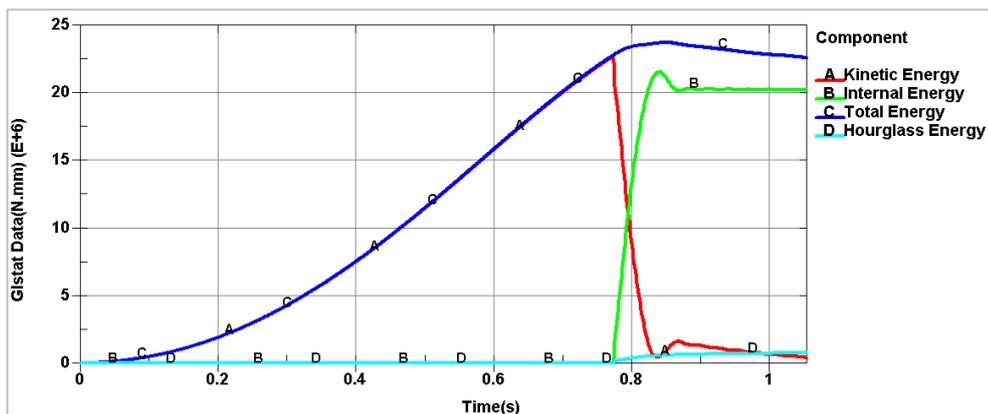
Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

La simulación del impacto del péndulo, mostrada en la (figura 1-3), muestra un ensayo de vuelco equivalente en relación al reglamento (CEPE-R66 ,2011, p. 32) anexo 7. La masa del péndulo es de **una tonelada**, que parte del reposo y tarda 0.769segundos en tomar el primer contacto con el travesaño lateral superior de la furgoneta, seguido se genera la deformación de la estructura en un intervalo de 0.071 segundos, durante este transcurso se aprecia que la estructura de la furgoneta, invade el espacio de supervivencia.

### Comportamiento de las energías durante la simulación

En un impacto la energía cinética es absorbida por la estructura , esta a su vez se convierte en energía interna, la energía interna alcanza su valor más alto, mientras la estructura absorbe completamente la energía cinética (Wicaksono et al. ,2017, p. 9). En la primera simulación, que se muestra en la (grafica 1-3). La estructura de la furgoneta al ser impactado por el péndulo presenta este comportamiento en las energías.

La energía total del sistema llega a un valor máximo de 23.8KJ, por otra parte, la energía interna tiene un valor máximo de 21.6KJ y por último la energía de Hourglass muestra un valor máximo de 0.741KJ.

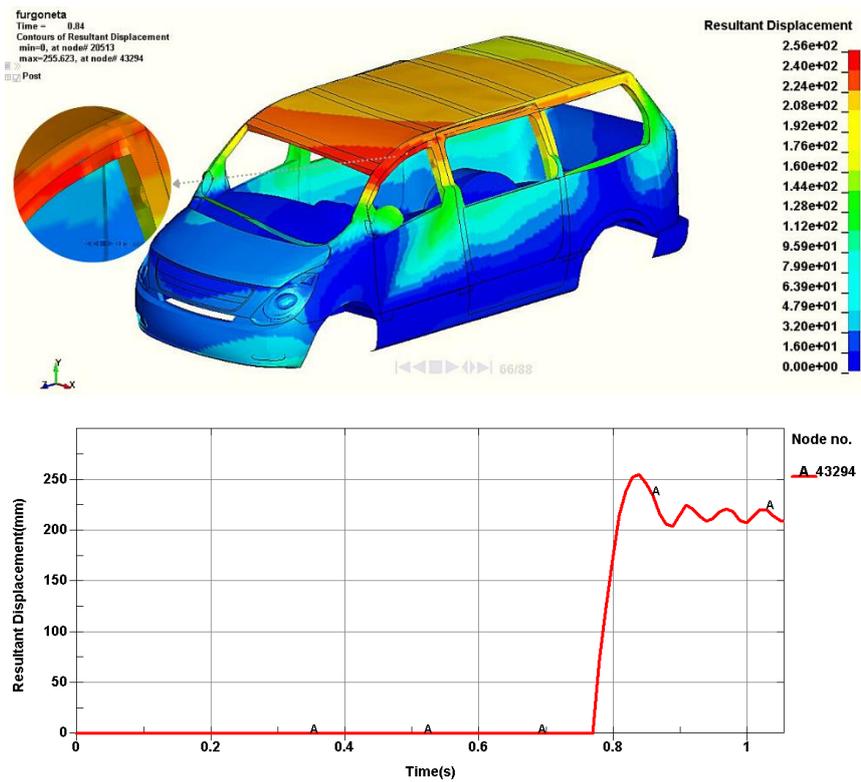


**Gráfico 1-3:** Niveles de energía en el ensayo de vuelco equivalente.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### Desplazamiento resultante en la estructura de la furgoneta

El desplazamiento resultante de la estructura, que se generó por el impacto (véase gráfica 2-3), desde el instante que tomó contacto con el travesaño superior lateral, presenta un desplazamiento resultante máximo de 256.69mm, el área crítica se localizó muy próximo al travesaño frontal de la estructura, en la figura se presenta con un color rojo intenso.

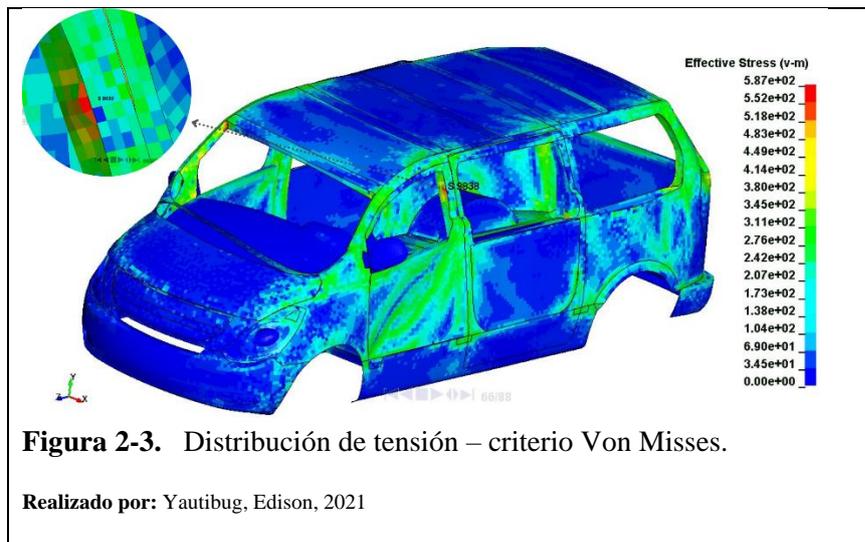


**Gráfico 2-3:** Desplazamiento resultante máximo.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### Distribución de tensión en la estructura por el criterio de Von Misses

En la distribución de tensión por el criterio de Von Misses (figura 2-3), es conveniente especificar que los elementos estructurales que absorben la energía de impacto son los parantes, y el marco posterior, ya que los valores de tensión son mayores. El valor máximo de tensión, con 587Mpa se localizó en el parante delantera, muy próximo al travesaño frontal.

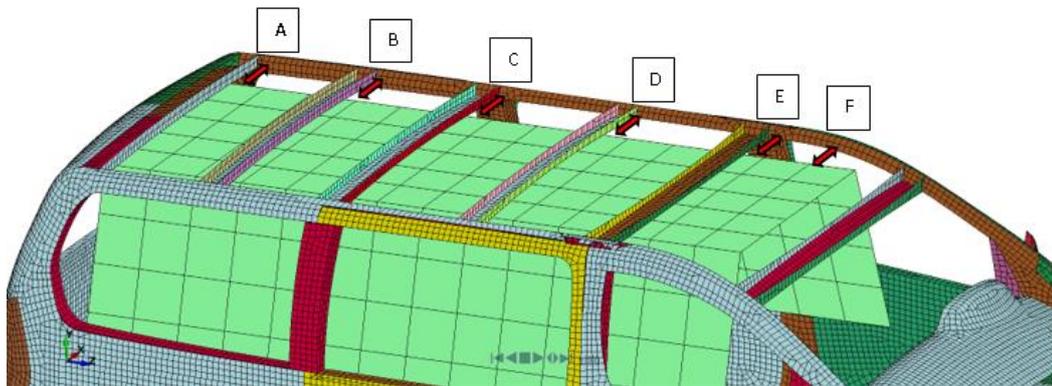


**Figura 2-3.** Distribución de tensión – criterio Von Misses.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### Criterio del espacio residual o supervivencia

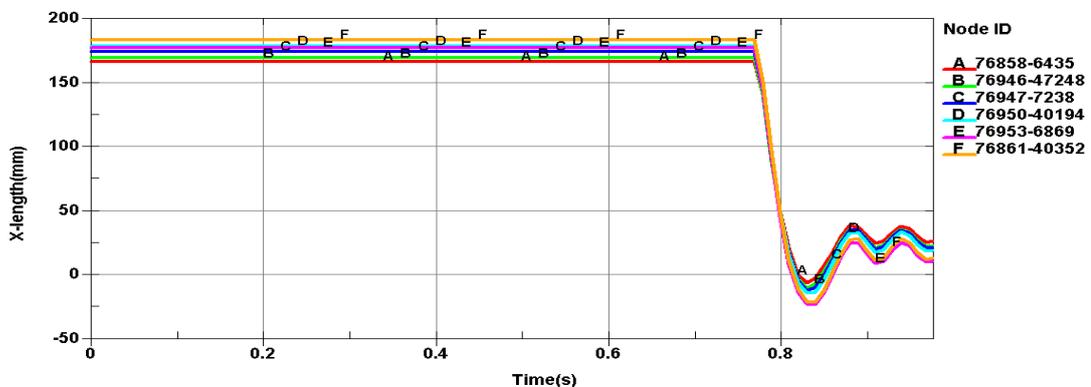
En base la teoría de (CEPE-R66 ,2011; Karliński et al. ,2014) del presente proyecto se muestra el comportamiento de la estructura y la incidencia en el espacio de supervivencia, para ello se seleccionó doce nodos, cada par de nodos indica la posición de la estructura respecto al espacio de supervivencia, los nodos seleccionados en la estructura son próximos a los pilares del techo, mientras que demás nodos se ubican en el borde superior del espacio de supervivencia. Esto permitió conocer el desplazamiento de la estructura en los 6 diferentes puntos relacionados. Véase (figura 3-3).



**Figura 3-3:** Nodos seleccionados para el criterio del espacio residual.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021.

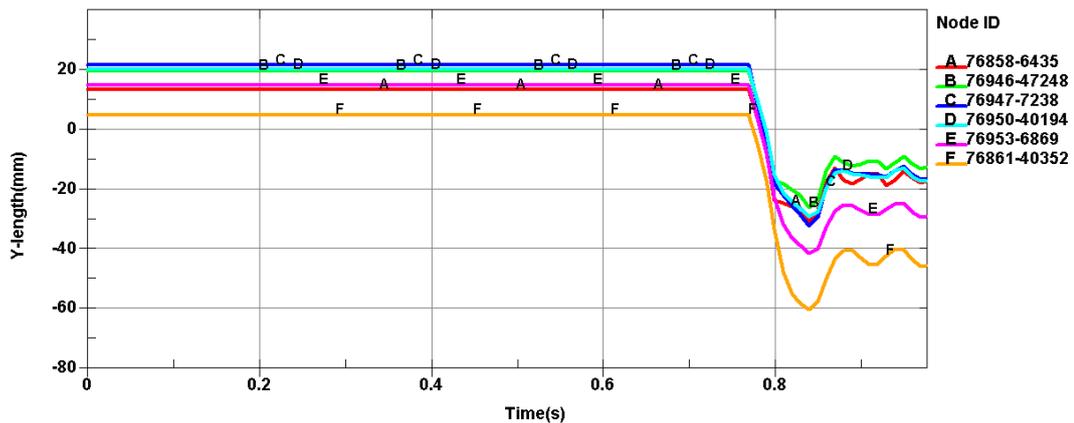
En la (gráfica 3-3) respecto al eje X. Durante los primeros 0.769 segundos la estructura aún no recibe el impacto, por lo tanto el travesaño lateral superior de la estructura se encuentra a una distancia promedio de 175mm de la superficie del espacio de supervivencia, después de este tiempo el impacto genera la deformación, por lo tanto la distancia entre cada par de nodos empieza a disminuir en su totalidad, mostrándose la inserción de la estructura en el espacio de supervivencia, principalmente en los punto E y F se generó mayor deformación.



**Gráfico 3-3:** Criterio del espacio residual simulación 1 respecto al eje X.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

Al mismo tiempo en la (gráfica 4-3) respecto al eje Y, durante los primeros 0.769 segundos la estructura aún no recibe el impacto, ahora bien, el travesaño lateral superior de la estructura se encuentra a una distancia de 5 y 20 milímetros de la superficie del espacio de supervivencia, luego el impacto generó la deformación, la distancia entre cada par de nodos empieza a disminuir en su totalidad, mostrándose la invasión de la estructura en el espacio de supervivencia. A diferencia de lo mostrado en la (gráfica 3-3), el eje Y se presentó un desplazamiento máximo que sobrepasa el área de los pasajeros en 60.6 milímetros. Asimismo se presenta mayor deformación en los puntos E y F.



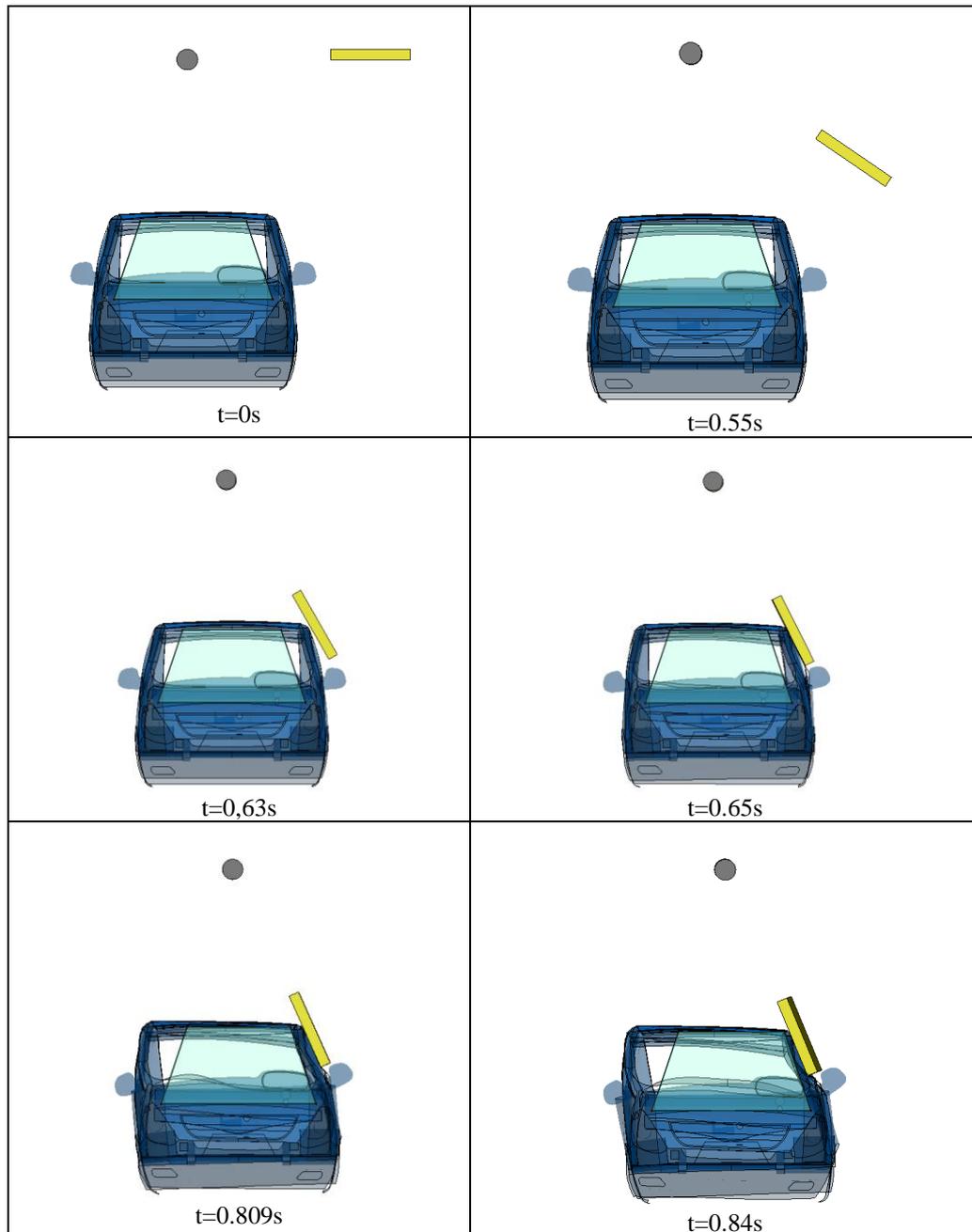
**Gráfico 4-3:** Criterio del espacio residual simulación 1 respecto al eje Y.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### 3.1.2. Simulación 2 impacto del péndulo base a CEPE R66 anexo 7.

En el segundo caso, asimismo se realizó la simulación del impacto del péndulo, manteniendo las mismas condiciones, pero se varió la masa del péndulo a 1.5 toneladas, donde se analizó los mismos criterios mostrados en la simulación anterior, para compararse los resultados en el comportamiento de la estructura (CEPE-R66, 2011, p. 32) anexo 7.

En la (figura 4-3) se muestra por medio de las 6 ilustraciones la simulación de impacto y los cambios que genera, el tiempo de paso o time step es de  $1.0 \mu s$ , los resultados requeridos se registró cada 10ms en base (Illescas Pérez, 2009, p. 67). El tiempo de procesamiento computacional que se empleó para ejecutar es de 4 horas con 32 minutos, utilizándose un computador Intel Core i5, de 4 núcleos cada uno con 2.20GHz y 4 Gb de memoria RAM.

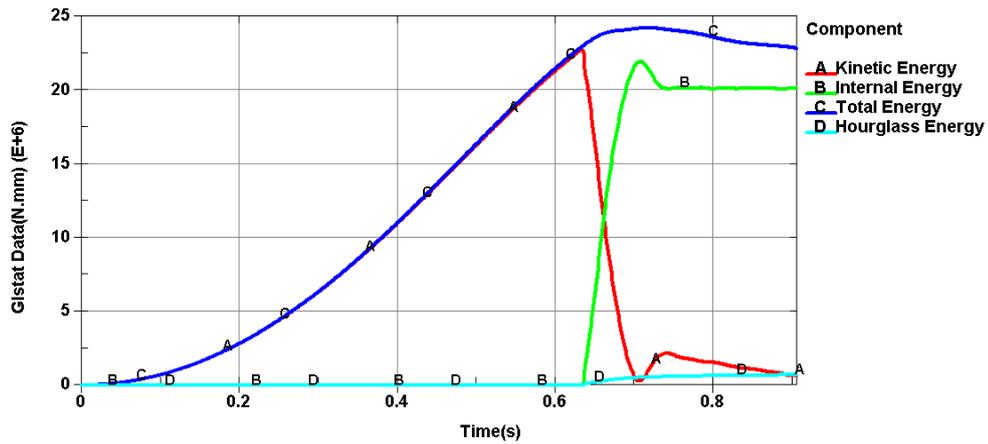


**Figura 4-3:** Vista frontal – simulación 2 del impacto del péndulo anexo 7 CEPE R66.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### Comportamiento de las energías durante la simulación

Asimismo, la energía cinética es absorbida por la estructura, esta a su vez se convierte en energía interna, la energía interna alcanza su valor más alto, mientras la estructura absorbe completamente la energía cinética (Wicaksono et al. ,2017, p. 9).En esta segunda simulación el comportamiento de las energías se muestra en la (gráfica 5-3). De modo similar, la energía total presenta un valor máximo de 24.2 KJ. La energía interna tiene un valor máximo de 22.0 KJ y la energía de Hourglass con un valor máximo de 0.703 KJ.

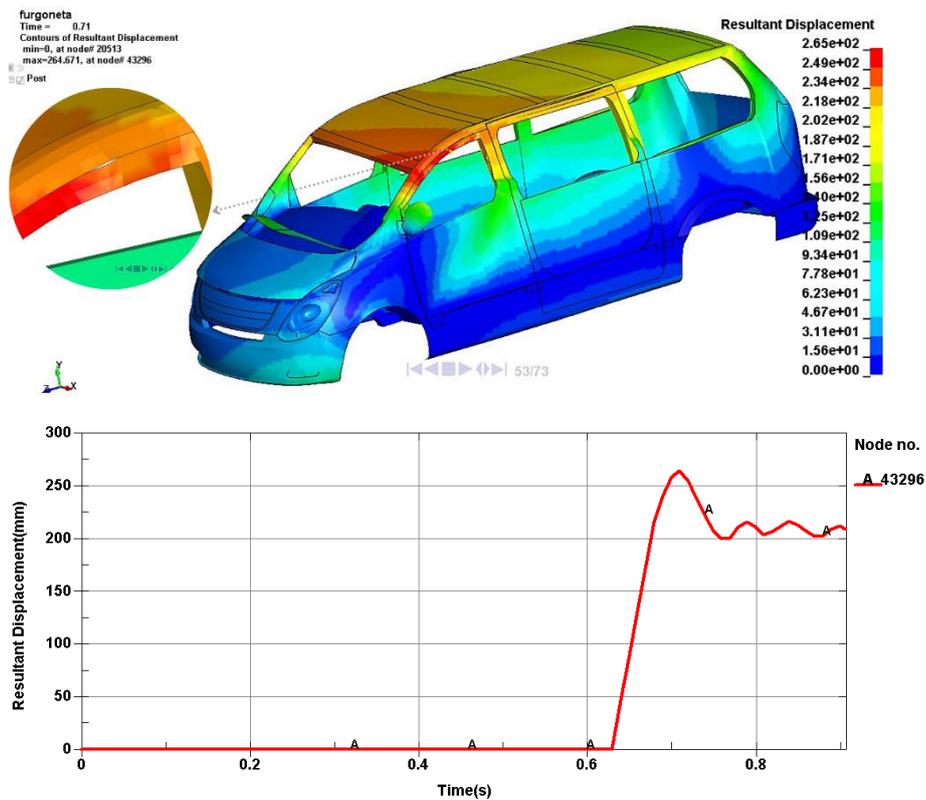


**Gráfico 5-3:** Niveles de energía en el ensayo de vuelco equivalente.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### Desplazamiento resultante en la estructura de la furgoneta

El desplazamiento resultante de la estructura, de modo similar que se generó por el impacto véase (Gráfica 6-3), a partir del contacto que presenta el travesaño superior lateral, presenta un desplazamiento resultante máximo de 264.67mm, de igual forma el área crítica se localizó muy próximo al travesaño frontal de la estructura, en la figura se presenta con un color rojo intenso.

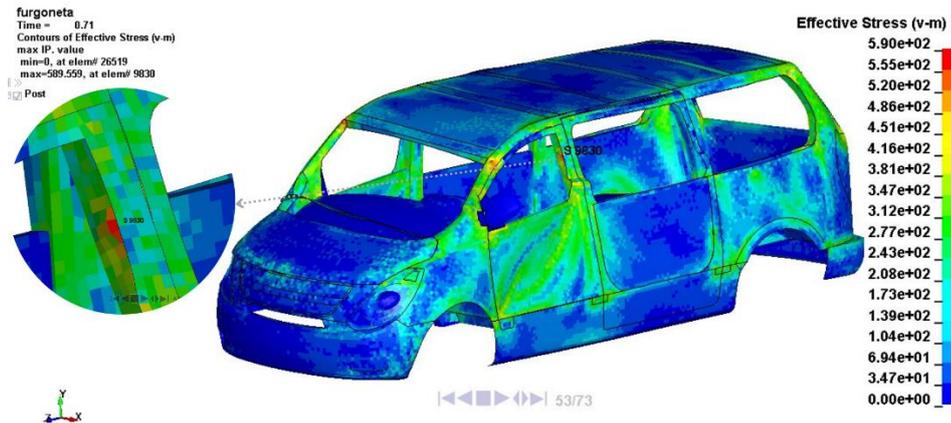


**Gráfico 6-3:** Deformación- desplazamiento resultante.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

## Distribución de tensión en la estructura por el criterio de Von Mises

En la distribución de tensión por el criterio de Von Mises (figura 5-3), es conveniente especificar que los elementos estructurales que absorben la energía de impacto son los parantes, y el marco posterior, por lo tanto, los valores de tensión en estos elementos son mayores. El valor máximo de tensión, con 589.55 Mpa se localizó en el parante delantera, muy próximo al travesaño frontal.

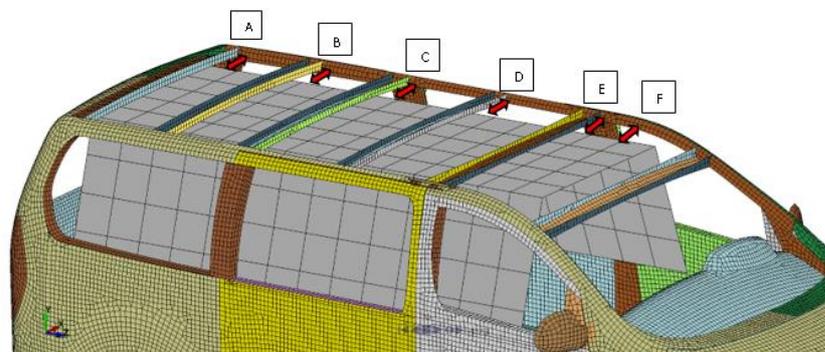


**Figura 5-3:** Distribución de tensión – criterio Von Mises.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

## Criterio del espacio residual o supervivencia

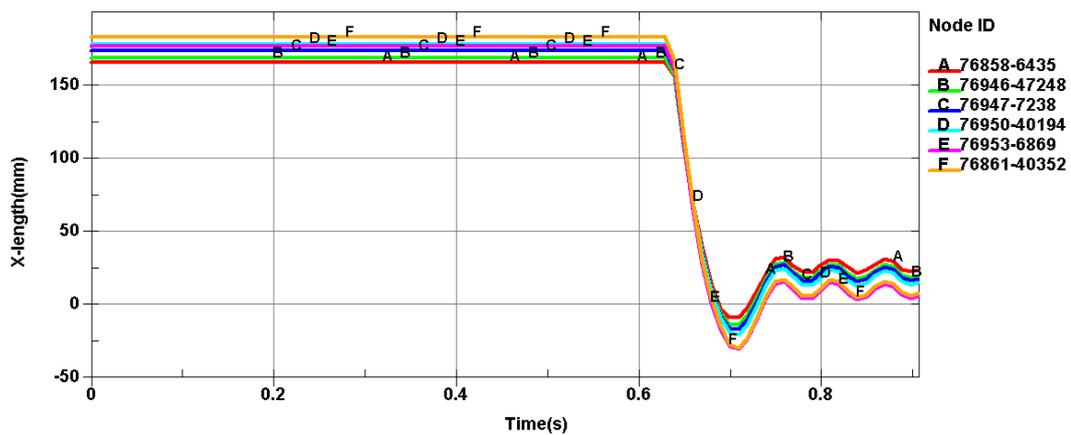
En base la teoría de (CEPE-R66 ,2011; Karliński et al. ,2014) de la misma forma en esta segunda simulación se observó el comportamiento de la estructura y la incidencia en el espacio de supervivencia, del mismo modo se seleccionó doce nodos, cada par de nodos indica la posición del travesaño lateral de la estructura respecto al espacio de supervivencia. Este detalle se muestra en la (figura 6-3) en los diferentes 6 puntos.



**Figura 6-3:** Nodos seleccionados para el criterio del espacio residual.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

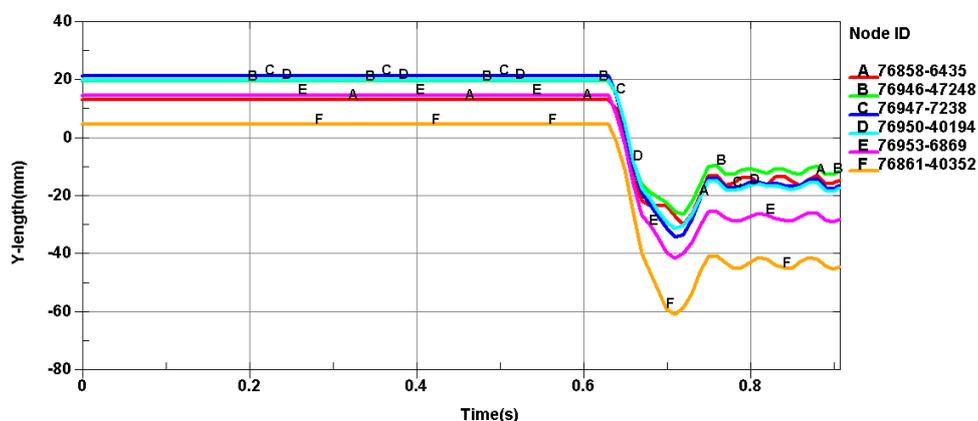
De forma similar en la (gráfica 7-3) respecto al eje X, durante los primeros 0.63 segundos la estructura aún no recibe el impacto, por lo tanto el travesaño lateral superior de la estructura se encuentra a una distancia promedio de 175mm de la superficie del espacio de supervivencia, al igual que la simulación 1. En consecuencia, después del impacto se genera la deformación, de manera que la distancia entre cada par de nodos empieza a disminuir en su totalidad, mostrándose la incidencia de la estructura en el espacio de supervivencia, ya que sobrepasa (0), que es la posición del área de supervivencia, cabe señalar que el área con mayor deformación se presentó en los puntos E y F.



**Gráfico 7-3:** Criterio del espacio residual simulación 2 respecto al eje X.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

De igual forma en la (gráfica 8-3) respecto al eje Y. Durante los primeros 0.63 segundos la estructura aún no recibe el impacto, conviene especificar que, el travesaño lateral superior de la estructura se encuentra a una distancia de 5 y 20 milímetros de la superficie del espacio de supervivencia.

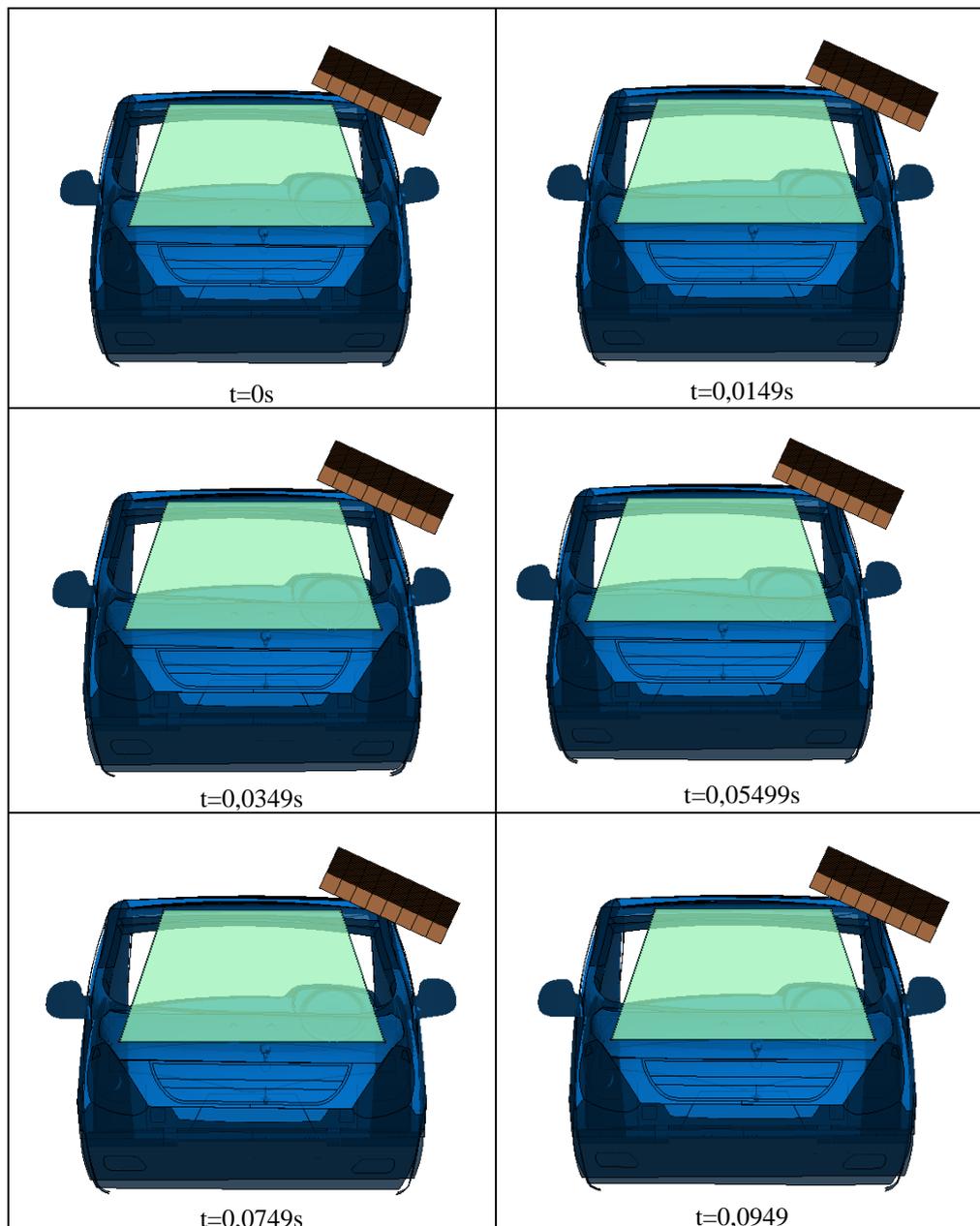


**Gráfico 8-3:** Criterio del espacio residual simulación 2 respecto al eje Y.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

Por consiguiente, el impacto genera la deformación, la distancia entre cada par de nodos empieza a disminuir en su totalidad, mostrándose la invasión de la estructura en el espacio de supervivencia. Comparándose con la (gráfica 7-3), El desplazamiento máximo respecto al eje Y, sobrepasa el área de los pasajeros en 60.7 milímetros. De igual forma se presenta mayor deformación en los puntos E y F.

### 3.1.3. Simulación 3 de la carga ejercida Ensayo FMVSS -216.



**Figura 7-3:** Vista frontal- simulación 3, carga ejercida ensayo FMVSS-216.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

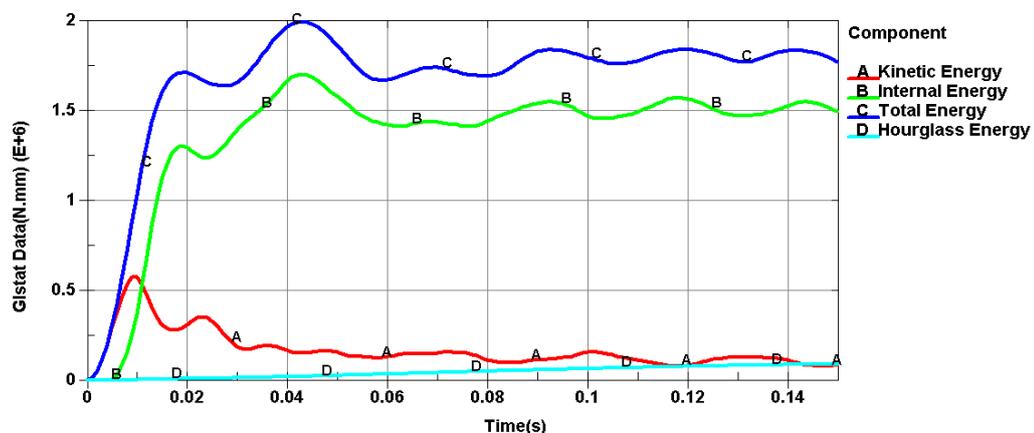
En el tercer caso, se realizó la simulación de la carga ejercida sobre el travesaño superior lateral de la estructura como se ilustra en (la figura 7-3), en base a lo descrito en el capítulo I, del marco teórico, el ensayo FMVSS-216 está en vigor desde 1971 (Kulkarni & Marks, 2011, p. 6). El cuerpo rígido que se ubica en la parte superior lateral del vehículo tiene un ángulo de caída de (5°) respecto a la longitud de la estructura y (25°) de balanceo respecto al ancho del vehículo. La carga ejercida en este cuerpo rígido, es normal a la platina rígida. Para esta tercera simulación la carga que se asignó una **carga de 1.5 veces el peso bruto vehicular**, como se menciona en el ensayo, asimismo se comparó el comportamiento en la estructura.

De igual forma en la (figura 7-3) se ilustra por medio de las 6 imágenes la simulación de la carga ejercida, por consiguiente los cambios que genera sobre la estructura. El tiempo de paso o time step es de  $1.0 \mu s$ , los resultados requeridos registró cada 10ms según (Illescas Pérez, 2009, p. 70). El tiempo de procesamiento computacional que se empleó para ejecutar es de 2 horas con 21 minutos, utilizándose un computador Intel Core i5, de 4 núcleos cada uno con 2.20GHz y 4 Gb de memoria RAM.

### Comportamiento de las energías durante la simulación

Del modo similar, en la (gráfica 9-3) se muestra el comportamiento de las energías, por medio del ensayo FMVSS-216, sin embargo, el comportamiento de las energías es distinta, este valor presenta niveles de energía muy bajos, en relación a las 2 simulaciones anteriores.

En esta tercera simulación el comportamiento de las energías se muestra en la (gráfica 9-3). De modo similar, la energía total presenta un valor máximo de 1.99 KJ. La energía interna tiene un valor máximo de 1.7 KJ y la energía de Hourglass con un valor máximo de 0.091KJ.



**Gráfico 9-3:** Niveles de energía FMVSS-216.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

## Desplazamiento resultante en la estructura de la furgoneta

El desplazamiento resultante de la estructura, que se generó por la carga ejercida, con 1.5PBV véase (Gráfica 10-3), a partir del contacto en el travesaño superior lateral, presenta un desplazamiento resultante máximo de 36.6 mm, de igual forma el área crítica se localizó muy próximo al travesaño frontal de la estructura, en la figura se presenta con un color rojo intenso.

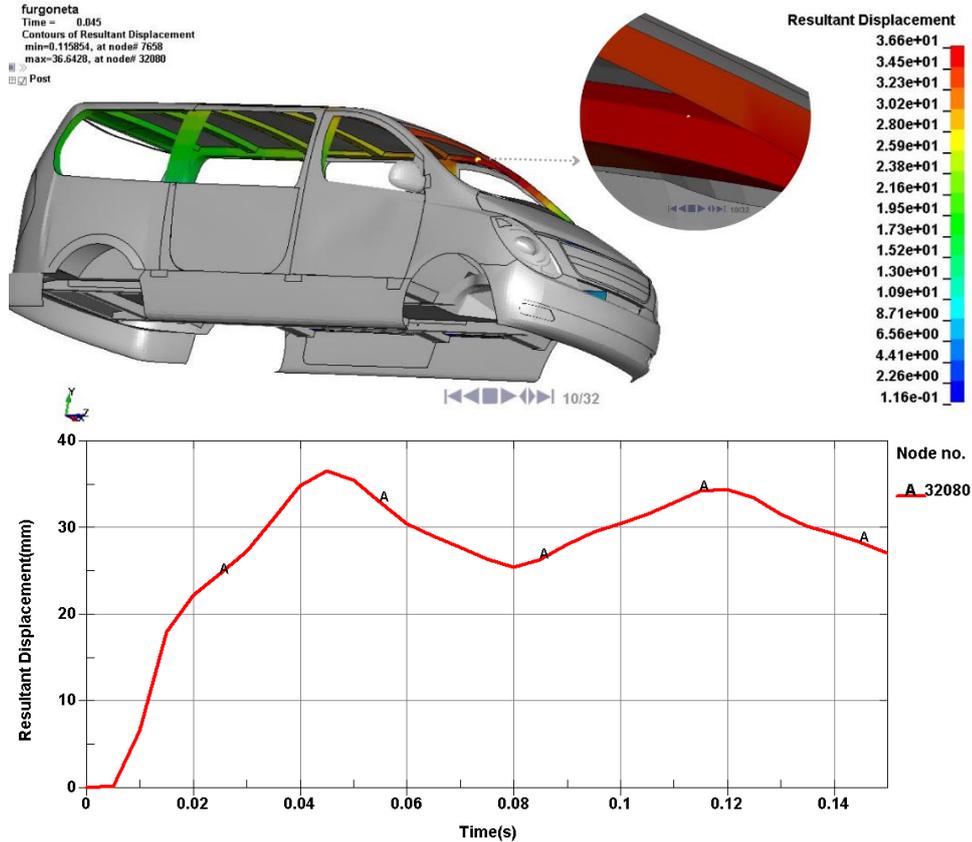
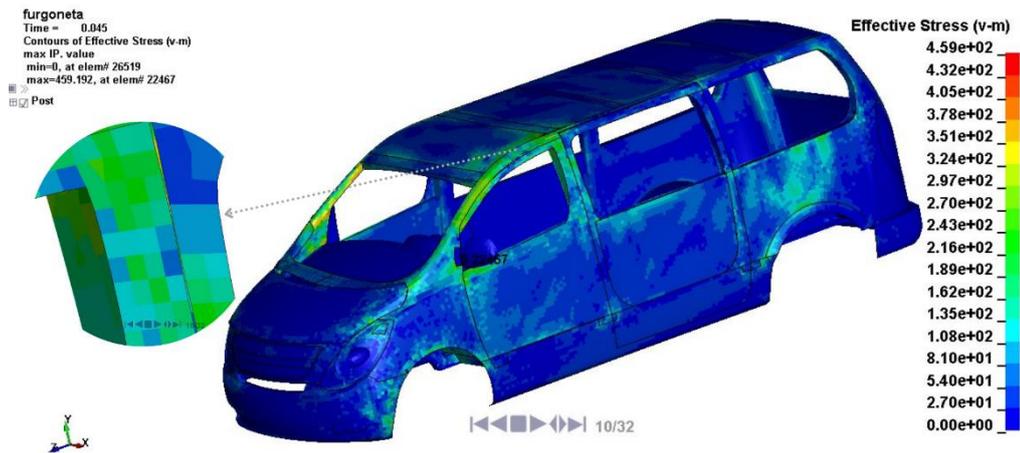


Gráfico 10-3: Desplazamiento resultante-FMVSS 216.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

## Distribución de tensión en la estructura por el criterio de Von Misses

En la distribución de tensión por el criterio de Von Misses (figura 8-3), es conveniente especificar que los elementos estructurales que presentan mayor tensión, se localizan en la parte delantera, los valores de tensión en los elementos son menores en comparación a la simulación 1y 2. El valor máximo de tensión, con 459.192 Mpa que se localizó en el parante delantero, muy próximo al travesaño frontal.

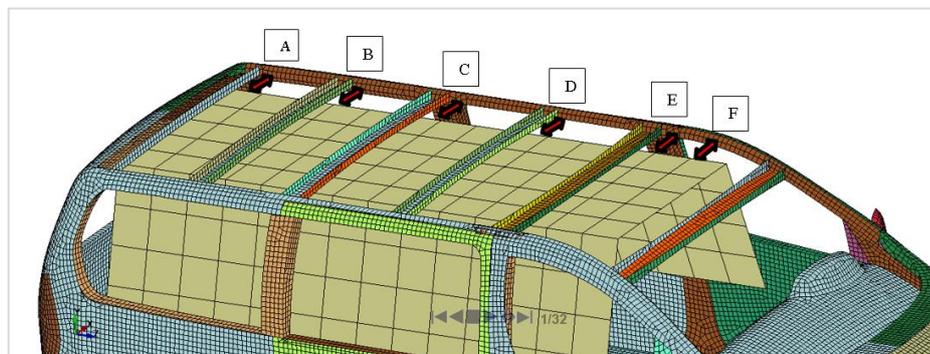


**Figura 8-3:** Distribución de tensión –Criterio de Von Misses.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### Criterio del espacio residual

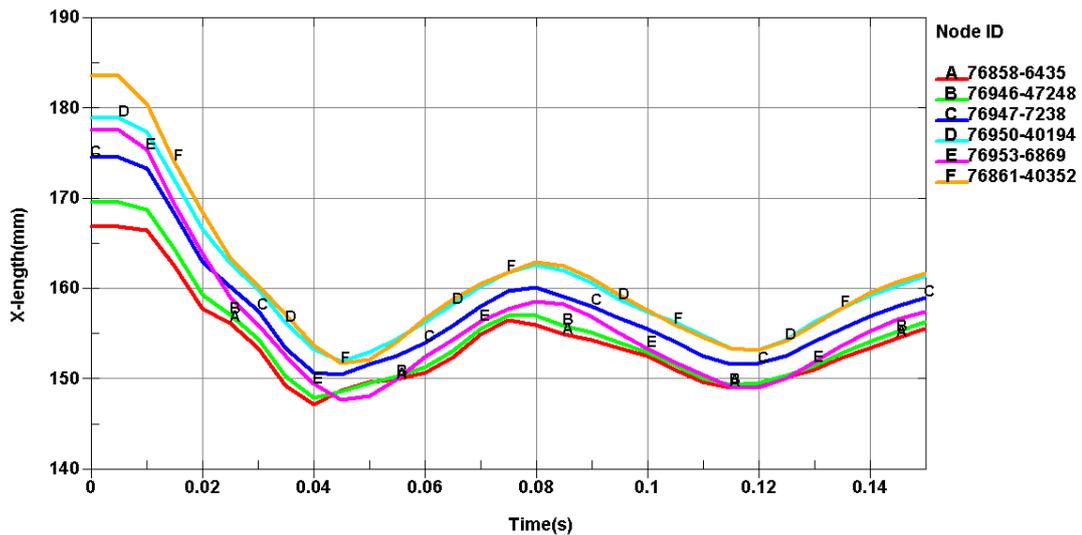
En base la teoría descrita (Kulkarni & Marks ,2011, p. 7) en la presente simulación 3, se verifica el comportamiento de la estructura y la incidencia en el espacio de supervivencia, de manera similar seleccionó doce nodos, cada par de nodos indica la posición del travesaño lateral de la estructura respecto al espacio de supervivencia. Este detalle se muestra en la (figura 9-3) en los 6 diferentes puntos.



**Figura 9-3:** Nodos seleccionados para el criterio de espacio residual.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

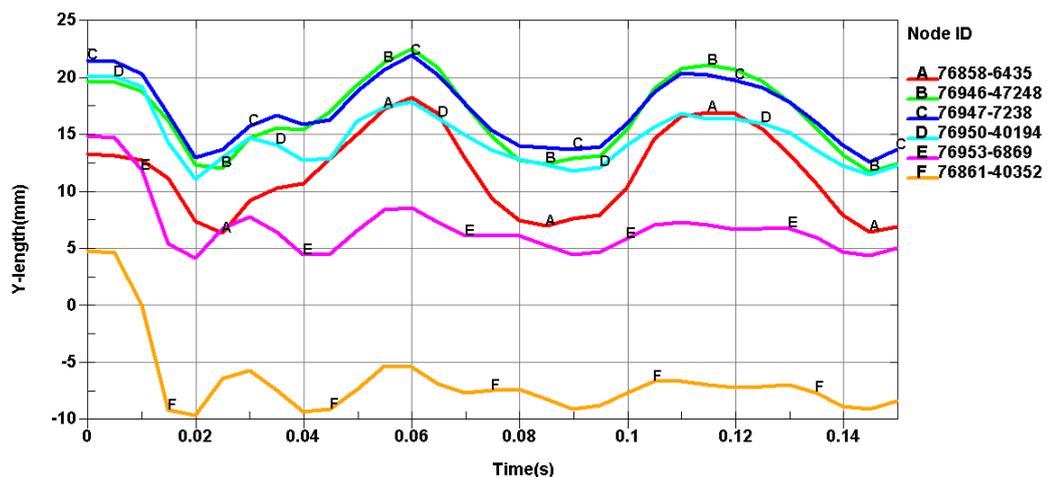
En la (gráfico 11-3) respecto al eje X, El travesaño lateral superior de la estructura se encuentra a una distancia promedio de 175mm de la superficie del espacio de supervivencia, esto antes de que la carga tome contacto. Acto seguido en consecuencia de la carga ejercida se generó la deformación, la distancia entre cada par de nodos empieza a disminuir, mostrándose que por este eje no incide la estructura en el espacio de supervivencia, ya que no llega a (0), que es la posición del área de supervivencia, cabe señalar que el área con mayor deformación se presentó en la selección E y F.



**Gráfico 11-3:** Criterio del espacio residual simulación 3 respecto al eje X.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

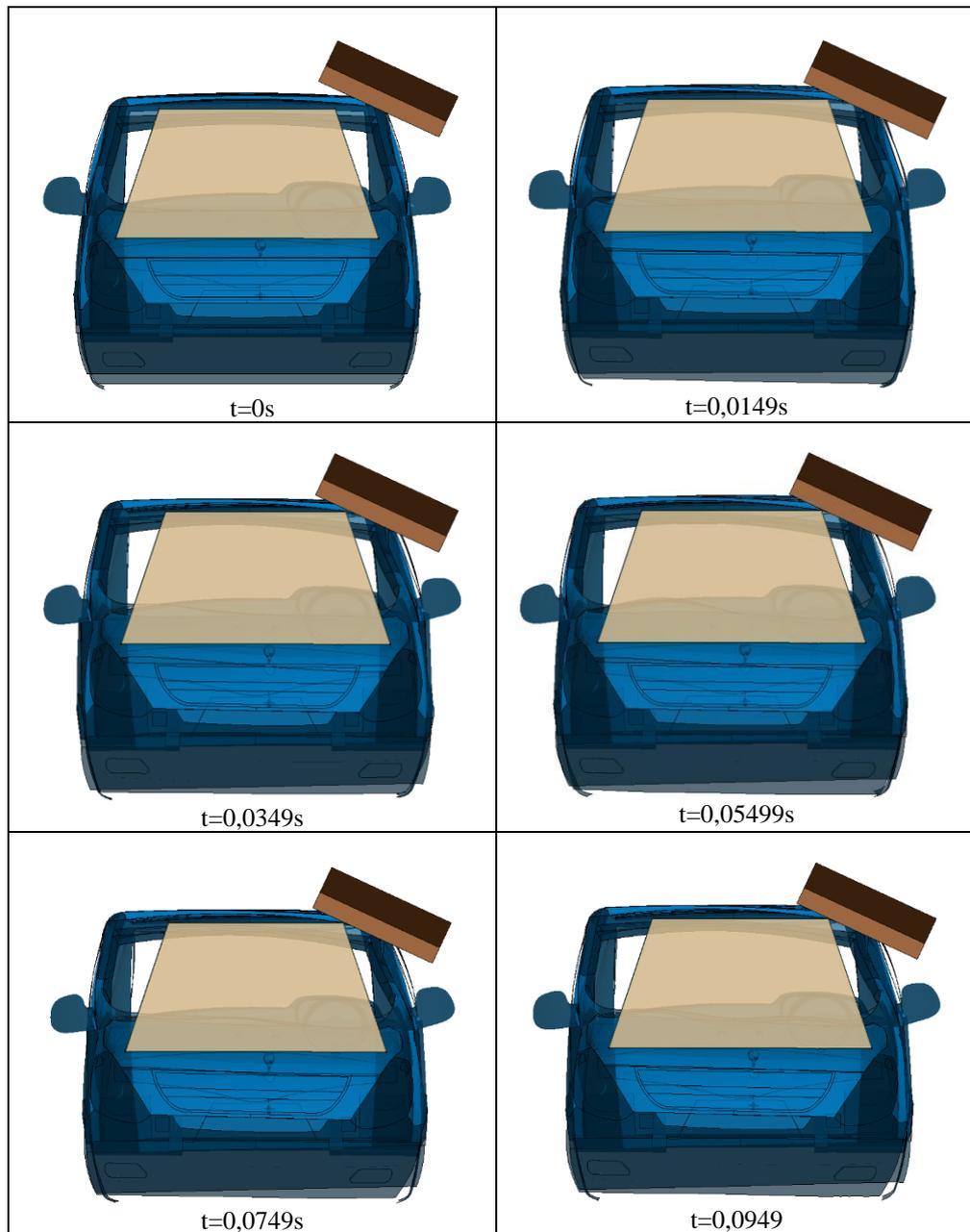
Al mismo tiempo en la (gráfico 12-3), respecto al eje Y, el travesaño lateral superior de la estructura se encuentra a una distancia de 5 y 20 milímetros de la superficie del espacio de supervivencia, esto antes de que la carga tome contacto. Acto seguido la carga ejercida genera la deformación, de forma similar la distancia entre cada par de nodos empieza a disminuir, mostrándose que no todos los puntos inciden en el espacio de supervivencia, ya que no llega a (0), que es la posición del área de supervivencia, conviene destacar que el punto F es el único punto que invadió el área de los pasajeros.



**Gráfico 12-3:** Criterio del espacio residual simulación 3 respecto al eje Y.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### 3.1.4. Simulación 4 de la carga ejercida Ensayo FMVSS-216.



**Figura 10-3:** Vista frontal- simulación de la carga ejercida ensayo FMVSS-216.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

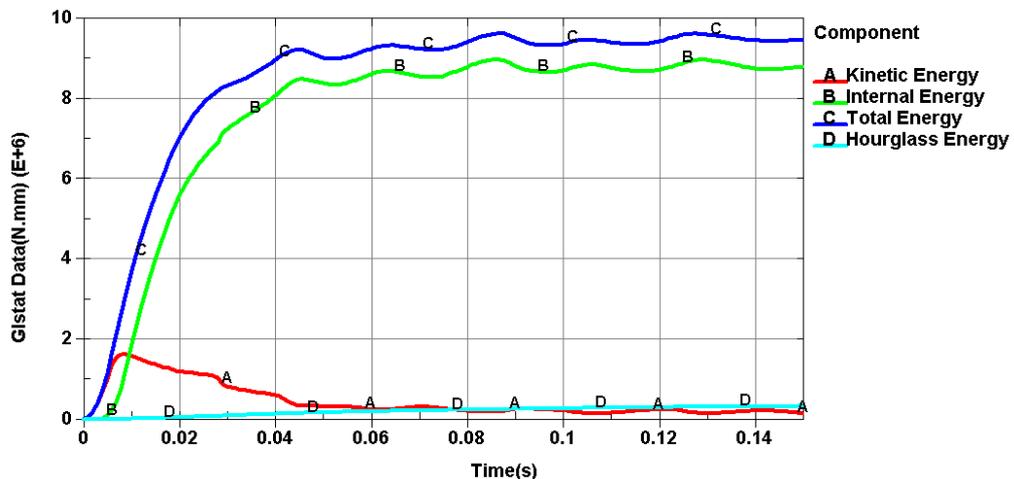
De modo similar , en el cuarto caso, se realizó la simulación de la carga ejercida sobre el travesaño superior lateral de la estructura, como se ilustra en (la figura 10-3). Acto seguido, el ensayo FMVSS-216 está en vigor desde 1971 (Kulkarni & Marks ,2011, p. 6).El cuerpo rígido mostrado en la figura presenta un ángulo de caída de ( $5^{\circ}$ ) y un ángulo de balanceo de ( $25^{\circ}$ ). Para esta cuarta simulacion la carga es **3 veces el peso bruto vehicular**, de acuerdo a la variacion que tiene el ensayo.

En efecto en la (figura 10-3) se ilustra por medio de las 6 imágenes la simulación de la carga ejercida, en consecuencia a los cambios que genera sobre la estructura. El tiempo de paso o time step es de  $1.0 \mu s$ , los resultados requeridos se registró cada 10ms según (Illescas Pérez ,2009, p. 70). De modo similar , el tiempo de procesamiento computacional que se empleó para ejecutar es de 2 horas con 21 minutos, utilizándose un computador Intel Core i5, de 4 núcleos cada uno con 2.20GHz y 4 Gb de memoria RAM.

### Comportamiento de las energías durante la simulación

Asimismo, en la (gráfico 13-3) se muestra el comportamiento de las energías, por medio del ensayo FMVSS-216, de modo similar el comportamiento de las energías es distinta a las simulaciones 1 y 2, con un comportamiento similar a la simulación 3. Los valores de energía presentan un nivel más bajo, a las simulaciones 1 y 2, en cierta forma superior a la simulación 3.

En la cuarta simulación el comportamiento de las energías se muestra en la (gráfico 13-3). De forma similar, la energía total presenta un valor máximo de 9.64 KJ. La energía interna tiene un valor máximo de 8.99KJ y la energía de Hourglass con un valor máximo de 0.328 KJ.

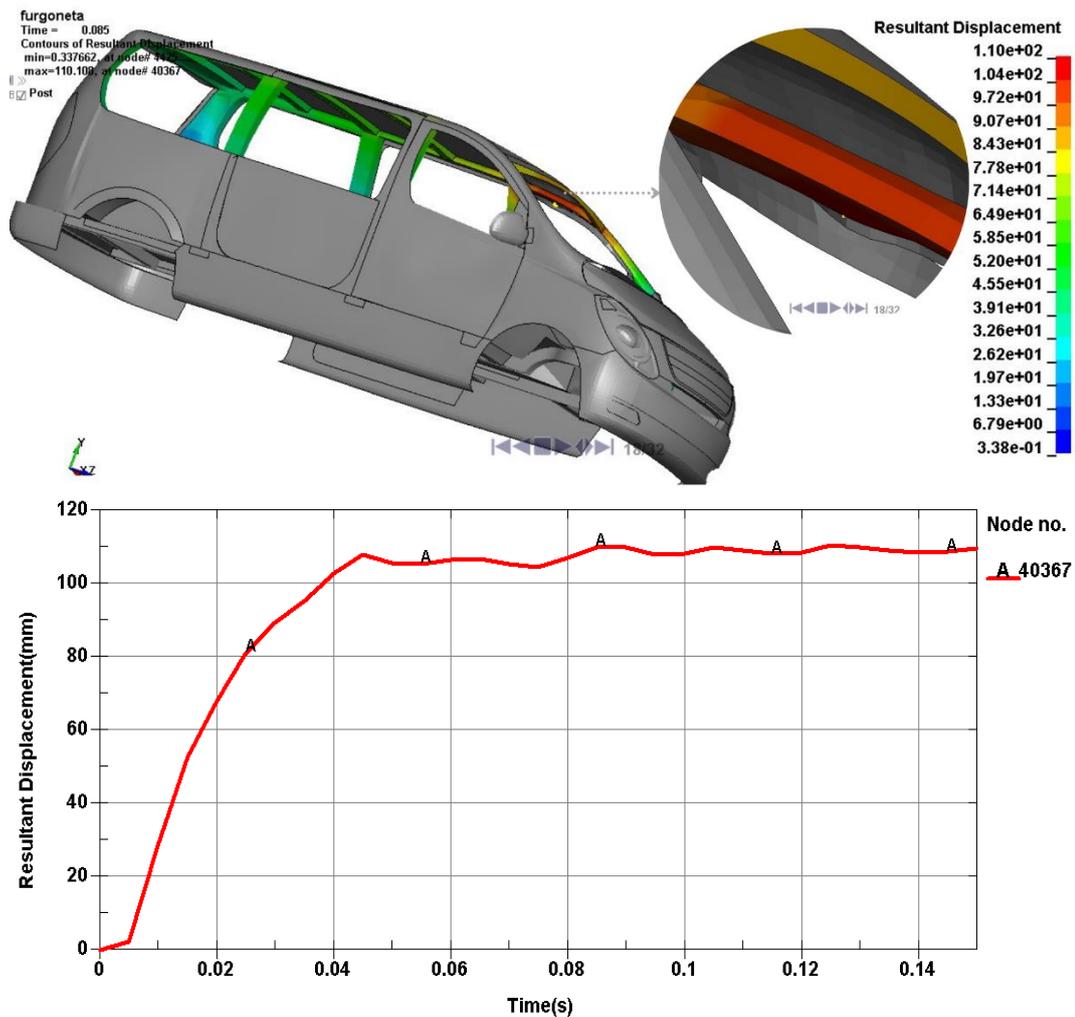


**Gráfico 13-3:** Niveles de energía simulación 4 FMVSS-216.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### Deformación- desplazamiento resultante en la estructura de la furgoneta

El desplazamiento resultante de la estructura, que se generó por la carga ejercida, con 3 veces el PBV véase (Gráfico 14-3), a partir del contacto en el travesaño superior lateral, presenta un desplazamiento resultante máximo de 110.108 mm, de igual forma el área crítica se localizó muy próximo al travesaño frontal de la estructura, en la figura se presenta con un color rojo intenso.

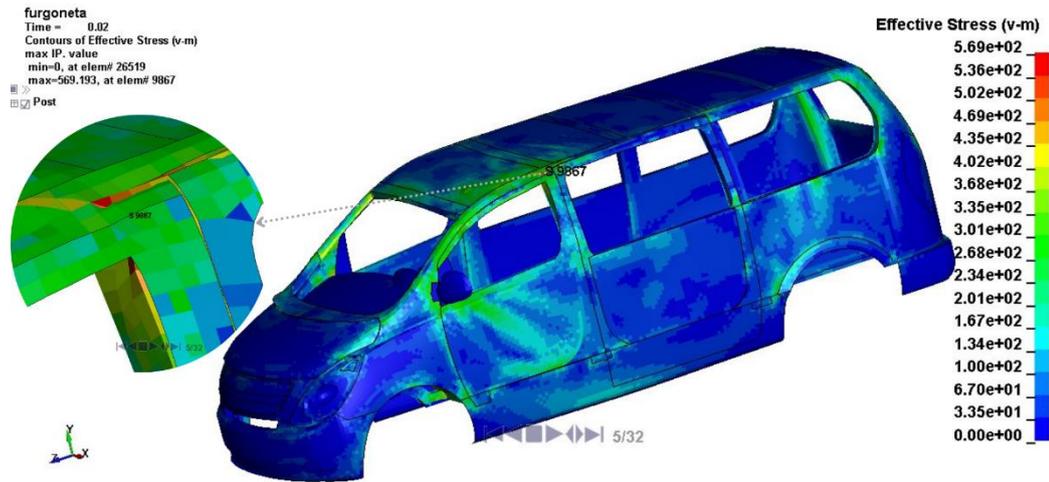


**Gráfico 14-3:** Desplazamiento resultante-FMVSS 216.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### Distribución de tensión en la estructura por el criterio de Von Mises

Del mismo modo, en la distribución de tensión por el criterio de Von Mises (figura 11-3), se observa que los elementos estructurales que presentan mayor tensión, se localizan en la parte delantera, los valores de tensión en los elementos son menores en comparación a la simulación 1y 2. El valor máximo de tensión, con 569, 19 Mpa, que se localizó en el parante delantero, muy próximo al travesaño frontal.

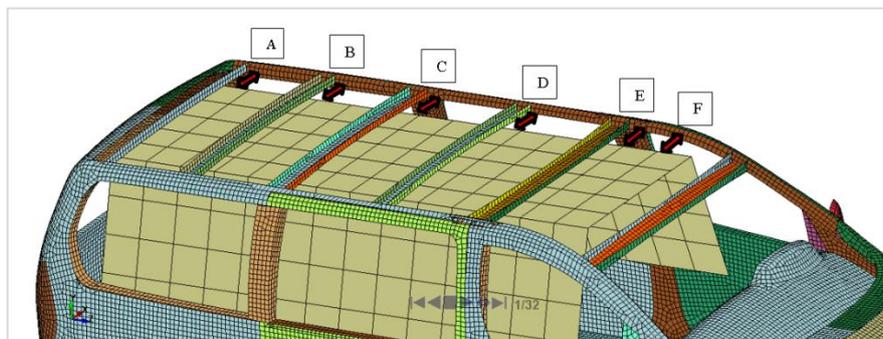


**Figura 11-3:** Distribución de tensión –Criterio de Von Misses.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### Criterio del espacio residual

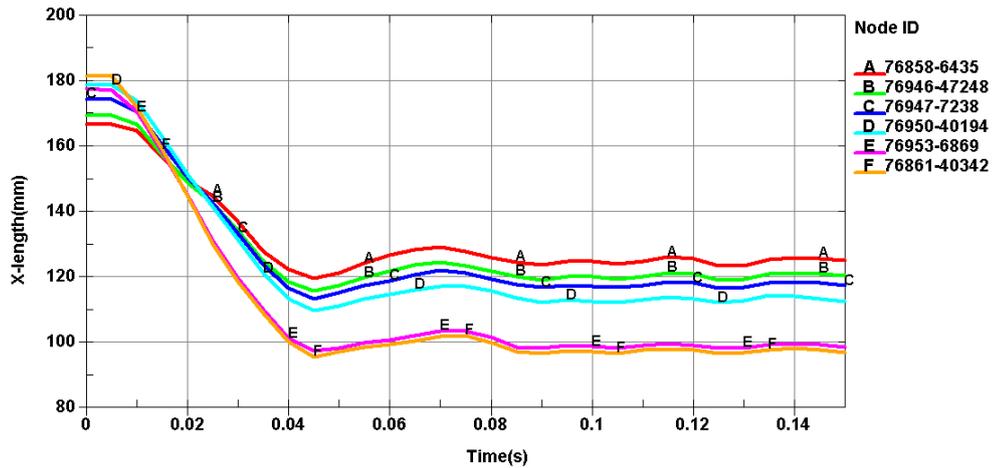
En base la teoría descrita (Kulkarni & Marks ,2011, p. 8) en la presente simulación 4, se verificó el comportamiento de la estructura y la incidencia en el espacio de supervivencia. De igual modo, se seleccionó doce nodos, cada par de nodos indica la posición del travesaño lateral de la estructura respecto al espacio de supervivencia. Se muestra a detalle en la (figura 12-3) en los diferentes 6 puntos.



**Figura 12-3:** Nodos seleccionados para el criterio de espacio residual.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

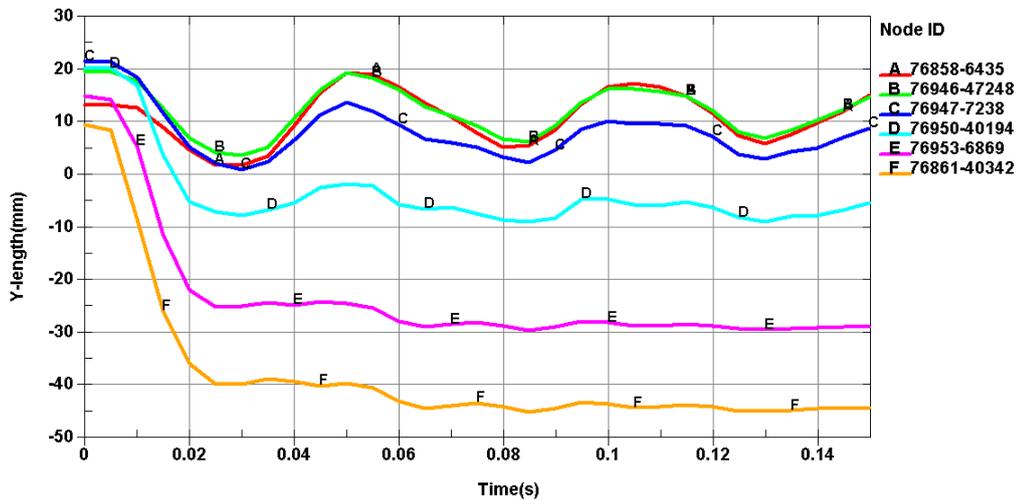
En la (gráfico 15-3) respecto al eje X, el travesaño lateral superior de la estructura se encuentra a una distancia promedio de 175mm de la superficie del espacio de supervivencia, esto antes de que la carga tome contacto. De igual forma , la carga ejercida en consecuencia genera la deformación, asimismo la distancia entre cada par de nodos empieza a disminuir, mostrándose que la estructura no incide el espacio de supervivencia, ya que no llega a (0), que es la posición del área de supervivencia, de modo similar que las tres simulaciones anteriores, el área con mayor deformación se presentó en los puntos E y F.



**Gráfico 15-3:** Criterio del espacio residual, simulación 4 respecto al eje X.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

Al mismo tiempo, la (gráfico 16-3), respecto al eje Y, muestra que el travesaño lateral superior de la estructura se encuentra a una distancia de 5 y 20 milímetros de la superficie del espacio de supervivencia, del mismo modo antes de que la carga tome contacto. Seguido la carga ejercida en consecuencia genera la deformación, ilustrandose que la distancia entre cada par de nodos empieza a disminuir, los puntos A,B,C no invaden la zona residual, ya que no llega a (0), que es la posición del área de supervivencia, mientras que en los puntos D,E,F se verificó la invasión en el área de supervivencia. De igual forma es preciso tener presente que el punto F, presentó la mayor deformación.



**Gráfico 16-3:** Criterio del espacio residual simulación 4 respecto al eje Y.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### 3.2. Validación de resultados mediante la energía de Hourglass

En la simulación, con el software de análisis por elementos finitos, la validación del estudio se evalúa mediante la energía de Hourglass, La energía de Hourglass deberá permanecer por debajo del 10% de la energía interna (Islam, et al. , 2019, p. 5), también se evalúa por debajo del 5% de la energía total (CEPE-R66 ,2011) . Con una relación simple se determinó el porcentaje de energía en las 4 simulaciones. En el que se verificó la validez de los resultados. véase la tabla 1-3.

**Tabla 1-3:** Validación de resultados en la simulación.

| Simulación   | Valor energía interna | Valor energía Hourglass | Porcentaje de validación $0 \leq H \leq 10\%$ |
|--------------|-----------------------|-------------------------|---|
| Simulación 1 | 21.66KJ               | 0.741KJ                 | $0 \leq 3.42\% \leq 10\%$                     |
| Simulación 2 | 22.0KJ                | 0.703KJ                 | $0 \leq 3.19\% \leq 10\%$                     |
| Simulación 3 | 1.7KJ                 | 0.091KJ                 | $0 \leq 5.35\% \leq 10\%$                     |
| Simulación 4 | 9.64KJ                | 0.328KJ                 | $0 \leq 3.40\% \leq 10\%$                     |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

### 3.3. Análisis estadístico

En el análisis estadístico se comparó la deformación de la estructura de las 4 simulaciones, al variar la carga, dos simulaciones con respecto al impacto del péndulo, reglamento CEPE R66 de anexo 7 y dos simulaciones de la carga ejercida mediante el ensayo FMVSS-216. Para ello se tomó los resultados de deformación máxima de los pares de nodos A, B, C, D, E, F, de las gráficas mostradas de cada simulación, donde se analizó la media, la varianza, la significancia tanto en el eje X e Y. En la (Tabla 2-3) y (Tabla 3-3) se presenta los datos seleccionados para el análisis.

**Tabla 2-3:** Deformación máxima, respecto al eje X.

| Simulaciones |              | Deformación máxima respecto al eje X(mm) |        |        |        |        |        |
|--------------|--------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
|              |              | A  | B      | C      | D      | E      | F      |
| 1            | Simulación 1 | 173.48                                   | 179.47 | 186.89 | 193.35 | 201.2  | 205.41 |
| 2            | Simulación 2 | 175.44                                   | 183.34 | 191.56 | 199.45 | 208.06 | 213.45 |
| 3            | Simulación 3 | 19.66                                    | 21.72  | 24.05  | 27.04  | 29.99  | 31.98  |
| 4            | Simulación 4 | 47.15                                    | 53.7   | 61.03  | 69.21  | 80.15  | 86.1   |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

**Tabla 3-3:** Deformación máxima, respecto al eje Y

| Simulaciones |              | Deformación máxima respecto al eje Y(mm) |       |       |       |       |       |
|--------------|--------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|              |              | A  | B     | C     | D     | E     | F     |
| 1            | Simulación 1 | 44.13                                    | 45.98 | 54.02 | 49.32 | 56.47 | 65.46 |
| 2            | Simulación 2 | 42.85                                    | 45.96 | 55.47 | 51.34 | 56.20 | 65.60 |
| 3            | Simulación 3 | 6.94                                     | 7.93  | 8.93  | 9.08  | 10.75 | 14.45 |
| 4            | Simulación 4 | 11.55                                    | 16.02 | 8.93  | 20.57 | 44.51 | 55.60 |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

El análisis estadístico de los resultados de deformación máxima respecto al eje X, se observa en la Tabla 4-3, Tabla 5-3, Tabla 6-3. El impacto del péndulo presenta una media de deformación máxima, que es mayor al ensayo FMVSS-216. En el análisis ANOVA el valor de P, muestra diferencia significativa entre las simulaciones. Del mismo modo de la tabla 6-3 se observó la diferencia significativa por el método (LSD) de Fisher con un nivel de confianza del 95%, de esta tabla hay que destacar que las letras iguales muestran que son significativamente iguales, por el contrario, las letras distintas son significativamente diferentes. La media de deformación máxima de 195.20 milímetros perteneciente a la simulación 2, excede con el 86.81% y del 66.1% respectivamente a las simulaciones 3,4.

**Tabla 4-3:** Medias de la deformación máxima, respecto al eje X.

| Simulación | N | Media  | Desv.Est. | IC de 95%        |
|------------|---|--------|-----------|------------------|
| 1          | 6 | 190.02 | 12.27     | (179.46; 200.58) |
| 2          | 6 | 195.20 | 14.57     | (184.64; 205.76) |
| 3          | 6 | 25.74  | 4.79      | (15.18; 36.30)   |
| 4          | 6 | 66.22  | 15.13     | (55.66; 76.78)   |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

**Tabla 5-3:** ANOVA para la deformación máxima, respecto eje X.

| Fuente  | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Ensayos | 3  | 133997    | 44665.6   | 290.49  | 0.000   |
| Error   | 20 | 3075      | 153.8     |         |         |
| Total   | 23 | 137072    |           |         |         |

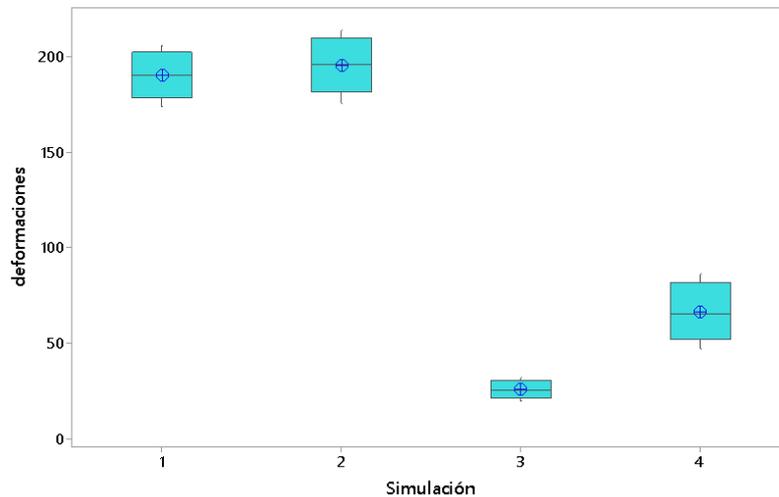
Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

**Tabla 6-3:** Diferencias significativas. Método (LSD) deformaciones máximas, eje X.

| Simulación | N | Media  | Agrupación |
|------------|---|--------|------------|
| 2          | 6 | 195.20 | A          |
| 1          | 6 | 190.02 | A          |
| 4          | 6 | 66.22  | B          |
| 3          | 6 | 25.74  | C          |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

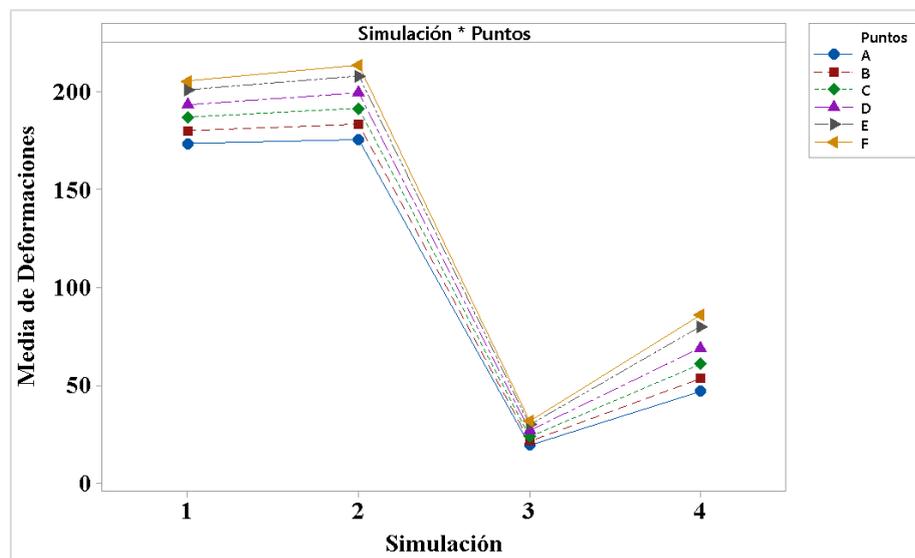
Para ilustrar mejor lo detallado en el párrafo anterior, en base a la tabla 2-3 se muestra la gráfica 17-3, en el que se determinó una variación simétrica de los valores de deformación máxima, sin embargo, se aprecia una diferencia significativa entre los valores que genera cada simulación. El nivel de deformación más bajo se presenta con el Ensayo FMVSS-216 con una carga de 1.5 PBV. La simulación presenta valores de desplazamiento muy por debajo de los demás. Se aprecia de forma clara, los niveles de deformación que se generó en cada simulación.



**Gráfico 17-3:** Deformación máxima frente a la simulación, eje X.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

De la gráfica 18-3, respecto del eje X, es preciso que la deformación máxima, de los datos seleccionados para la Tabla 2-3, En cada una de las simulaciones coincide que el valor máximo de deformación, se sitúa en la parte delantera de la estructura, en específico en los puntos E y F, Independientemente de las medias de deformación máxima que se generó en cada simulación. Por otra parte, se generó una menor deformación en la parte posterior, como se muestra en los puntos A y B.



**Gráfico 18-3:** Comparativo general, simulaciones, deformación, puntos, respecto del eje X.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

De modo similar, los resultados de deformación máxima respecto al eje Y, se observa en la Tabla 7-3, Tabla 8-3, Tabla 9-3. Igualmente, el impacto perteneciente a las dos primeras simulaciones presenta una media de deformación máxima, que es mayor al ensayo FMVSS-216. En el análisis

ANOVA fue conveniente especificar que el valor de P, también muestra diferencia significativa entre las simulaciones. La diferencia significativa por el método (LSD) de Fisher con un nivel de confianza del 95%, véase Tabla 9-3, presenta letras iguales que indican que son significativamente iguales, no obstante, las letras distintas son significativamente diferentes. Asimismo, la media de deformación máxima de 52.90 milímetros perteneciente a la simulación 2, excede con 81.70% y del 50.79% respectivamente en las simulaciones 3,4.

**Tabla 7-3:** Medias de la deformación máxima, respecto al eje Y.

| Simulaciones | N | Media | Desv.Est. | IC de 95%      |
|--------------|---|-------|-----------|----------------|
| 1            | 6 | 52.56 | 7.86      | (43.11; 62.02) |
| 2            | 6 | 52.90 | 8.13      | (43.45; 62.36) |
| 3            | 6 | 9.68  | 2.66      | (0.23; 19.13)  |
| 4            | 6 | 26.03 | 18.92     | (16.58; 35.48) |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

**Tabla 8-3:** ANOVA para la deformación máxima, respecto eje Y.

| Fuente     | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Simulación | 3  | 8101      | 2700.3    | 21.92   | 0.000   |
| Error      | 20 | 2464      | 123.2     |         |         |
| Total      | 23 | 10565     |           |         |         |

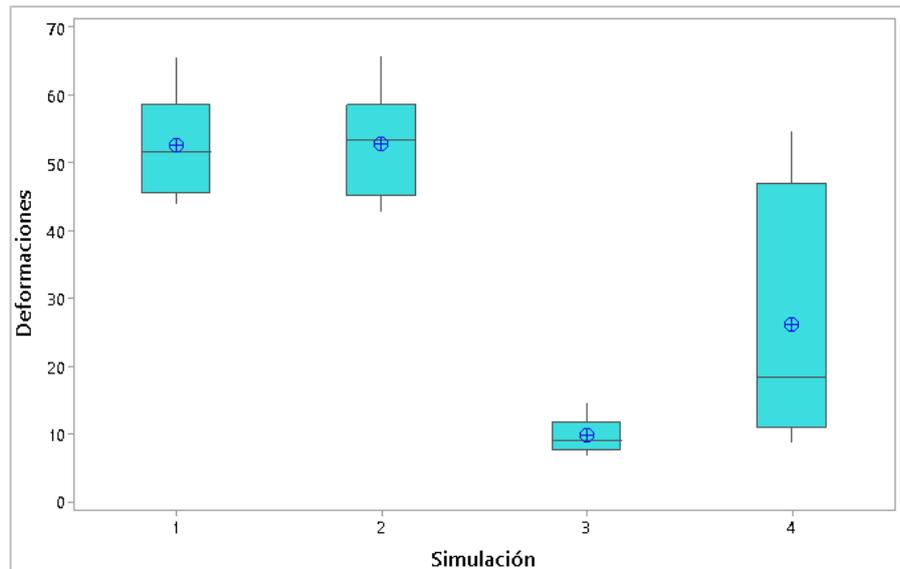
Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

**Tabla 9-3:** Diferencias significativas. Método (LSD) deformaciones máximas, eje Y.

| Simulación | N | Media | Agrupación |
|------------|---|-------|------------|
| 2          | 6 | 52.90 | A          |
| 1          | 6 | 52.56 | A          |
| 4          | 6 | 26.03 | B          |
| 3          | 6 | 9.68  | C          |

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

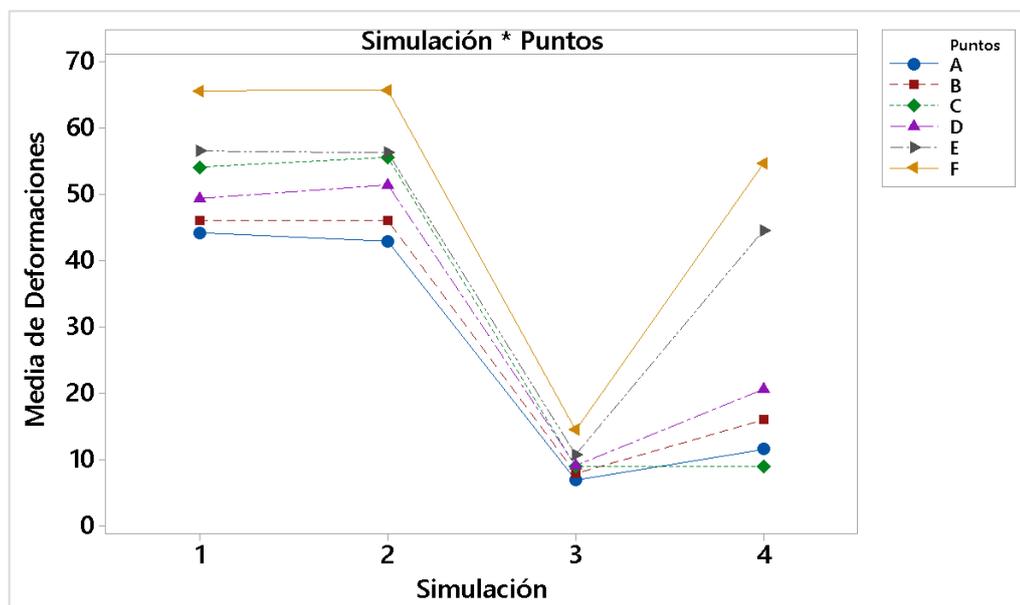
Los datos mostrados en la tabla 3-3 se tomaron para ilustrar con gráfica 19-3, donde se determinó una diferencia significativa comparándose las 4 simulaciones. A diferencia de la tabla 2-3 la simulación 4 presenta una variabilidad en los valores de deformación máxima, mientras las demás simulaciones no presentan mucha variabilidad. Comparándose la deformación con el eje X, en el eje Y, se presenta una menor deformación, por supuesto que existe una mayor distancia respecto al eje X. cabe recalcar que la menor deformación quizá requiere una carga mayor, para compararse con el reglamento CEPE REE.



**Gráfico 19-3:** Deformación máxima frente a la simulación, eje Y.

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

De la gráfica 20-3, respecto del eje Y, es preciso que la deformación máxima, de los datos seleccionados de la Tabla 3-3, del mismo modo indistintamente de cada simulación coincide que el valor máximo de deformación, se sitúan en la parte delantera de la estructura, en específico en los puntos E y F, Independientemente de las medias de deformación máxima que se genera en cada simulación. Por otra parte, se generó una menor deformación en la parte posterior, como se muestra en los puntos A y B.



**Gráfico 20-3:** Comparativo general, simulaciones, deformación, puntos, respecto del eje Y

Realizado por: Yautibug, Edison, 2021

## **Análisis de resultados**

Los resultados de energía que se generó en las distintas simulaciones, mostraron una gran diferencia en sus valores. La simulación 2 con una masa de péndulo de 1500kg, mostró los valores de energía más altos, con una energía total máxima de 24.2KJ, la energía interna de 22.0 KJ, por otro parte el ensayo FMVSS-216, presenta valores de energía más bajos, comparándose los valores de energía total de la simulación 2 con las dos simulaciones del ensayo FMVSS-216, se presenta una diferencia del 91% y del 60% con la simulación 3 y 4 respectivamente.

Por otra parte, los valores de desplazamiento resultante de 256.69mm, 264.67mm, 36.64mm y 110.01mm correspondientes a la simulación 1, simulación 2, simulación 3, simulación 4 respectivamente, independientemente de la carga o simulación que se realizó, coinciden que el área crítica con mayor desplazamiento se localiza en la parte delantera de la estructura, específicamente en la parte superior del conductor, en las gráficas se muestra un color rojo intenso.

Para precisar los resultados de distribución de tensión por el criterio de Von Misses con valores de tensión máxima de 587Mpa, 589.55Mpa, 459.192Mpa y 569.19Mpa perteneciente a la simulación 1, simulación 2, simulación 3, simulación 4 respectivamente. En la simulación 1 y 2 se presentan valores de tensión altos en los parantes, marco posterior, pilares del techo ya que son los elementos estructurales que presentan mayor resistencia. En la simulación 3 y 4 se verificó valores de tensión más bajos, en el que la zona más crítica se localiza en el área del chofer en la parte superior de la estructura.

Además de ello, los 12 nodos seleccionados para la verificación de la incidencia en el espacio supervivencia, en las dos primeras simulaciones respaldadas por CEPE R66, anexo 7, respecto al eje X, invadió la zona de supervivencia en un instante muy corto, seguido, la estructura tiende a recuperarse de la deformación en la zona plástica, quedando finalmente fuera del área de supervivencia, Por otra parte, en el eje Y, la estructura, a pesar de su recuperación en la zona plástica, permanentemente invadió la seguridad de los pasajeros , con un valor máximo en el punto F de 60mm.

Respecto al mismo eje X, las dos simulaciones del ensayo FMVSS-216 no tomó contacto con esta área en ningún momento. Sin embargo, en el eje Y con una carga de 1.5 veces el PBV el punto F, es el único punto que sobrepasó el espacio residual, por otro lado, con una carga de 3 veces el PBV los puntos D, E, F de la parte delantera invade esta área, con un valor máximo en el punto F de 40mm.

### 3.4. Discusión

Conviene especificar los resultados de deformación máxima mostrados en la tabla 2-3, tabla 3-3 de las dos simulaciones conforme al reglamento (CEPE-R66 ,2011, p. 34)anexo 7, Respecto al eje X la deformación máxima en la parte delantera lateral de la estructura excedió 15.56% y del 17.80% a la parte posterior lateral. De forma similar respecto al eje Y, la deformación máxima en la parte delantera lateral de la estructura excedió el 32.58% y 34.67% a la parte posterior lateral. Ahora bien, (Wicaksono et al. ,2017, p. 7) en su estudio determinó que la resistencia del bus en el marco delantero y trasero presenta mayor resistencia que los marcos medios. Por otra parte (Karliński et al. ,2014, p. 11) en un autobús de dimensiones pequeñas comprobó una mayor resistencia en parte posterior que la delantera de la estructura. En el presente estudio la estructura de la furgoneta presentó mayor resistencia en el marco posterior, con menor resistencia en la parte delantera de la estructura.

Observemos cómo los resultados de deformación máxima mostrados por la misma tabla 2-3, tabla 3-3 en las dos simulaciones basadas en el ensayo FMVSS-216, Respecto al eje X la deformación máxima en la parte delantera lateral de la estructura excedió 50.82% y 45.23% a la parte posterior lateral. De igual forma, respecto al eje Y, la deformación máxima en la parte delantera lateral de la estructura excedió el 51.54% y 79.22% a la parte posterior lateral. Retomando lo mencionado por , (Wicaksono et al. ,2017, p. 7) la resistencia del bus en el marco delantero y trasero presenta mayor resistencia que los marcos medios. En cambio (Karliński et al. ,2014, p. 11) encontró mayor resistencia en la parte posterior de la estructura que la delantera. De igual forma en el presente estudio, la estructura de la furgoneta presentó mayor resistencia en el marco posterior, con menor resistencia en la parte delantera de la estructura.

Los resultados de las gráficas 1-3, gráfica 2-3, pertenecientes a la simulación 1 y simulación 2 con masa del péndulo de 1000kg y 1500kg respectivamente. En el comportamiento de las energías por el impacto (CEPE-R66 ,2011, p. 34)Anexo 7 , la energía cinética del péndulo es absorbida por la estructura, esta a su vez se convierte en energía interna, la energía interna alcanza su valor más alto, mientras la estructura absorbe completamente la energía cinética, son curvas características que se asimilan a los resultados de (Chirwa, Li y Qian ,2015, p. 10) de 65KJ, (Wicaksono et al. ,2017, p. 9) con 60KJ, teniendo presente que los valores de energía total descritos pertenecen a investigaciones con vehículos de grandes dimensiones (bus), por lo tanto los niveles de energía son mayores. Ahora bien los resultados de (Karliński et al. ,2014, p. 11) presentó una curva característica similar a los demás autores con 30KJ de energía total en un autobús de dimensiones menores. De esta manera los niveles de energía del presente estudio (Furgoneta) presentó valores próximos al último por las dimensiones menores del vehículo.

En los resultados mostrados en la Tabla 1-3, la energía de Hourglass de las distintas simulaciones presentó un porcentaje bajo, en relación a la energía interna. Este porcentaje no deberá superar el 10%, siendo el porcentaje ideal el cero. Al compararse los resultados obtenidos por (Zhang et al. ,2012; Karliński et al. ,2014; Chirwa, Li y Qian ,2015; Mihradi et al. ,2015; Wicaksono et al. ,2017) en sus investigaciones, el presente estudio se obtuvo un porcentaje similar, mostrándose la validez de los resultados.

## CONCLUSIONES

Se aplicó la carga dispuesta conforme al reglamento CEPE R66 anexo 7 en la estructura de la furgoneta de tipo M2, mediante el análisis computacional, donde la distribución de tensión en la estructura presentó valores que superan el límite elástico, presentando una gran deformación en el travesaño lateral superior por el contacto directo, debido a un volumen total muy reducido, el área fuera del espacio de supervivencia es muy limitado, por consiguiente, el riesgo para los pasajeros es mayor, la estructura en estudio a diferencia de los buses deberá presentar mayor resistencia en las propiedades del material.

Se investigó el modelo de furgoneta de pasajeros más utilizado en el país en el que para dimensionarse una estructura requiere de características principales como las dimensiones generales y los elementos estructurales como: los largueros, travesaños inferiores, parantes, travesaño superior lateral, travesaño frontal, travesaño posterior, los pilares del techo, que en conjunto absorben energía de los cuerpos externos.

Se modeló la estructura de la furgoneta mediante el software CAD SolidWork en el que en su inicio requería de dimensiones generales e imágenes donde en el coquizado del recubrimiento externo, seguido la parte estructural se utilizó superficies (Shell), que en base a los diferentes autores son los elementos ideales para el análisis explícito no lineal.

En la simulación del impacto del péndulo conforme al reglamento CEPE R66 anexo 7, con dos cargas distintas, presentó un comportamiento similar en los valores de energía, la capacidad de absorción de energía por medio del cálculo se asemeja a la capacidad de absorción que presenta la estructura en la simulación, de este modo el porcentaje de la energía de Hourglass presenta un porcentaje dentro de lo estipulado para las simulaciones. En efecto conviene distinguir que respecto al eje X la deformación máxima de la parte delantera lateral de la estructura excede 15.56% y del 17.80% a la parte posterior. De manera similar, respecto al eje Y, la deformación máxima de la parte delantera lateral de la estructura excede el 32.58% y 34.67% a la parte posterior. En los dos ejes mencionados durante el impacto invadieron el espacio de supervivencia.

En la simulación conforme al ensayo FMVSS-216, con dos variantes de carga indicadas en el ensayo, el comportamiento en la energía presenta valores bajos, de manera similar, el porcentaje de la energía de Hourglass presentó un valor dentro de lo estipulado. En efecto conviene distinguir que respecto al eje X la deformación máxima de la parte delantera lateral de la estructura excede 50.82% y 45.23% a la parte posterior. De manera similar, respecto al eje Y, la deformación máxima de la parte delantera lateral de la estructura excede el 51.54% y 79.22% a la parte

posterior. No obstante, el eje X no invade la zona de supervivencia, mientras que el eje Y, existen puntos que invaden esta área.

Comparándose los resultados entre el reglamento CEPE R66 anexo 7 y el ensayo FMVSS -216 bajo los mismos parámetros iniciales como: tipo de elementos, tamaño de malla, calidad de malla, espesor, propiedades del material, entre otros. El reglamento 66 presentó una mayor deformación en la estructura a causa del impacto, que incide mayormente en el espacio de supervivencia. También cabe comparar el tema de energías con el impacto del péndulo supera con el 91 y 60 % a la carga ejercida. Por medio del análisis estadístico ANOVA con un nivel de confianza del 95% se observó una diferencia significativa entre los valores de deformación, sin embargo, comparten un criterio similar que el área con mayor riesgo se localiza en la parte delantera de la estructura.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda que, en próximos estudios relacionados a impacto de vuelco, se realice la revisión literaria respecto al reglamento CEPE R66, seguido las propiedades del material en la estructura de la furgoneta deberán presentar una mayor resistencia que los materiales comunes utilizados en los buses.

Es importante que las configuraciones del preproceso como: condiciones de contacto, restricciones entre otros, se realicen de forma correcta ya que de esta depende la validez de los resultados y un porcentaje de Hourglass aceptable.

Al modelar la estructura se recomienda el uso de superficies (Shell) para el análisis explícito, ya que permite economizar los recursos computacionales en el procesamiento. Dentro de ello se recomienda estudios similares de simulación con el procedimiento y parámetros descritos en la presente investigación.

Se recomienda realizar un estudio individual conforme a CEPE R66 añadiendo elementos estructurales o propiedades del material que mejore la resistencia estructural, para con ello asegurar que durante y después de un vuelco no incida en la zona de supervivencia.

Los resultados de simulación son una base importante del presente proyecto, por ello se propone una plataforma de ensayo físico de impactos de vuelco que permita validar los resultados obtenidos, así también con el modelo geométrico de la furgoneta se recomienda realizar diferentes análisis de elementos finitos en impactos como: frontales, laterales, posteriores. Finalmente, con el procedimiento metodológico descrito en el documento principal, en el anexo A y B se recomienda realizar un análisis MEF con las propiedades y curvas del material que se encuentren disponibles en el laboratorio de materiales de nuestra prestigiosa institución.

## **GLOSARIO**

**AEADE:** Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador

**ANT:** Agencia Nacional de Tránsito

**CAD:** Diseño Asistido por Computadora

**CAE:** Ingeniería asistida por computadora

**CEPE:** Comisión Económica de la Naciones Unidas para Europa

**FMVSS:** Federal Motor Vehicle Safety Standards (Normas Federales de seguridad para vehículos de Motor)

**NTE INEN 2656:** Norma Técnica Ecuatoriana: Clasificación vehicular

**NHTSA:** National Highway Traffic Safety Administration

**NCAC:** National Crash Analysis Center (Centro Nacional de Análisis de Choques)

**MEF:** Métodos de elementos finitos

**PBV:** Peso bruto vehicular

**SR:** Zona residual

## BIBLIOGRAFÍA

**ABDUL HAMID, I.; & LI, Q.M.** "New definitions of deformation index for the measurement of bus survival space in crash". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 233, no. 8(2019), pp. 2108-2119. ISSN 09544070. DOI 10.1177/0954407018770541.

**AEADE.** Sector Automotor en cifras – Mayo 2020 – AEADE. [En línea], 2020. [Consulta: 1 diciembre 2020]. Disponible en: [https://www.aeade.net/sdm\\_downloads/sector-automotor-en-cifras-mayo-2020/](https://www.aeade.net/sdm_downloads/sector-automotor-en-cifras-mayo-2020/).

**ALONSO HENÁNDEZ, D.** Simulación de ensayo de protección de peatón con modelos de ensayo simplificados Mediante Ls-Dyna (Trabajo de titulación) (Pre-grado). [en línea]. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2015. pp. 30-80. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/25291>.

**ANSYS.** Tutorial ANSYS 19.1 — Ansys Learning Forum. [En línea], 2019. [Consulta: 10 enero 2021]. Disponible en: <https://forum.ansys.com/discussion/2871/tutorial-ansys-19-1>.

**ARROBA, C.** Estudio del comportamiento mecánico de una sección de la superestructura del autobús interprovincial marca Miral Infiniti en chasis Hino Ak sometida a volcadura, mediante los programas Ansys Ls-Dyna y su incidencia en el espacio de supervivencia (Trabajo de titulación) (Maestría). [En línea]. Ecuador: Universidad Técnica de Ambato. 2013. pp. 6-31. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/5705>.

**BERNAL, C.A.** *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales* [en línea]. Tercera ed. Colombia: Pearson, 2010. ISBN 978-958-699-128-5. Disponible en: <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-%0Ainvestigación-F.G.-Arias-2012-pdf.pdf>.

**CARMAN, E.** Mallado por elementos finitos. [en línea], 2014. [Consulta: 16 diciembre 2020]. Disponible en: <https://grupocarman.com/blog/2014/10/30/mallado-por-elementos-finitos/>.

**CEPE-R66.** *Comisión Económica para Europa Reglamento N° 66.*

**CEPEDA, J.** Vista de Primer Laboratorio de Ensayos Estructurales Virtuales de Autobuses en Latinoamérica: Innovación y Acreditación | Revista Técnica «energía». [en línea], 2020. Disponible en: <http://revistaenergia.cenace.org.ec/index.php/cenace/article/view/364/421>.

**CHIRWA, C.** "Vehicle Roof Crush Modelling & Validation". 5 th European LS-DYNA Users Conference, vol. 0044, no. 4(2005).

**CHIRWA, E.C.; et al.** "Modelling a 32-seat bus and virtual testing for R66 compliance". International Journal of Crashworthiness, vol. 20, no. 2(2015), pp. 200-209. ISSN 17542111. DOI 10.1080/13588265.2014.997504.

**COLOMÉ, Graciela; &FEMENIA, Paúl** Metodología de investigación para estudiantes de posgrado en ingeniería [En línea]. Primera ed. San Juan, Argentina: Ediciones Plaza, 2018. ISBN 978-987-770-605-5. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/332652994\\_METODOLOGIA\\_DE\\_INVESTIGACION\\_%0APARA\\_ESTUDIANTES\\_DE\\_POSGRADO\\_EN\\_INGENIERIA](https://www.researchgate.net/publication/332652994_METODOLOGIA_DE_INVESTIGACION_%0APARA_ESTUDIANTES_DE_POSGRADO_EN_INGENIERIA).

**COLORADO, J.** Análisis de las características de los modelos de material recomendados para la simulación de procesos de embutición de chapa de acero (Trabajo de titulación) (Pre-grado). [En línea]. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2008. pp. 43-47. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/12202>.

**DIPAC.** Planchas Laminadas. [En línea], 2021. Disponible en: <https://www.dipacmanta.com/planchas-de-acero/planchas-acero-negro>.

**GARCÍA, Andrea** Análisis mediante simulación computacional del ensayo de vuelco en superestructuras para autobuses (Trabajo de titulación) (Pre-grado). Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. 2019. pp. 9-16.

**GARCÍA GAYOL, N.** Simulación de un proceso de embutición Mediante Ansys Ls-Dyna (Trabajo de titulación) (Pre-grado). [en línea]. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2009. pp. 36-64. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/7664>.

**HYUNDAI.** Catálogo Hyundai H1-Travel. [en línea], 2020. [Consulta: 20 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.hyundai.com/es/modelos/h1/descargar-catalogo.html>.

**ILLESCAS PÉREZ, D.D.** Simulación de un choque frontal de un vehículo automóvil contra diferentes tipos de barrera (Trabajo de titulación) (Pre-grado). Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2009. pp. 88-100.

**ISLAM, M. Tajamul; et al.** "Study of Behavior of RCC Beam under Impact Loading and Effect of Hourglass Energy by Finite Element Analysis using ANSYS". International Journal of Engineering and Technical Research [en línea], vol. 8, no. 7(2019), pp. 131-132. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/334536701\\_Study\\_of\\_Behavior\\_of\\_RCC\\_Beam\\_under\\_Impact\\_Loading\\_and\\_Effect\\_of\\_Hourglass\\_Energy\\_by\\_Finite\\_Element\\_Analysis\\_using\\_ANSYS](https://www.researchgate.net/publication/334536701_Study_of_Behavior_of_RCC_Beam_under_Impact_Loading_and_Effect_of_Hourglass_Energy_by_Finite_Element_Analysis_using_ANSYS).

**KARLIŃSKI, J.; et al.** "Strength analysis of bus superstructure according to Regulation No. 66 of UN/ECE". Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 14, no. 3(2014), pp. 342-353. ISSN 16449665. DOI 10.1016/j.acme.2013.12.001.

**KULKARNI, S.C. & MARKS, M.** "Thermoplastic roof crush countermeasure design for improved roof crush resistant to meet FMVSS-216". SAE 2011 World Congress and Exhibition, ISSN 0148-7191. DOI 10.4271/2011-01-1119.

**MANUAL KEYWORD LS-DYNA.** Ls-Dyna ® Keyword user's manual volume I Livermore Software Technology (LST), AN ANSYS COMPANY. [en línea], 2014. [Consulta: 19 diciembre 2020]. Disponible en: [www.lstc.com](http://www.lstc.com).

**MIHRADI, S.; et al.** "Computer modeling of energy absorbing capability of bus superstructure for rollover safety". Technological Research Department, Government Technical Institute Pyin Oo Lwin, Mandalay, Myanmar [en línea], vol. 18, no. 2(2015), pp. 331-338. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/266463358\\_COMPUTER\\_MODELING\\_OF\\_ENERGY\\_ABSORBING\\_CAPABILITY\\_OF\\_BUS\\_SUPERSTRUCTURE\\_FOR\\_ROLLOVER\\_SAFETY](https://www.researchgate.net/publication/266463358_COMPUTER_MODELING_OF_ENERGY_ABSORBING_CAPABILITY_OF_BUS_SUPERSTRUCTURE_FOR_ROLLOVER_SAFETY).

**NHTSA.** Crash Simulation Vehicle Models | NHTSA. [En línea], 2013. [Consulta: 10 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>.

**NTE INEN 2656.** *Clasificación vehicular.* pp. 3-9.

**NÚÑEZ MILÁN, G.** Simulación De Un Ensayo De Vuelco De Autobús Mediante Ls-Dyna (Trabajo de titulación) (Pre-grado). [en línea]. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2016. pp. 50-70. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/27065>.

**RAMIREZ, Laura.** Mejoramiento de las propiedades de las aleaciones. [en línea], 2016. [Consulta: 22 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/LauraSofiaRamirez/mejoramiento-de-las-propiedades-de-las-aleaciones>.

**WICAKSONO, S.; et al.** "Finite element analysis of bus rollover test in accordance with UN ECE R66 standard". *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 49, no. 6(2017), pp. 799-810. ISSN 23375779. DOI 10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.6.7.

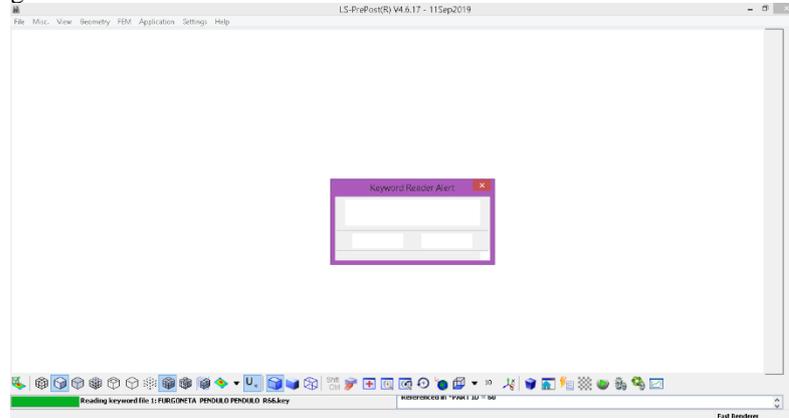
**ZHANG, G.; et al.** "The study of bus superstructure strength based on ECE R66". *Advanced Materials Research*, vol. 430-432, no. 2012(2012). pp. 1799-1804. ISSN 10226680. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.430-432.1799.

## **ANEXOS**

## ANEXO A: Procedimiento metodológico utilizado anexo 7 CEPE R66.

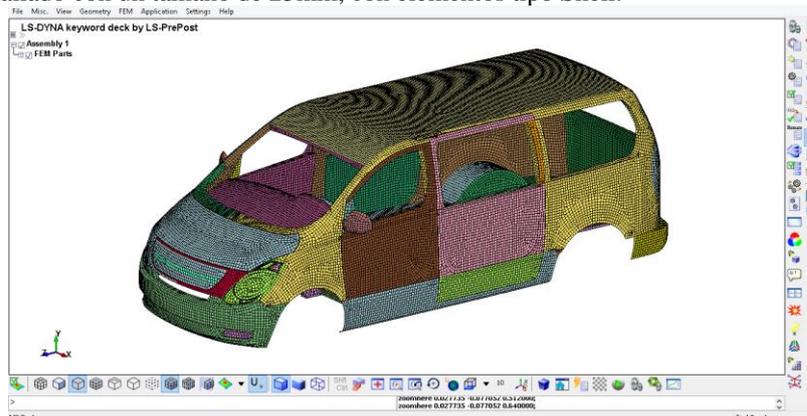
Una vez obtenido el modelo geométrico, para la simulación se ingresó la siguiente configuración, con el orden detallado en esta sección, donde el modelado se detalla en 2.8, y los puntos 2.10.1, 2.10.2, 2.10.3 se muestra los cálculos respectivos, para la simulación. Para profundizar las configuraciones de las cartas utilizadas, se recomienda revisar el manual uno y dos para un mejor entendimiento.

Se importó el modelo geométrico, con formato STEP, al programa Ls-Dyna en el que se generó el mallado general de la furgoneta. De forma individual. Como se ilustra a continuación.

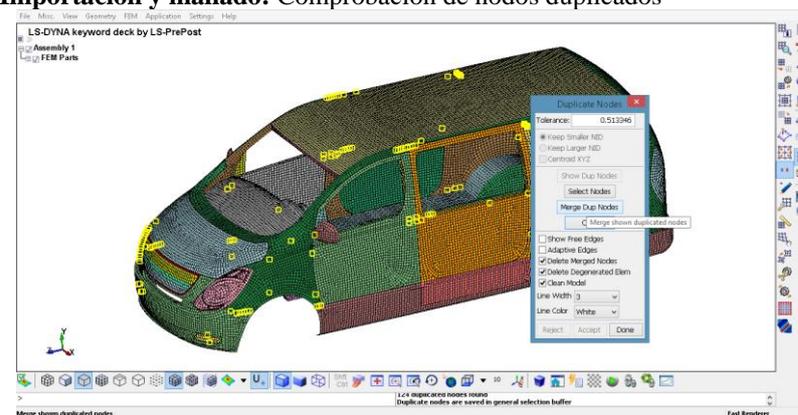


### Importación del modelo y mallado.

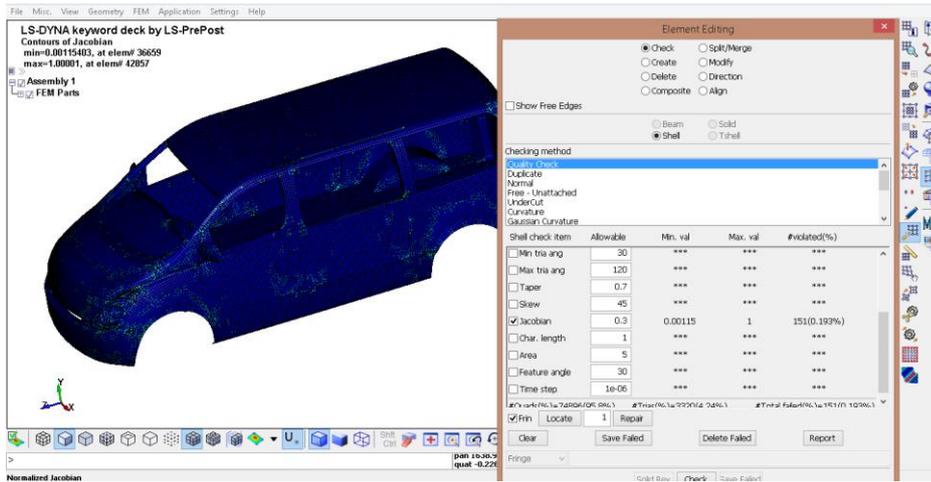
**Véase 2.10.5 Importación y mallado:** Se importó en su inicio la parte estructural de la furgoneta, posterior se generó el mallado con un tamaño de 25mm, con elementos tipo Shell.



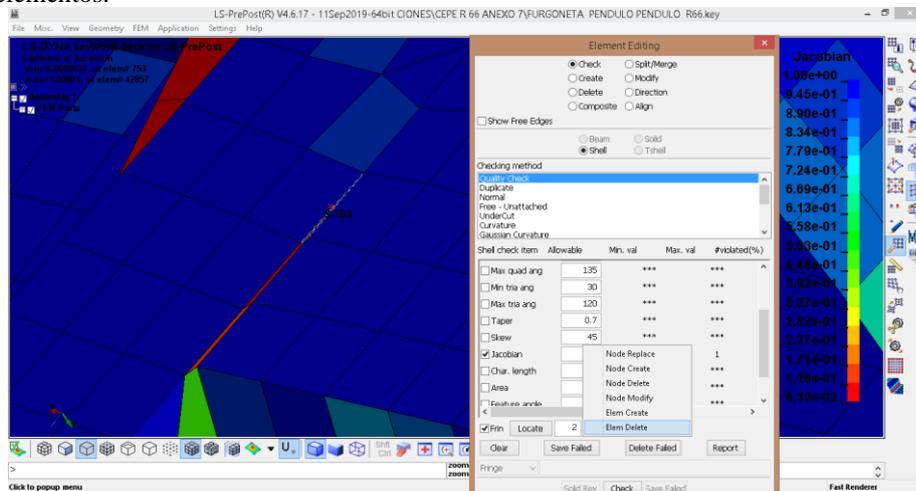
**Véase 2.10.5 Importación y mallado:** Comprobación de nodos duplicados



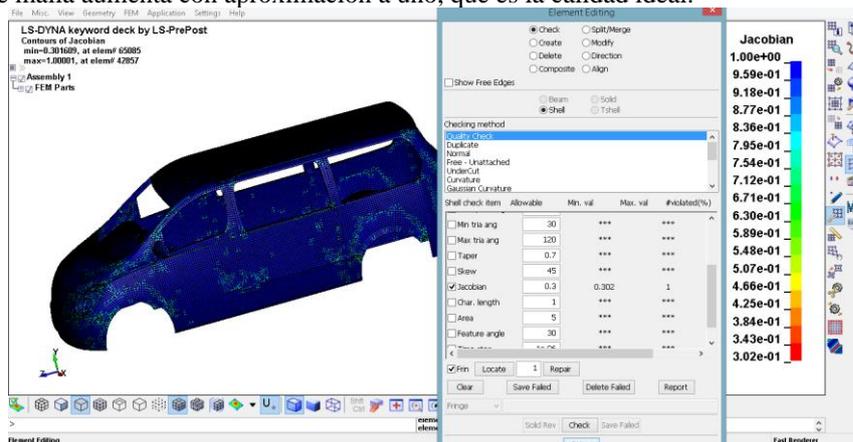
**Véase 2.10.5 Importación y mallado:** Comprobación de calidad de malla, por el criterio de Jacobiano



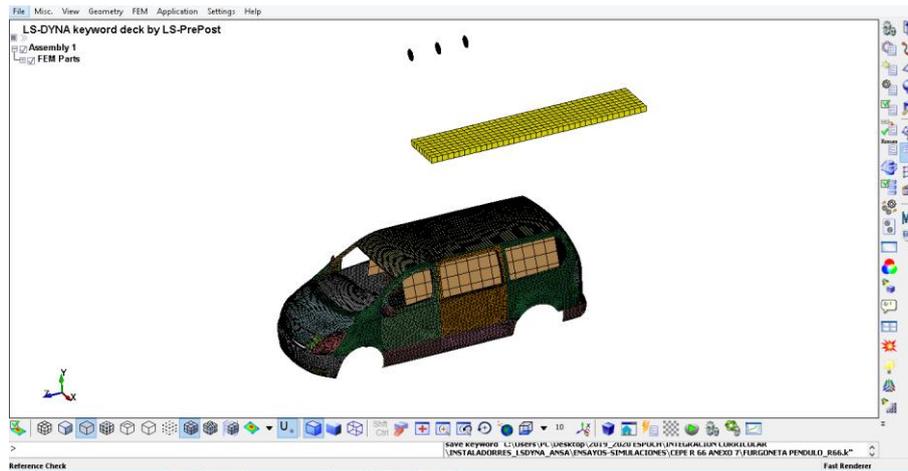
**Véase 2.10.5 Importación y mallado:** Se indentifica los elementos, que generan una calidad baja, se utilizó las opciones mostradas como: Remplazar nodo, crear nodos, eliminar nodos, crear elementos, eliminar elementos.



**Véase 2.10.5 Importación y mallado:** Al corregir los elementos que generan una calidad baja, el criterio de calidad de malla aumenta con aproximación a uno, que es la calidad ideal.

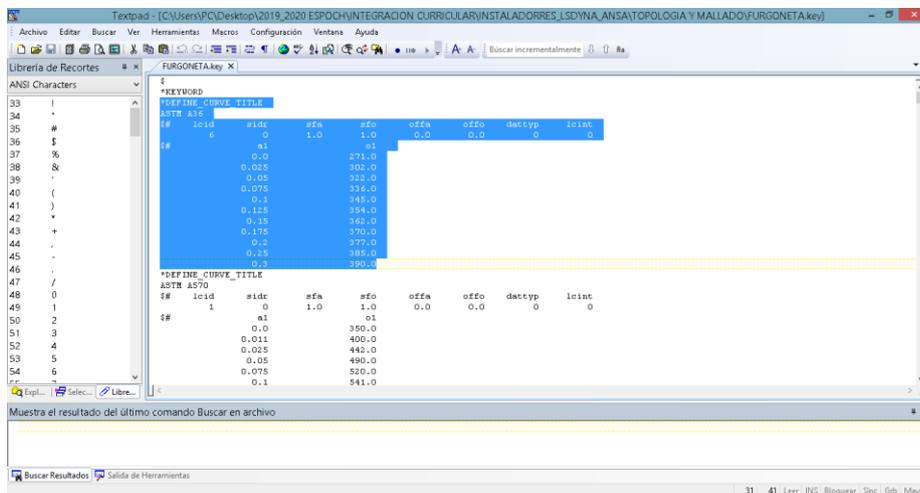


Importación y mallado de elementos externos requeridos para la simulación. Soportes, junta base, pendulo, espacio de supervivencia. Véase 2.10.5

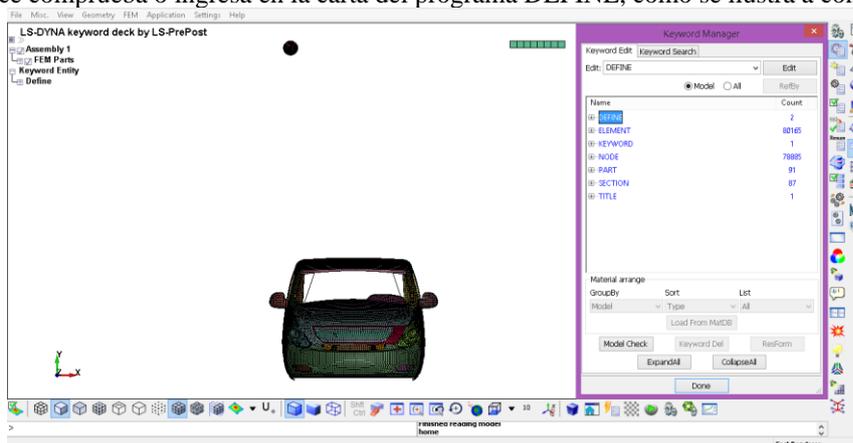


### Propiedades del material utilizado

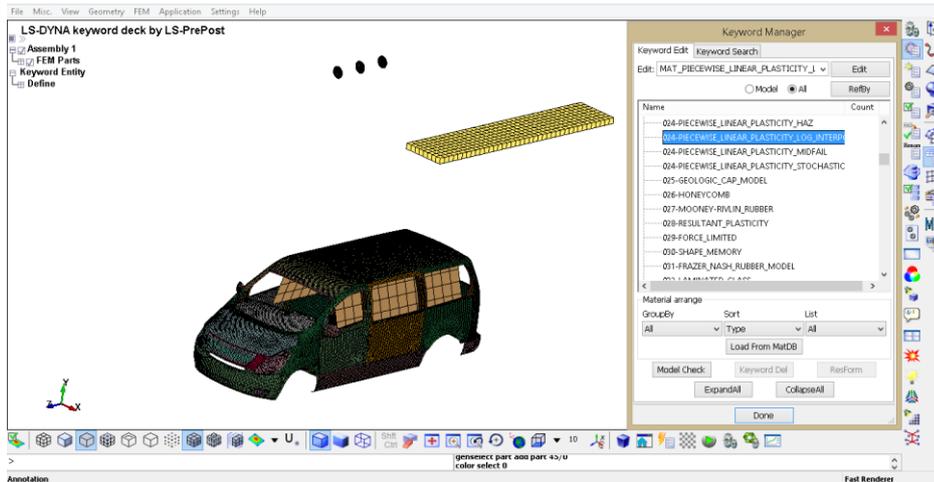
Véase 2.10.6 Propiedades del material utilizado, se seleccionó dos curvas de tensión del modelo Toyota Yaris 2010. Desarrollado por la NCAC, sin embargo, se podría asignar otras propiedades del material.



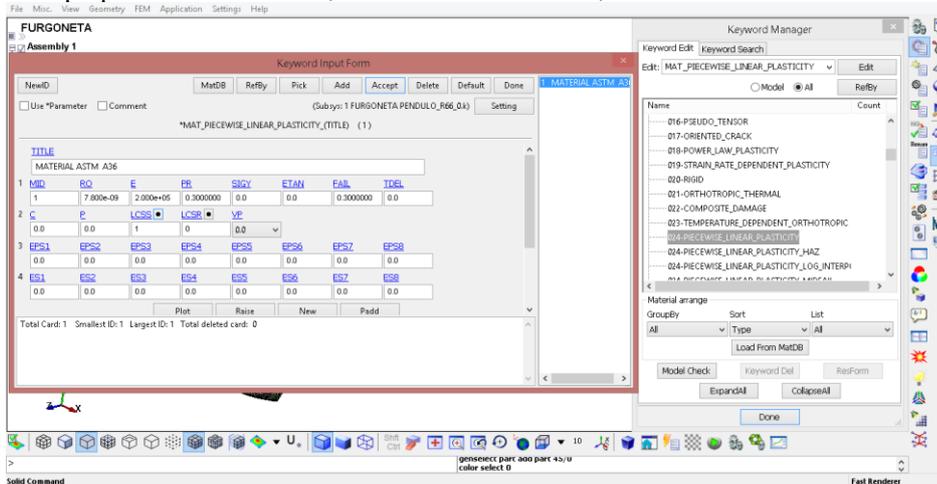
Los valores se comprueba o ingresa en la carta del programa DEFINE, como se ilustra a continuación.



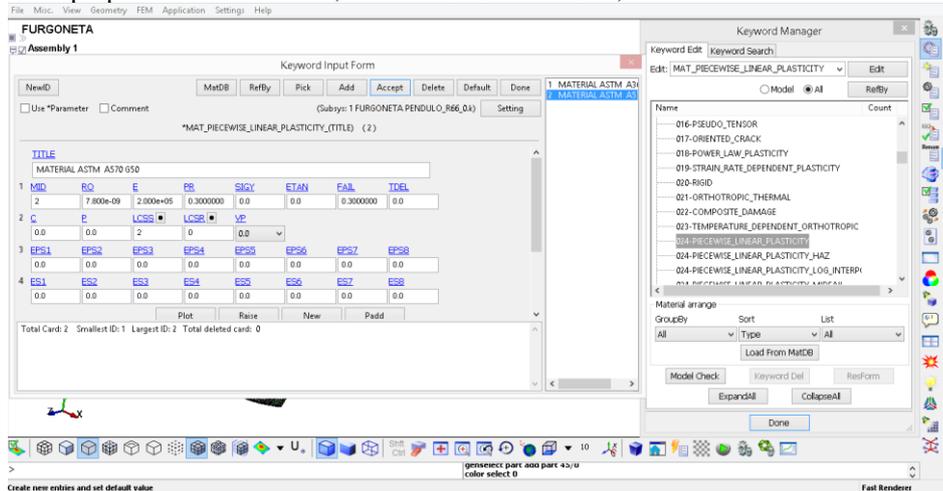
Véase 2.10.6 Propiedades del material utilizado: Selección del modelo del material no lineal 024-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY



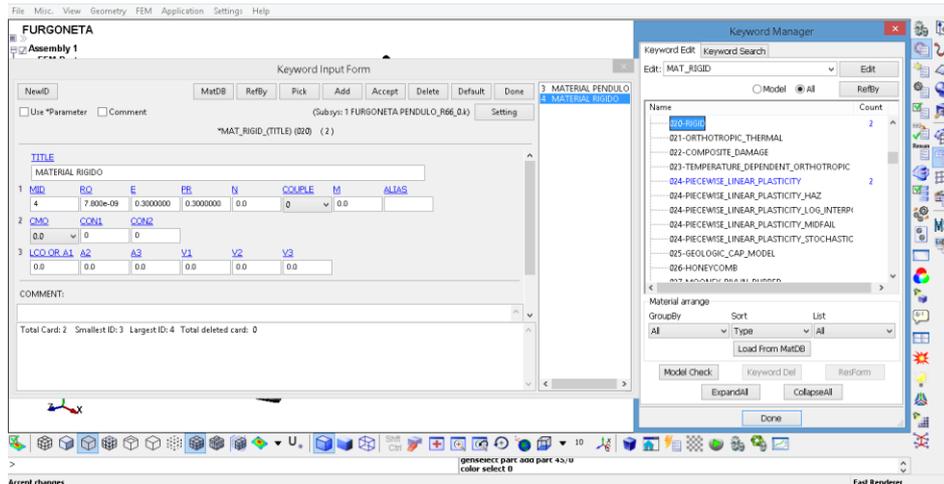
Ingreso de las propiedades del material, **recubrimiento externo**, incluir curva uno.



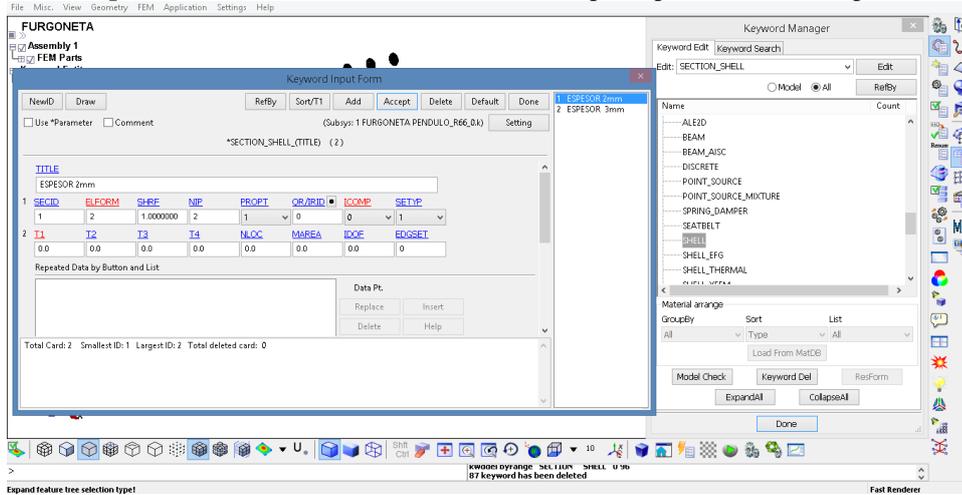
Ingreso de las propiedades del material, **elementos estructurales**, incluir curva dos.



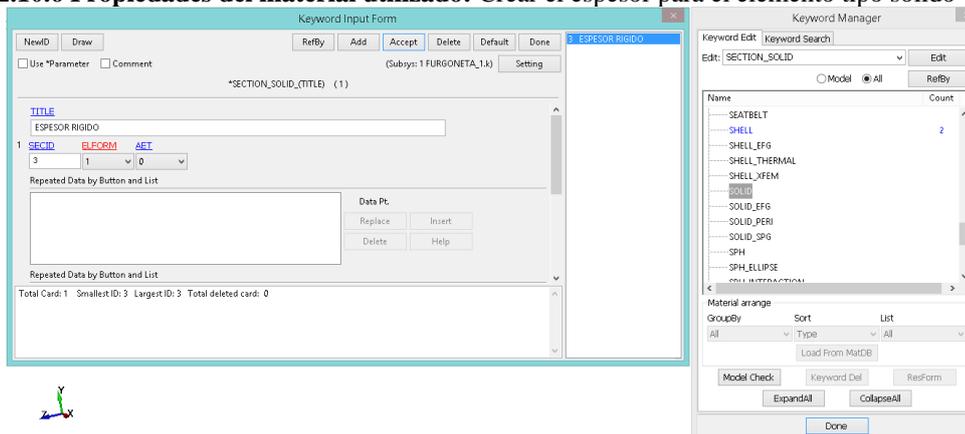
Ingreso de las propiedades del material rígido, **péndulo**



**Véase 2.10.6 Propiedades del material utilizado: Crear el espesor para el elemento tipo Shell.**

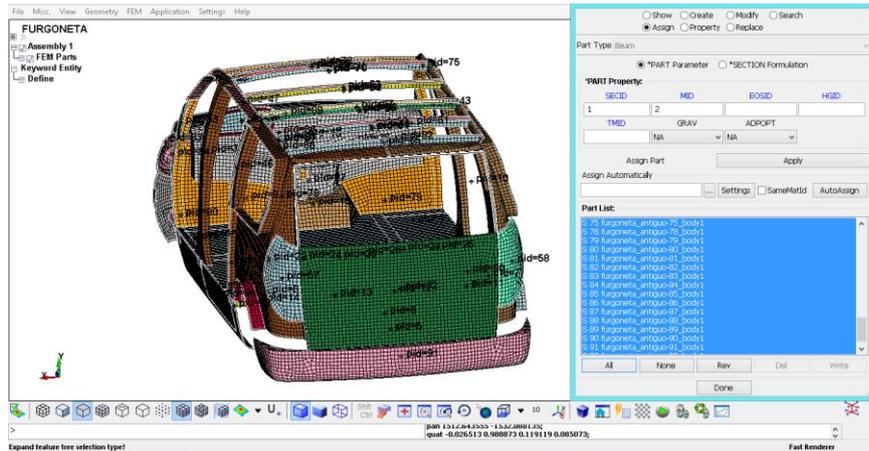


**Véase 2.10.6 Propiedades del material utilizado: Crear el espesor para el elemento tipo sólido-péndulo.**

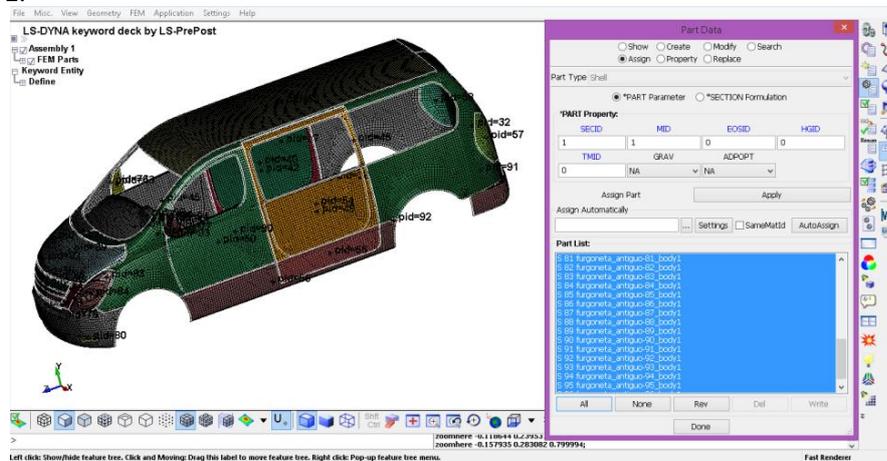


**Asignar secciones y materiales a las partes correspondientes**

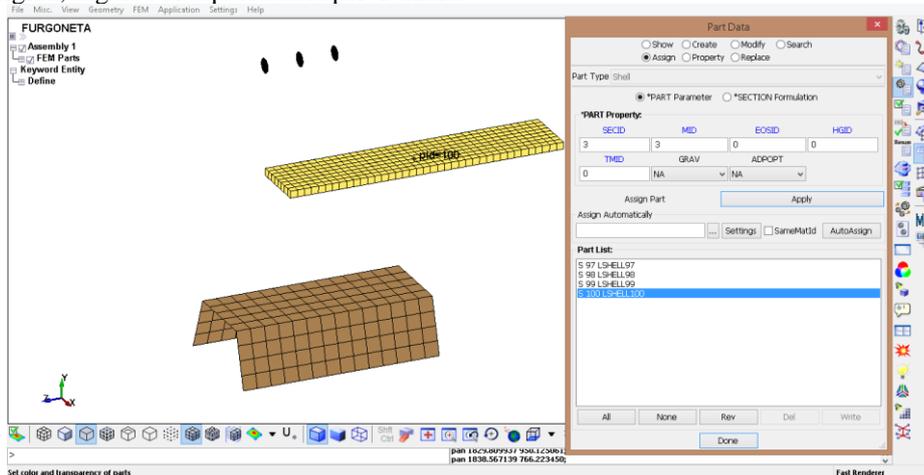
**Véase 2.10.6 Propiedades del material utilizado: A los elementos estructurales, se asignó las propiedades de la tabla 12-2.**



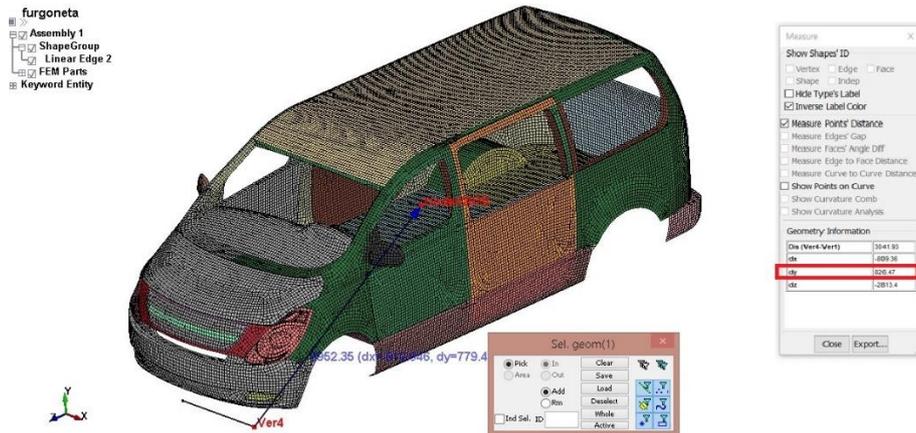
**Véase 2.10.6 Propiedades del material utilizado:** Al recubrimiento externo, se asignó las propiedades de la tabla 11-2.



**Véase 2.10.6 Propiedades del material utilizado:** Al soporte de giro de péndulo, péndulo se asignó el material rígido, seguido al espacio de supervivencia.

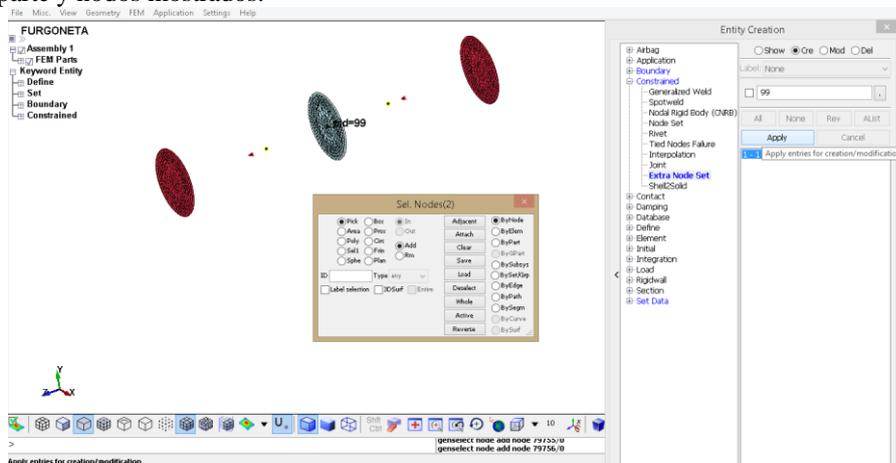


**Véase 2.10.1 Cálculo del centro de gravedad:** Como se indicó para determinar los valores del centro de gravedad debe asignarse el material y espesor a toda la estructura de la furgoneta, ocultando los demás elementos como el péndulo, el soporte, caso contrario no se mostrará ningún valor.

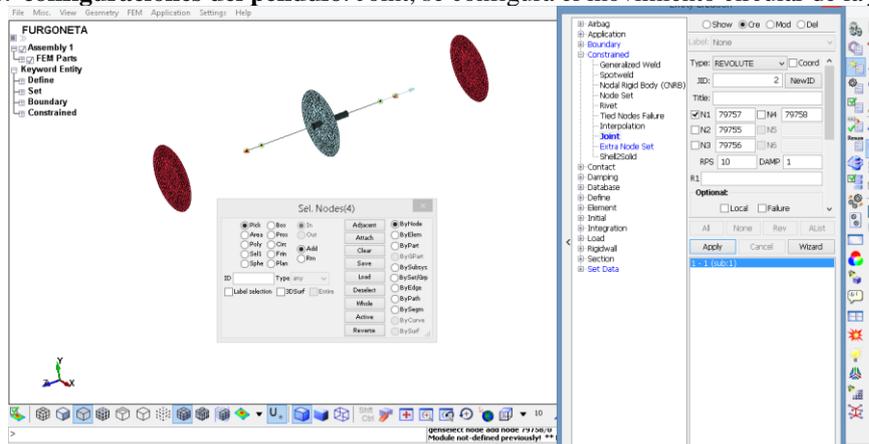


**Condiciones de contorno y restricciones**

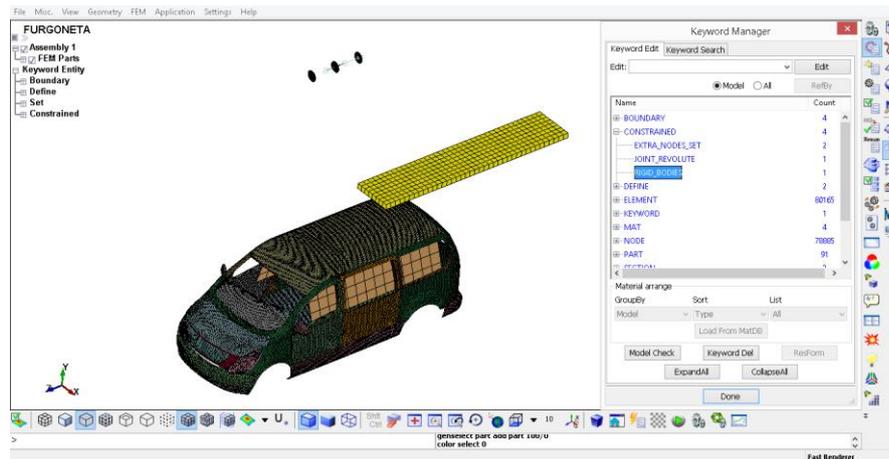
**Véase 2.10.7 configuraciones del péndulo:** Es la altura del péndulo, que se mostró en el procedimiento. Se utilizó, tres cartas, EXTRA\_NODE\_SET, JOINT, RIGID. Extra Node Set, se genera los soportes en base a las parte y nodos mostrados.



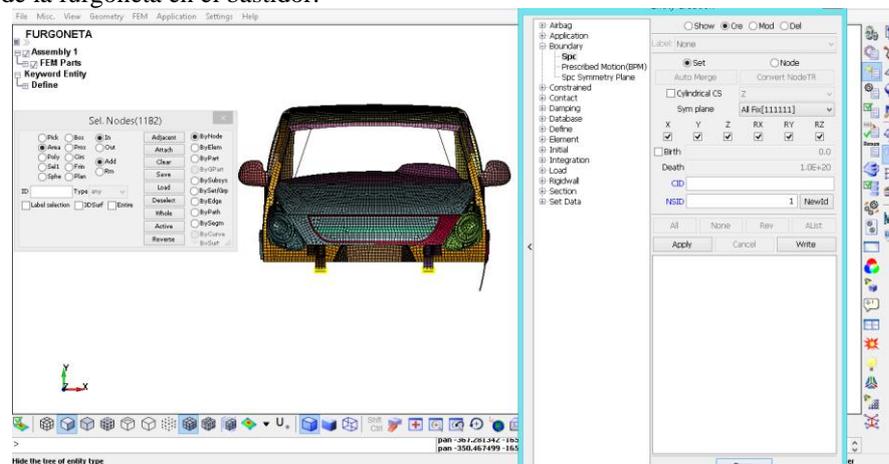
**Véase 2.10.7 configuraciones del péndulo:** Joint, se configura el movimiento circular de la junta central.



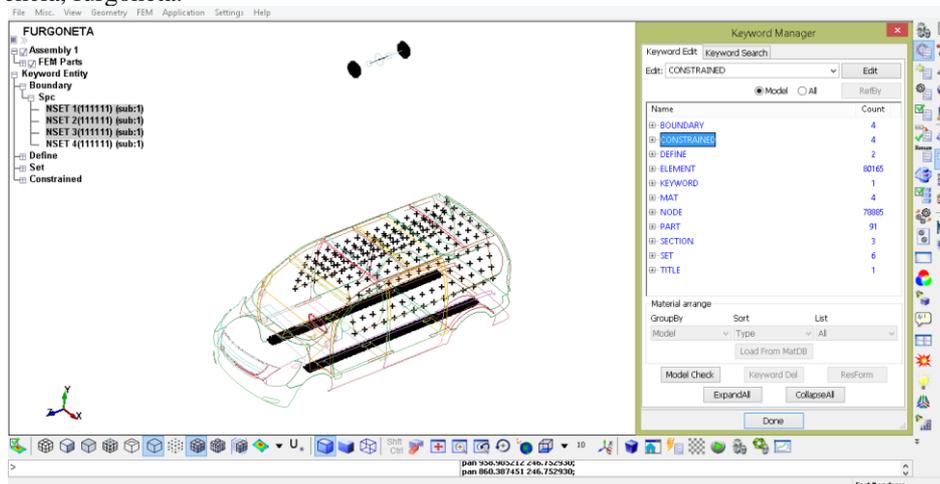
**Véase 2.10.7 configuraciones del péndulo:** Rigid\_Bodies genera una conexión base circular y el péndulo.



Véase 2.10.7 condiciones de contorno y restricciones. **BOUNDARY:** Restricción traslacional y rotacional de la furgoneta en el bastidor.

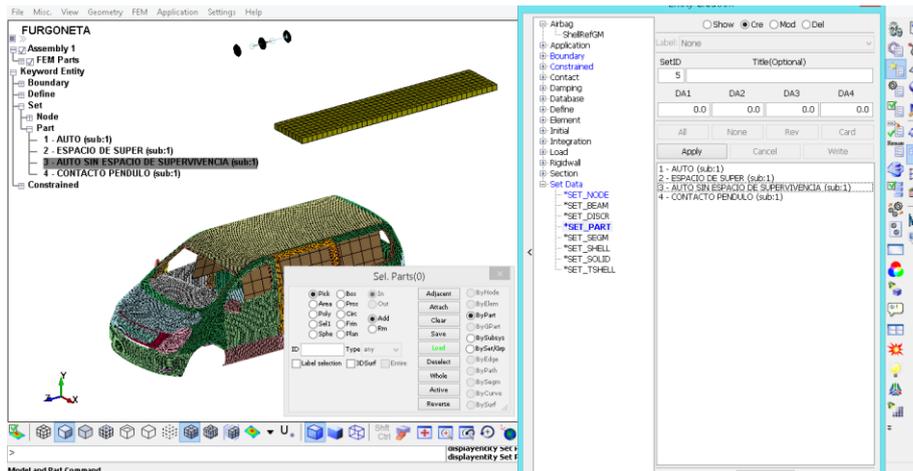


Véase 2.10.7 condiciones de contorno y restricciones. Restricción base de giro del péndulo, espacio de supervivencia, furgoneta.

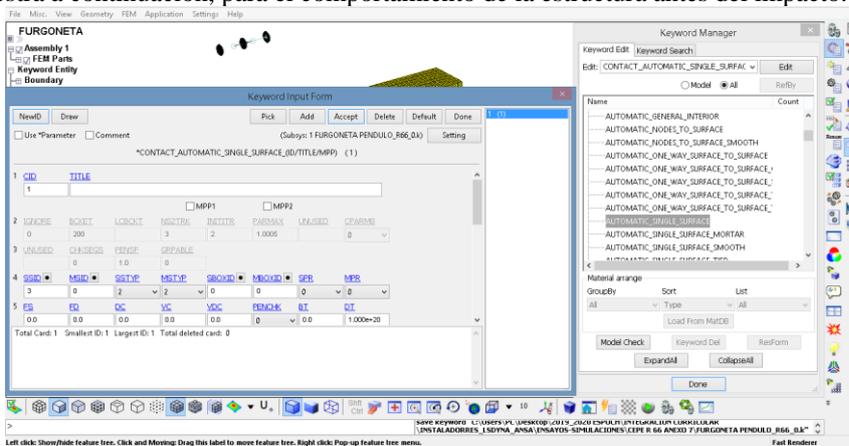


### Asignar contactos

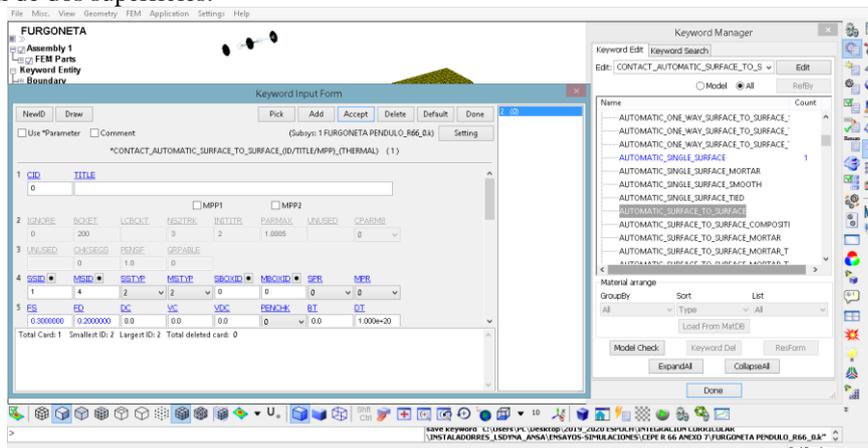
Véase 2.10.8 condiciones de contacto. Se generó conjuntos con la opción Set\_Part, antes de asignar las opciones de contacto, como se muestra a continuación.



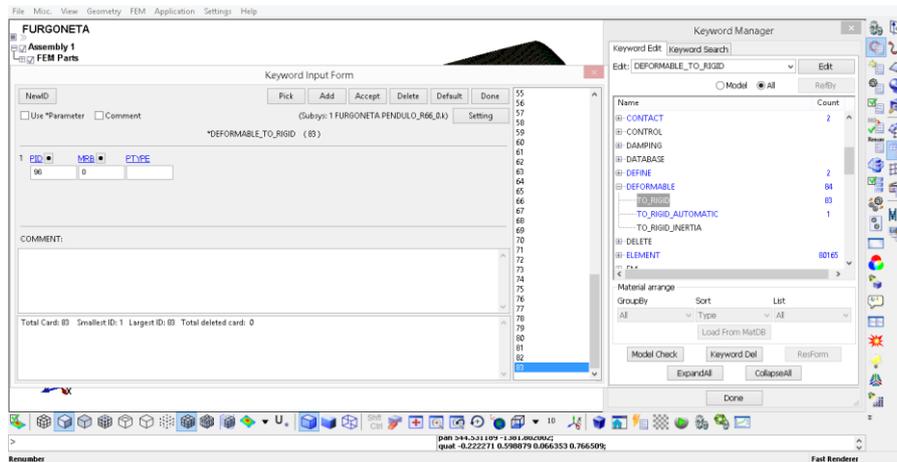
**Véase 2.10.8 condiciones de contacto utilizados.** AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE, Se configura como se muestra a continuación, para el comportamiento de la estructura antes del impacto.



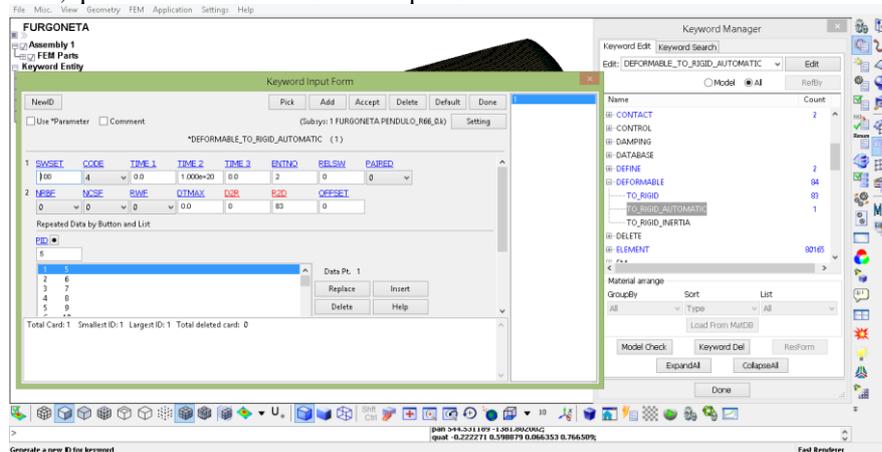
**Véase 2.10.8 condiciones de contacto utilizados.** AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE, Se configura como se muestra a continuación, El cual se ejecuta al generarse el impacto, y existe la intervención de dos superficies.



**Véase 2.10.8 Opciones de contacto.** TO\_RIGID: Se selecciona todas las partes, de forma individual, para transformar todos los partes a rígidas, antes del impacto.

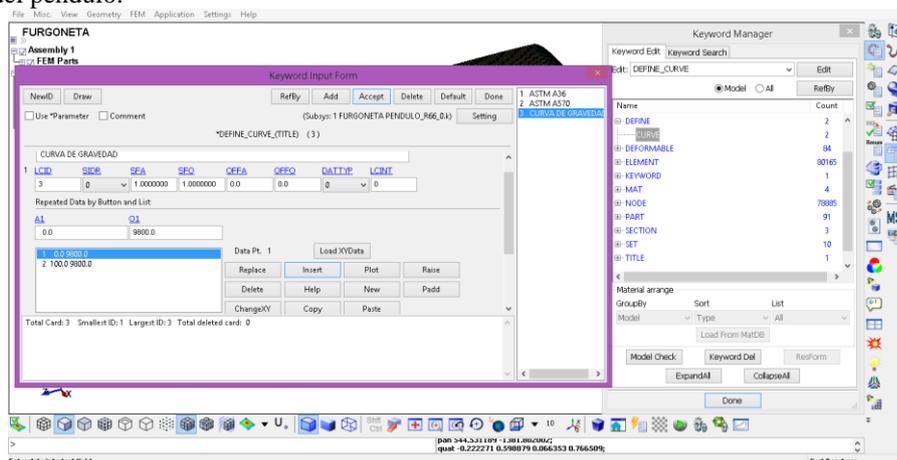


Véase 2.10.8 Opciones de contacto. TO\_RIGID\_ AUTOMATIC. Se selecciona solo las partes, de forma individual, que se deforman a causa del impacto.

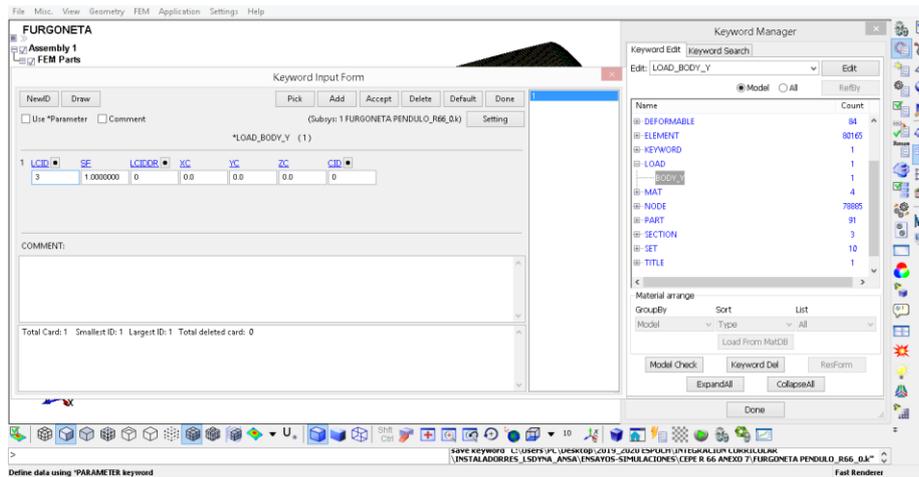


### Asignar cargas

Véase 2.10.9 Asignación de cargas. En su inicio se creó la curva de gravedad para que se genere el descenso del péndulo.

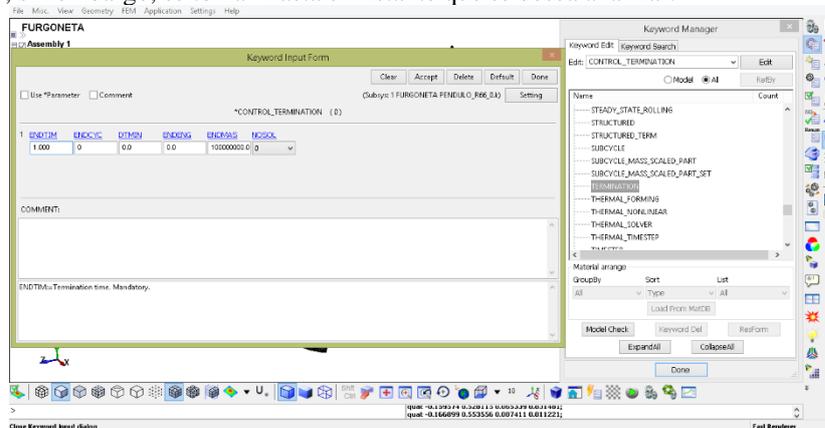


Véase 2.10.9 Asignación de cargas. BODY\_Y: Se ingresó la dirección en el cual se genera el descenso del péndulo.

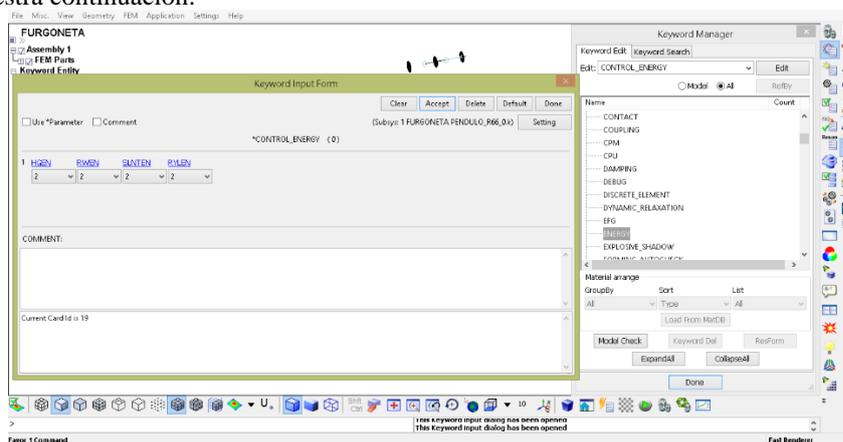


### Configuraciones del tiempo de simulación y salida de resultados

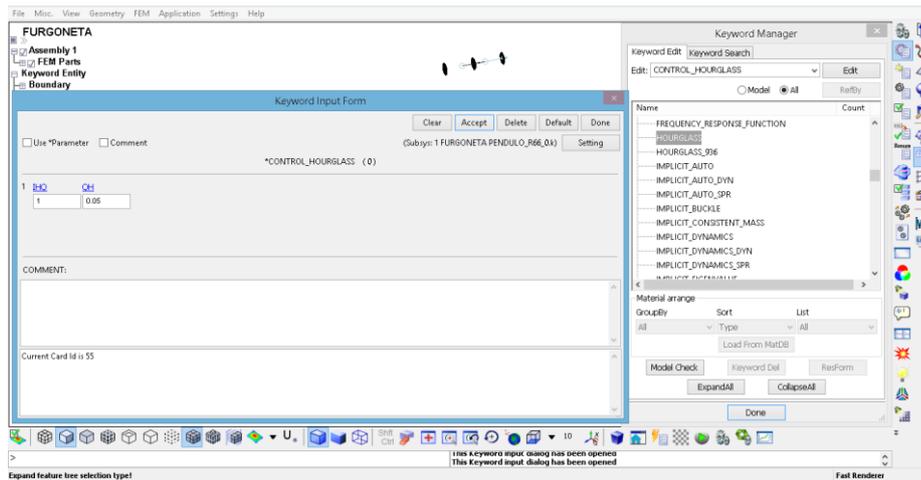
**Véase 2.10.10 Control del tiempo.** Se ingresó el tiempo que dura la simulación, se puede ingresar un tiempo mayor, sin embargo, se toma hasta el instante que se desea analizar.



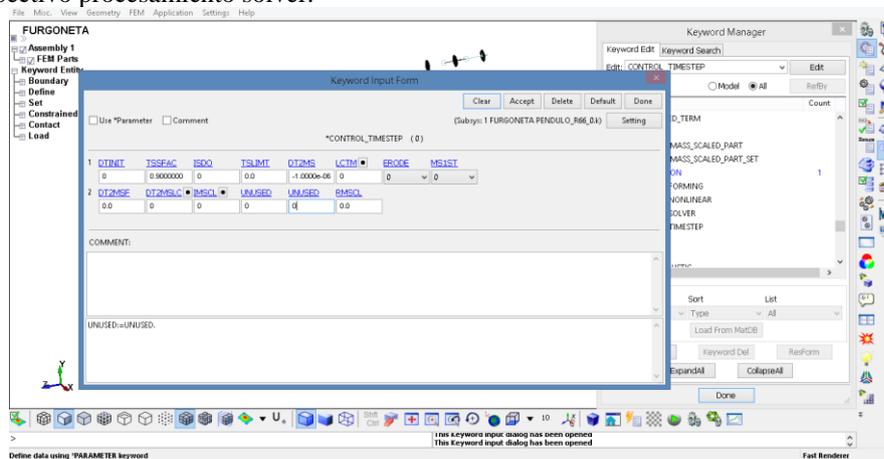
**Véase 2.10.10 Control de energías.** ENERGY: Se activan el control de todas las energías del sistema como se muestra continuación.



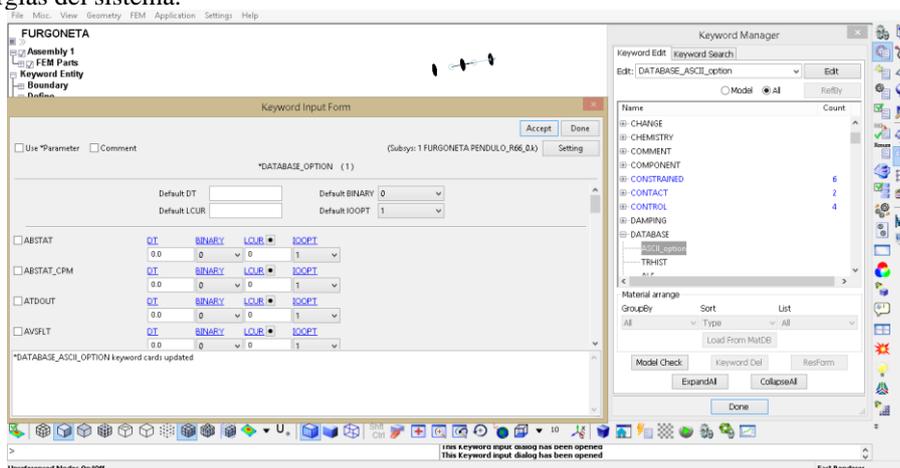
**Véase 2.10.10 Control de Hourglass.** Se activó esta opción para obtener el valor, que permitió evaluar la validación de los datos obtenidos en la simulación.



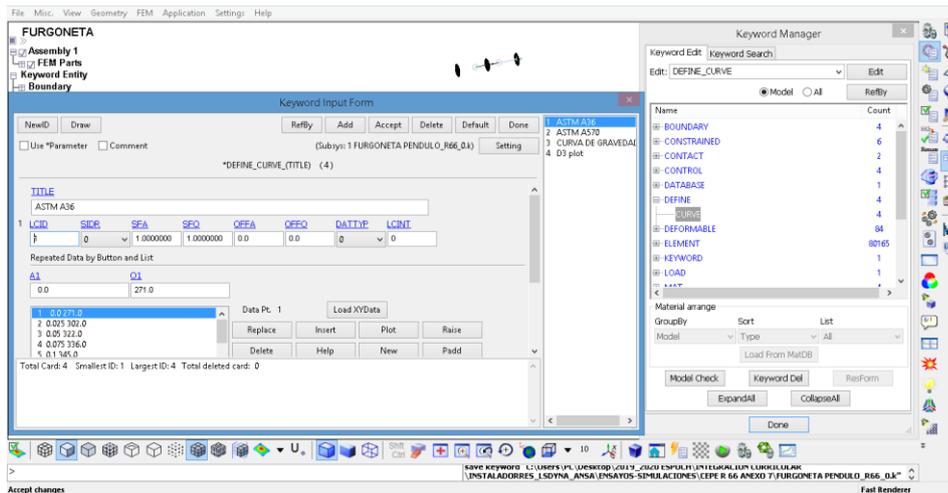
**Véase 2.10.10 Control del paso de tiempo. STEP:** Se ingresó el paso de tiempo que tendrá la simulación, para el respectivo procesamiento solver.



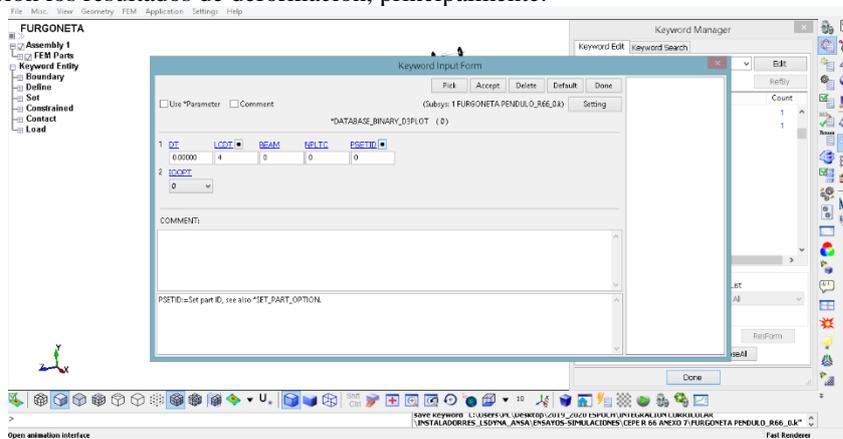
**Véase 2.10.10 Configuración de datos de salida:** Se selecciona esta opción, para obtener los resultados de las energías del sistema.



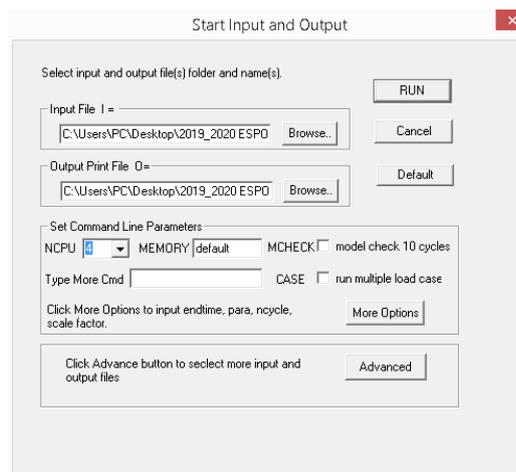
**Véase 2.10.10 Configuración de datos de salida:** Se genera una curva, con el fin de variar el intervalo de tiempo durante la simulación.



**Véase 2.10.10 Configuración de datos de salida:** En base a la curva, por medio de esta carta se obtiene en la simulación los resultados de deformación, principalmente.



**Véase 2.10.10 Ejecución en base las configuraciones del pre-proceso:** Con el licenciamiento del representante del programa Ls-Dyna, Se realizó la ejecución correspondiente.



```

Timing information
CPU<seconds>      %CPU      Clock<seconds>  %Clock
-----
Keyword Processing ... 6.0000E+00  0.04  6.0700E+00  0.04
RV Reading ..... 2.0000E+00  0.02  2.3290E+00  0.02
Initialization ..... 3.0000E+00  0.03  5.0740E+00  0.03
Init Proc Phase 1 .. 3.0000E+00  0.02  2.9220E+00  0.02
Init Proc Phase 2 .. 1.0000E+00  0.01  9.3000E+01  0.01
Element processing ... 6.4750E+03  39.80  6.5807E+03  40.44
Solids ..... 7.0000E+00  0.04  7.4810E+00  0.05
Shells ..... 6.4600E+03  39.70  6.5651E+03  40.35
Binary databases .... 1.2000E+01  0.07  1.2031E+01  0.07
ASCII database ..... 6.0000E+00  0.04  2.3230E+00  0.01
Contact algorithm ... 4.7450E+03  29.16  4.7031E+03  28.91
Interf. ID ..... 1.19470E+03  11.97  1.9431E+03  11.94
Interf. ID ..... 2.27830E+03  17.11  2.7492E+03  16.96
Rigid Bodies ..... 5.2000E+01  0.32  4.4869E+01  0.28
Time step size ..... 1.0000E+00  0.01  3.2000E+00  0.02
Group force file .... 0.0000E+00  0.00  0.5400E+01  0.01
Others ..... 1.2040E+03  7.89  1.2598E+03  7.74
Misc. 1 ..... 6.0900E+02  3.74  6.2503E+02  3.84
Misc. 2 ..... 1.0740E+03  6.60  1.0171E+03  6.26
Misc. 3 ..... 5.0000E+00  0.03  6.6000E+00  0.04
Misc. 4 ..... 1.9960E+03  12.27  2.0018E+03  12.30
-----
Totals ..... 1.6270E+04  100.00  1.6271E+04  100.00

Problem time = 1.0547E+00
Problem cycle = 318673
Total CPU time = 16270 seconds ( 4 hours 31 minutes 10 seconds)
CPU time per zone cycle = 641.281 nanoseconds
Clock time per zone cycle= 641.303 nanoseconds

Number of CPU's 4
M2 used/max 136 / 136
Start time 01/30/2021 15:13:44
End time 01/30/2021 19:44:54
Elapsed time 16270 seconds for 318673 cycles using 4 SMP threads
( 4 hours 31 minutes 10 seconds)

Normal termination 01/30/21 19:44:54

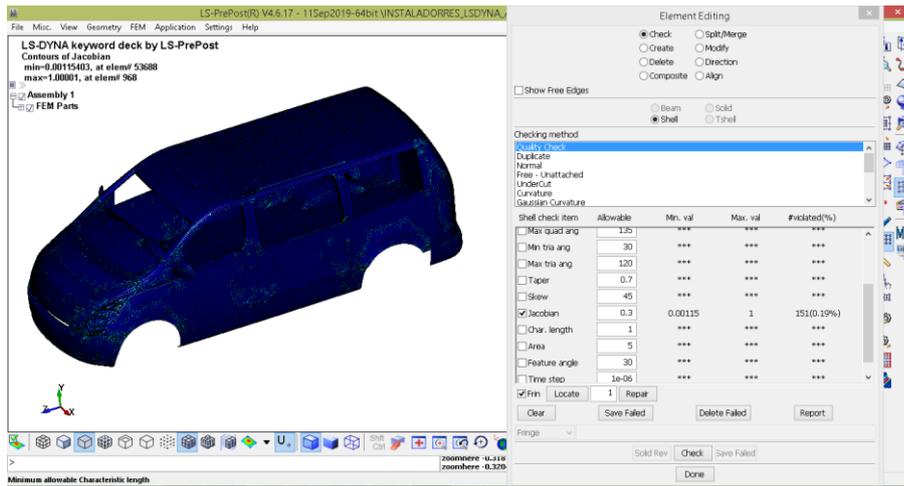
Click close button or execute exit command to quit the Window
::Users\PC\Desktop\2019_2020 ESP0CH\INTERACCION CURRICULAR\INSTALADORRES_LSDVNA_ANSA\FURGONETA\CEPE R66 ANEXO 7 FURGONETA>

```

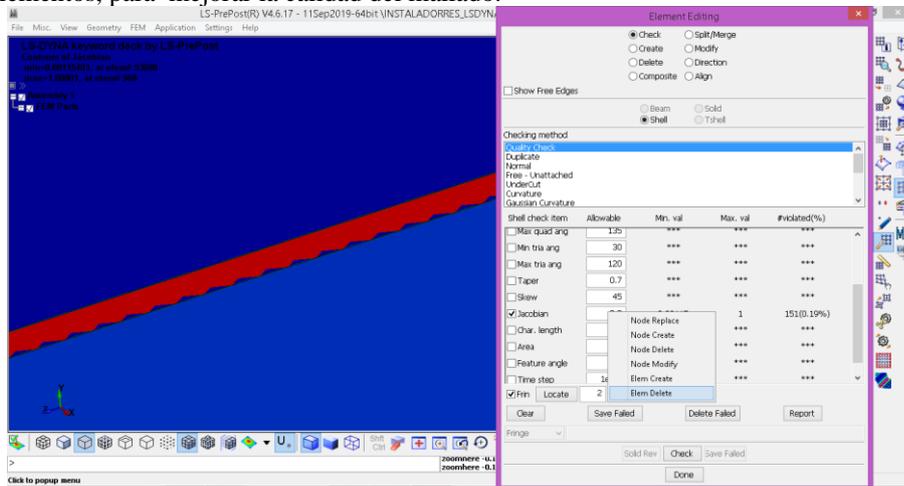
**Posproceso- Obtención de resultados.**

**Véase 2.10.12 Pos-proceso.** Los resultados obtenidos, conforme al reglamento CEPE R66 Anexo 7, con los parámetros descritos variándose dos cargas del péndulo, se muestran en el capítulo III. Simulación 1, simulación 2.

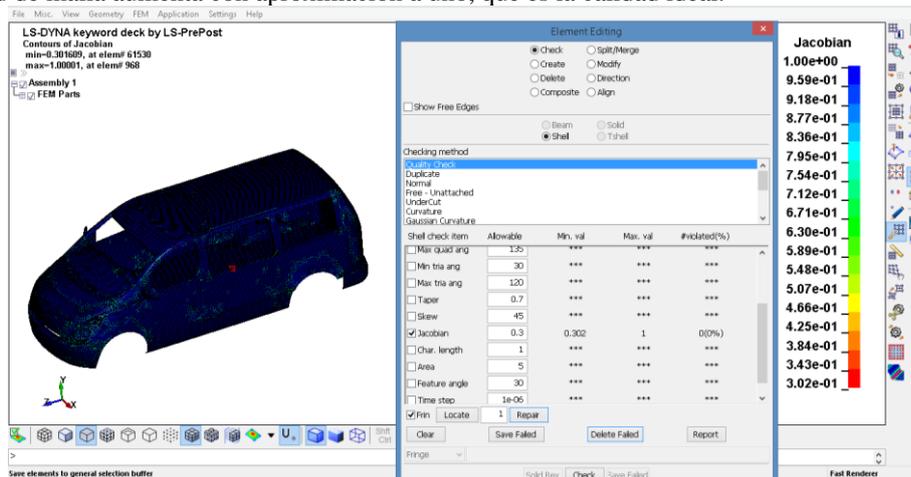




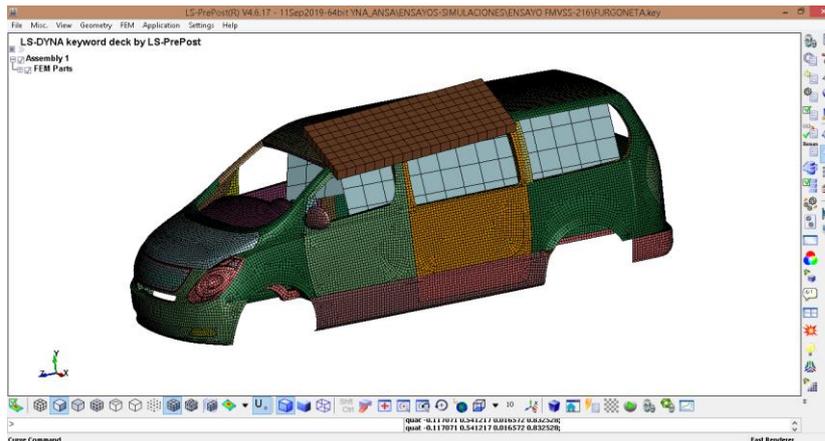
**Véase 2.11.3 Importación y mallado:** Se indentifica los elementos, que generan una calidad baja, se utilizó las opciones mostradas como: Reemplazar nodo, crear nodos, eliminar nodos, crear elementos, eliminar elementos, para mejorar la calidad del mallado.



**Véase 2.11.3 Importación y mallado:** Al corregir los elementos que generan una calidad baja, el criterio de calidad de malla aumenta con aproximación a uno, que es la calidad ideal.

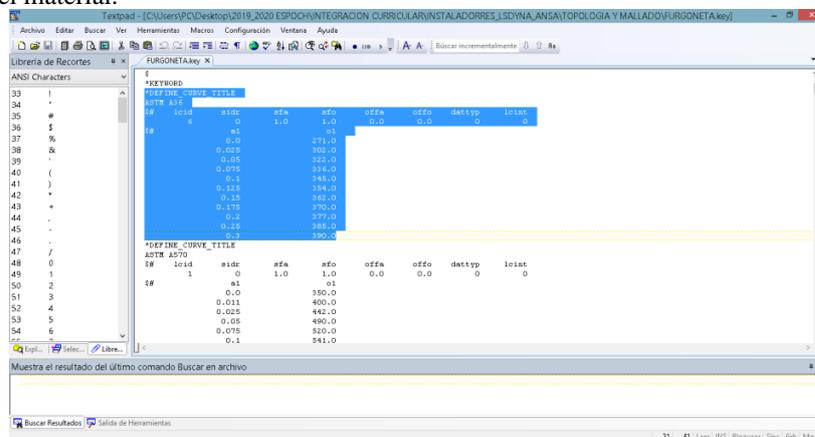


Importación y mallado de elementos externos requeridos para la simulación, Platina rigida, espacio de supervivencia. Véase 2.11.3

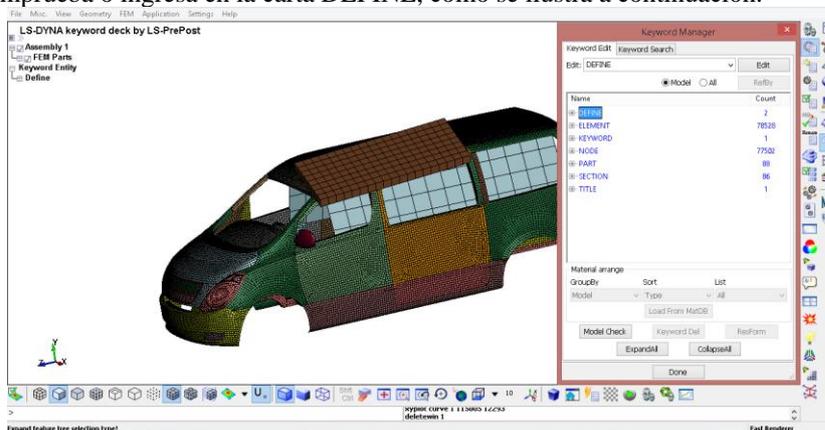


### Propiedades del material utilizado

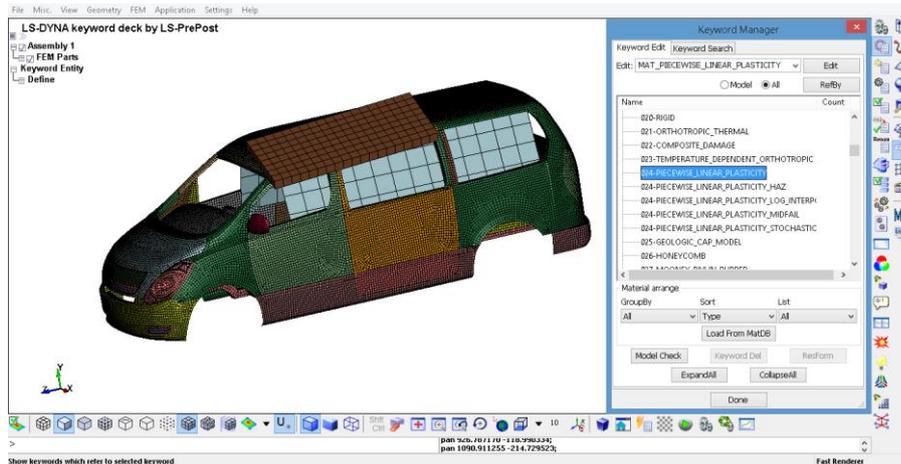
Véase 2.11.4 Propiedades del material utilizado, se seleccionó dos curvas de tensión, perteneciente a la estructura modelo Toyota Saris 2010. Desarrollado por la NCAC, sin embargo, se podría asignar otras propiedades del material.



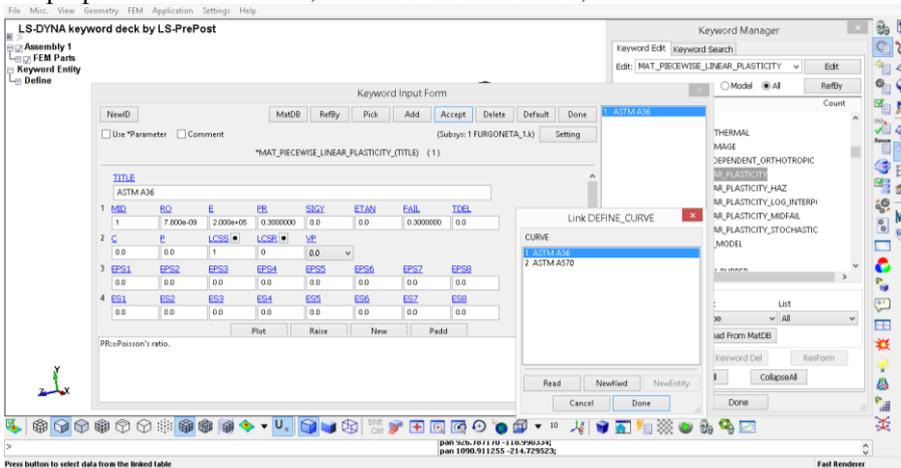
El valor se comprueba o ingresa en la carta DEFINE, como se ilustra a continuación.



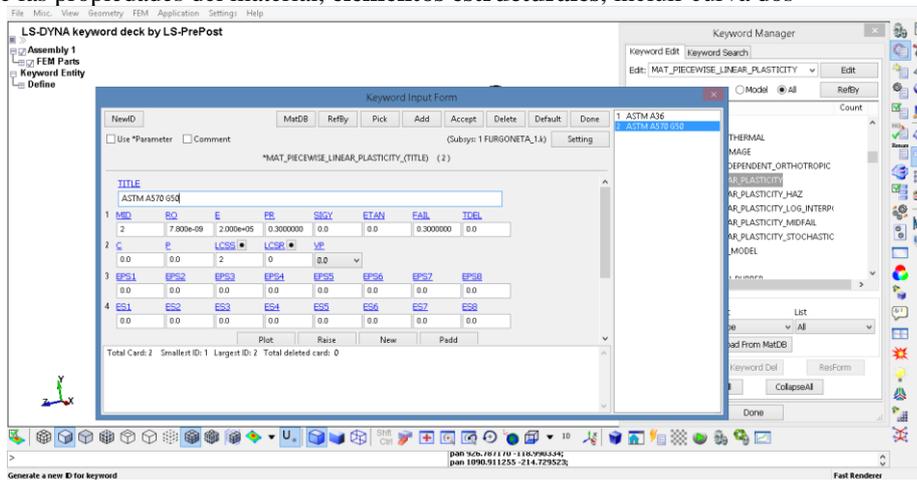
Véase 2.11.4 Propiedades del material utilizado: Selección del modelo del material no lineal 024-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY



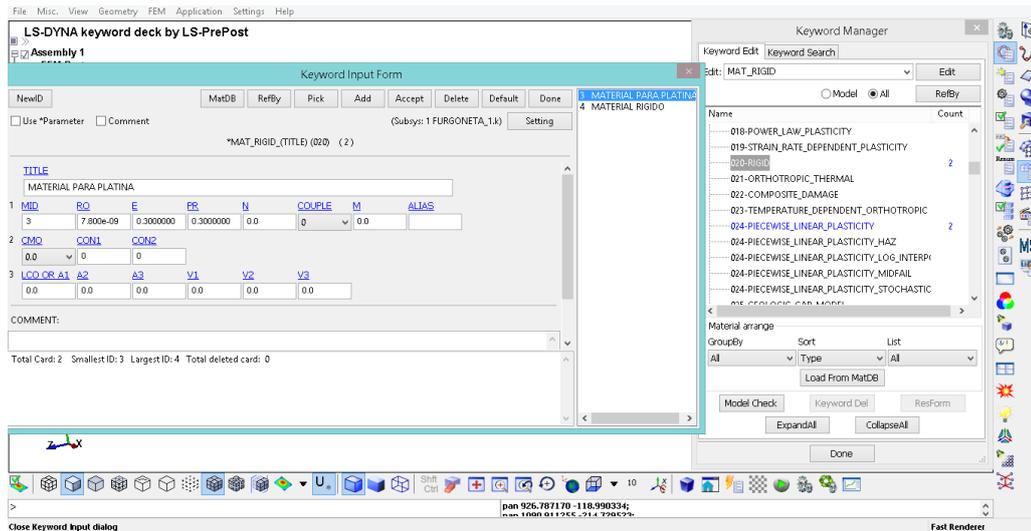
Ingreso de las propiedades del material, **recubrimiento externo**, incluir curva uno.



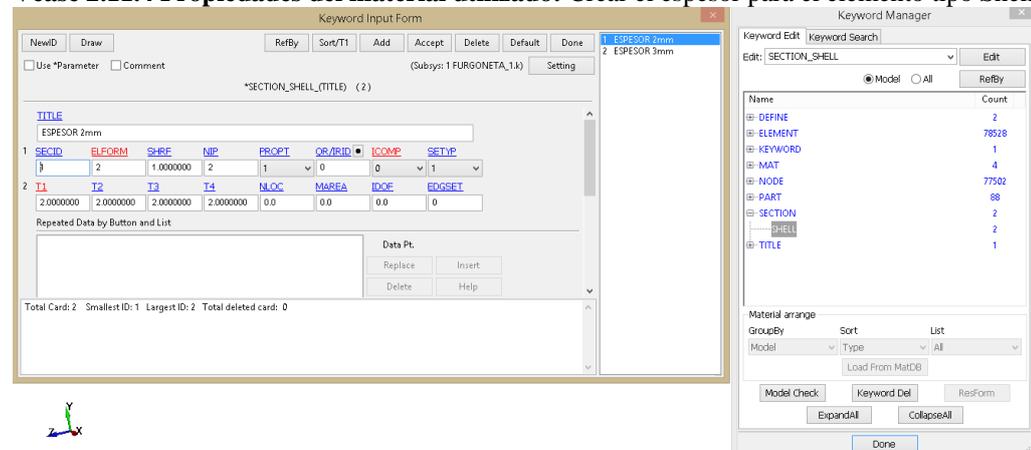
Ingreso de las propiedades del material, **elementos estructurales**, incluir curva dos



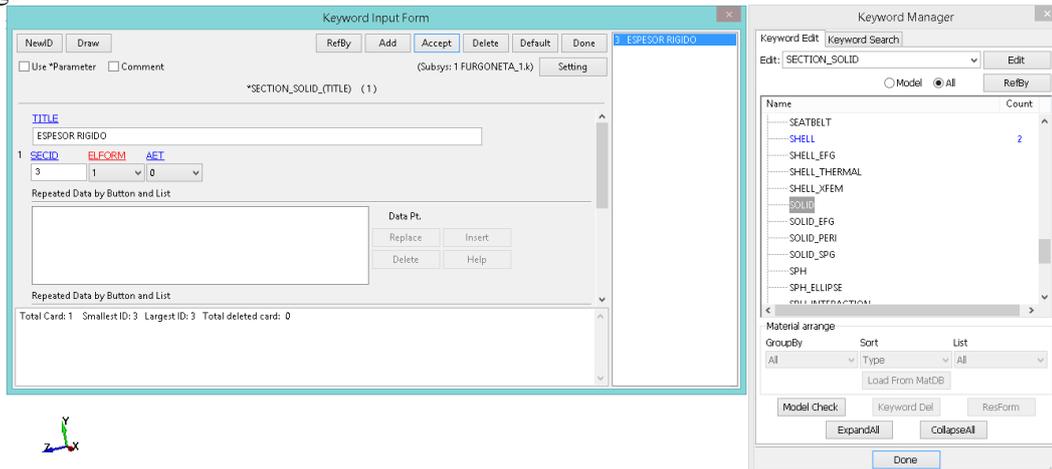
Ingreso de las propiedades del material rígido, **platina rígida**



**Véase 2.11.4 Propiedades del material utilizado: Crear el espesor para el elemento tipo Shell**

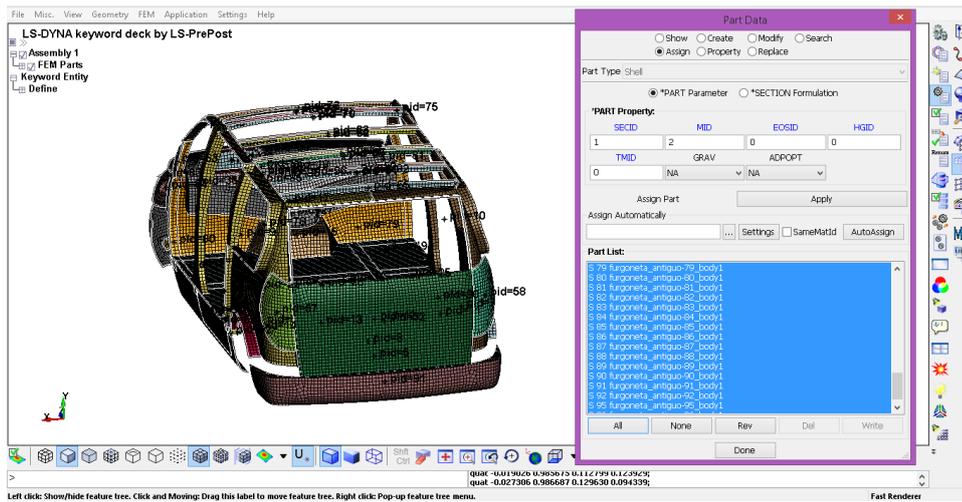


**Véase 2.11.4 Propiedades del material utilizado: Crear el espesor para el elemento sólido-platina de carga**

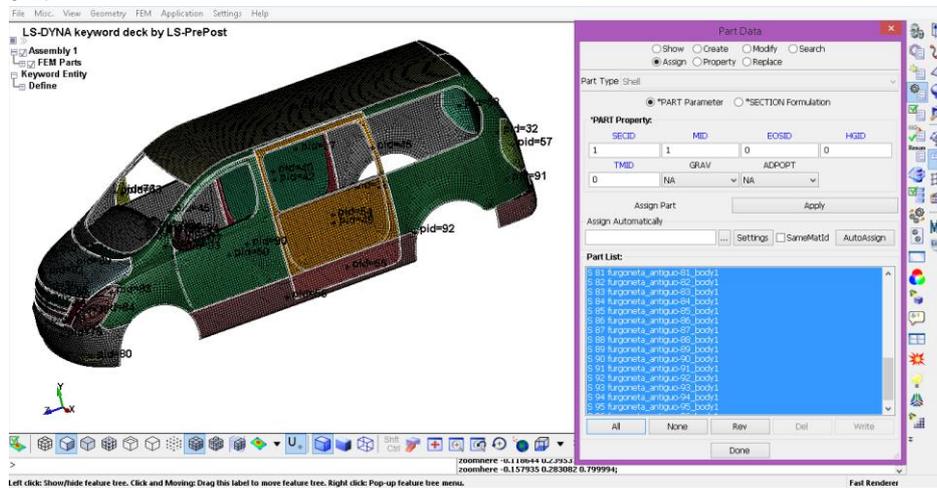


**Asignar secciones y materiales a las partes correspondientes**

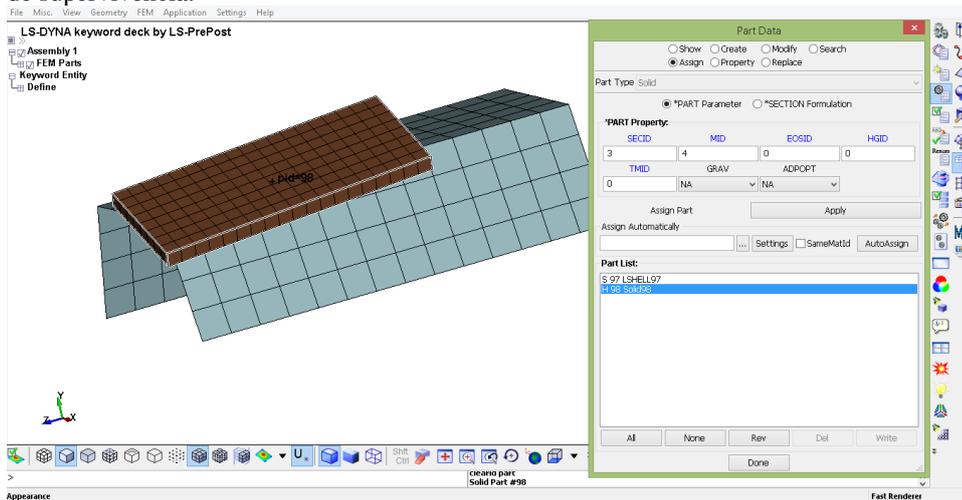
**Véase 2.11.4 Propiedades del material utilizado: A los elementos estructurales, se asignó las propiedades de la tabla 17-2.**



Véase 2.11.4 Propiedades del material utilizado: Al recubrimiento externo, se asignó las propiedades de la tabla 16-2.

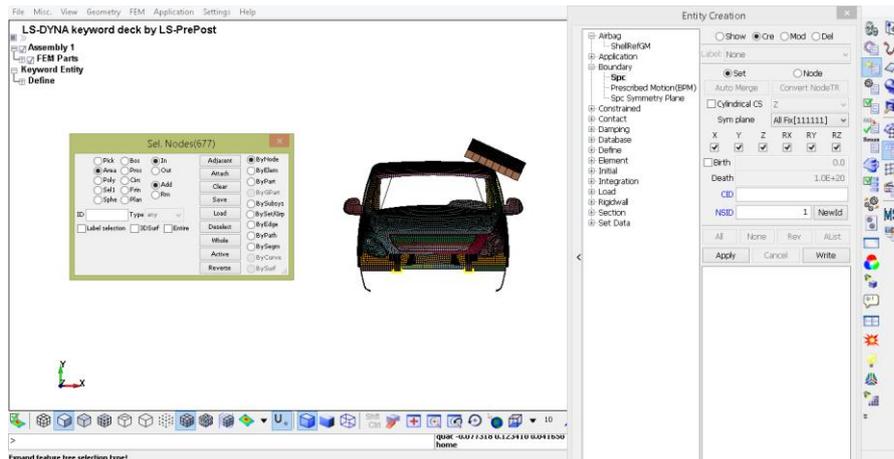


Véase 2.11.4 Propiedades del material utilizado: A la platina se asignó el material rígido, seguido al espacio de supervivencia.

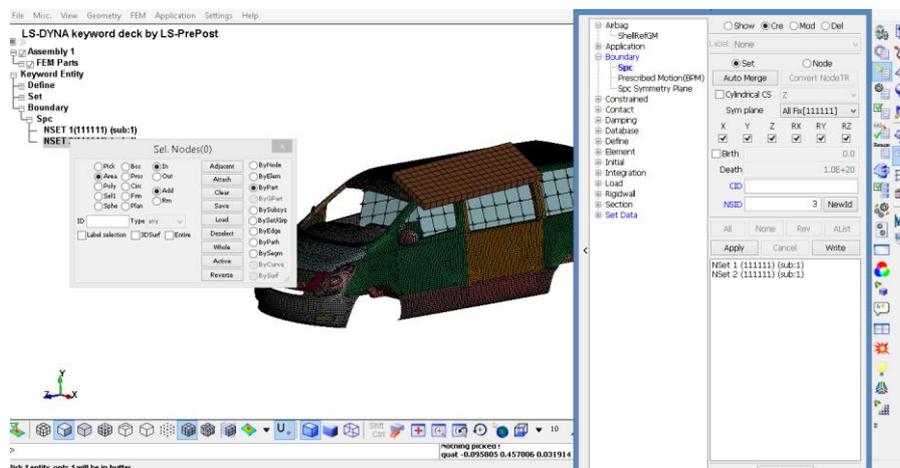


### Condiciones de contorno y restricciones

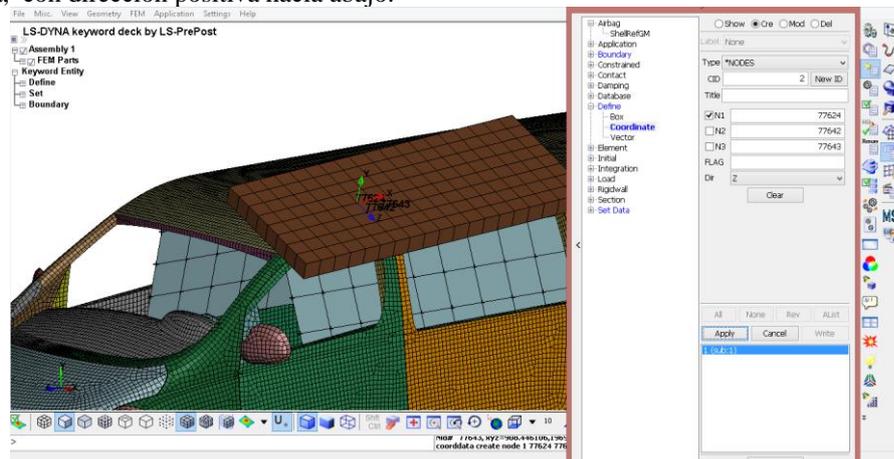
Véase 2.11.4 condiciones de contorno y restricciones: **BOUNDARY:** Restricción traslacional y rotacional de la furgoneta en el bastidor.



Véase 2.11.5 condiciones de contorno y restricciones. Restricción en el espacio de supervivencia, furgoneta.

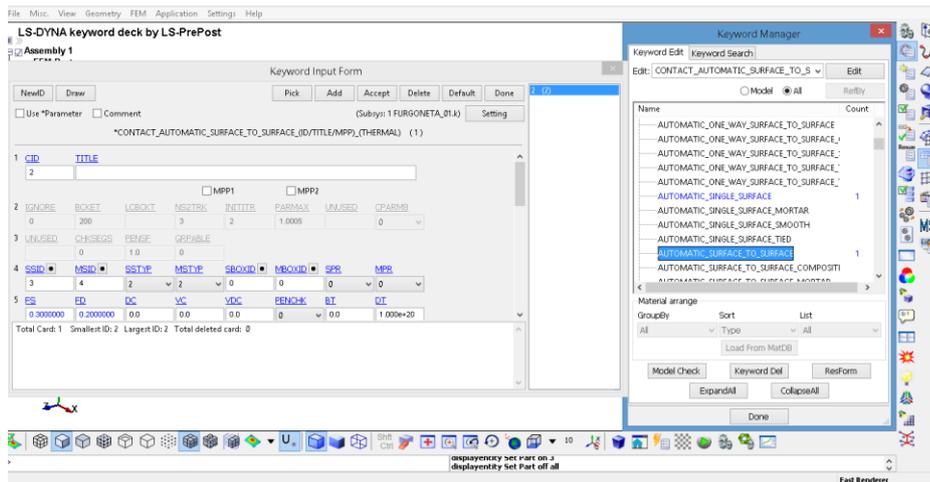


Generar una nueva coordenada para ejercer la carga. Es importante que el sistema de coordenadas se normal a la platina, con dirección positiva hacia abajo.



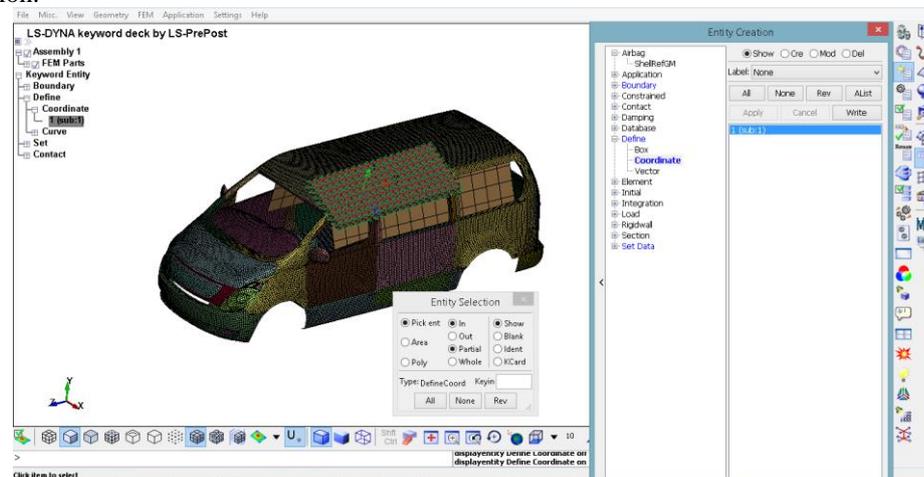
El set de nodos, creados posteriormente me permiten asignar la carga sobre la platina.



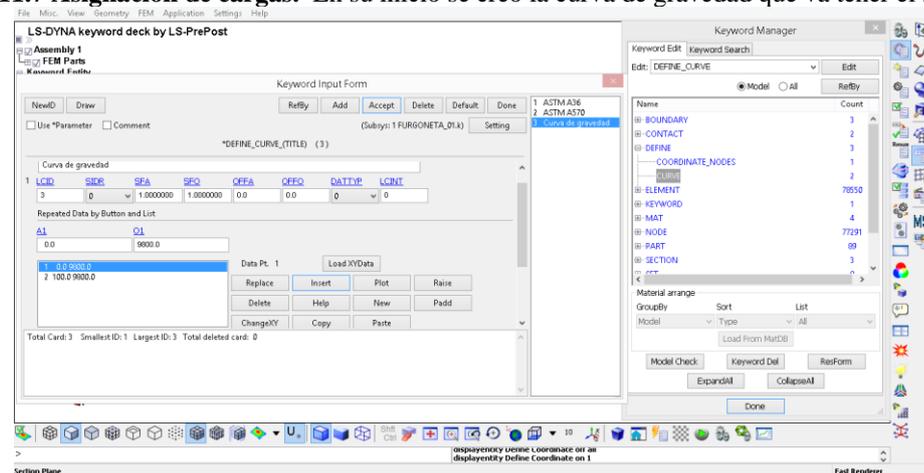


### Asignar cargas

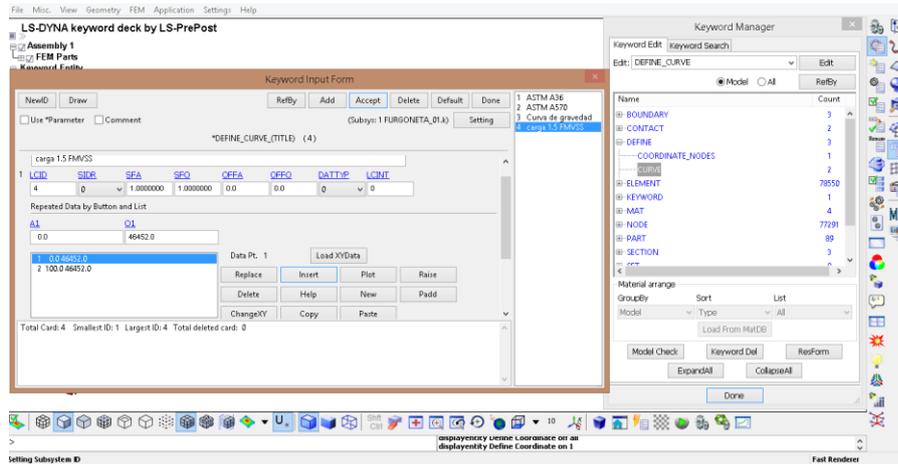
Es importante tomar en cuenta el set y la coordenada creada con anterioridad de la platina de carga para esta sección.



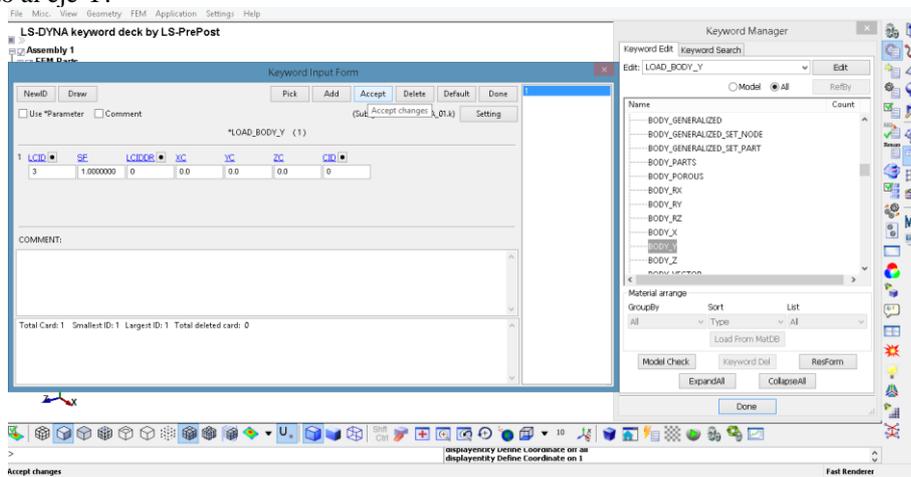
Véase 2.11.7 Asignación de cargas. En su inicio se creó la curva de gravedad que va tener el sistema.



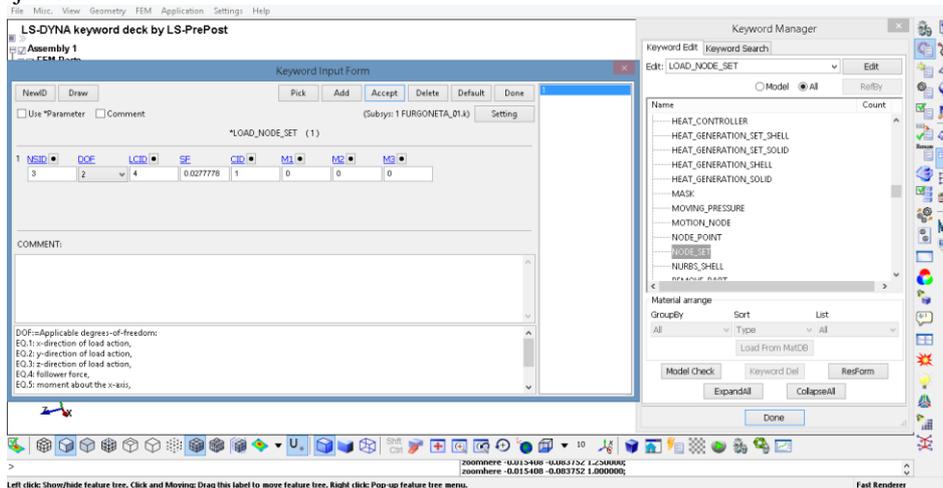
Véase 2.11.7 Asignación de cargas. A continuación, se ingresó la curva de carga perteneciente a 1.5 veces o 3 veces el PBV, respectivamente en la simulación 3,4. Enfatizando que cada carga pertenece a distinta simulación.



Véase 2.11.7 Asignación de cargas. BODY\_Y: Se ingresó la dirección que se tiene en la gravedad, que es respecto al eje Y.

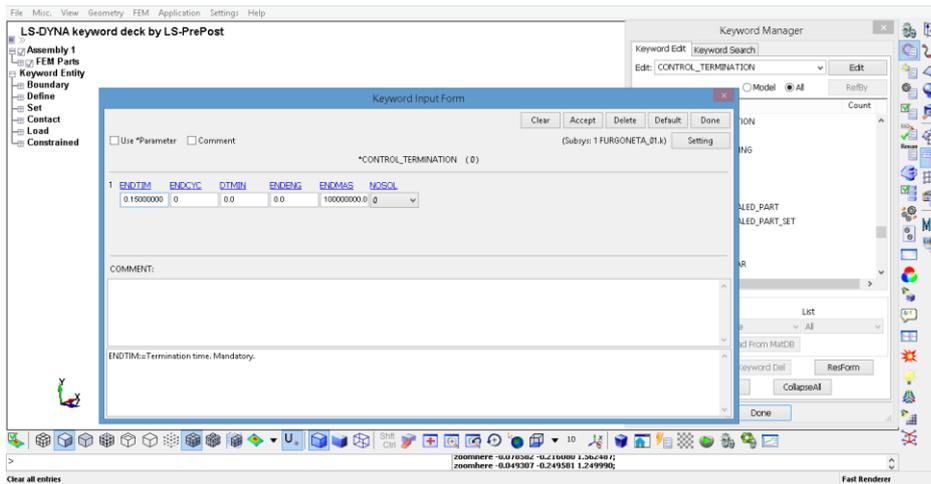


Véase 2.11.7 Asignación de cargas. NODE\_SET: Se ingresó la dirección que tiene la carga y el valor de la carga ejercida.

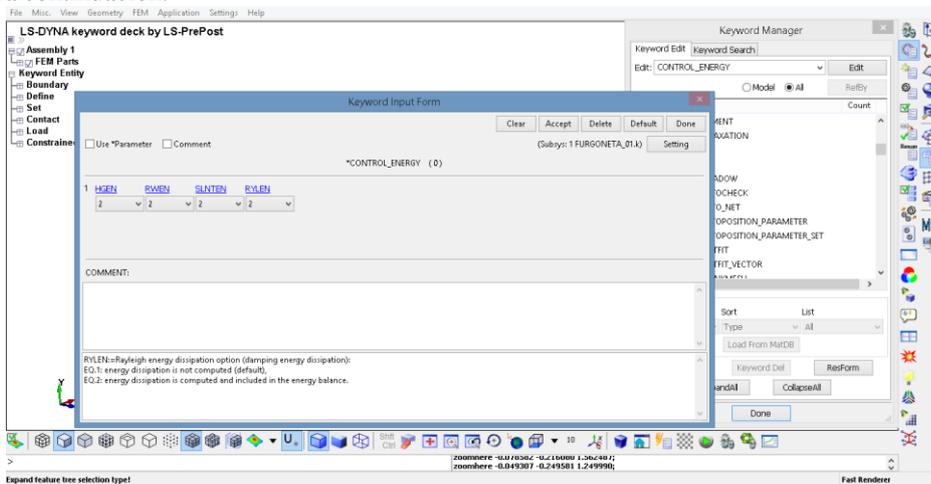


### Configuraciones del tiempo de simulación y salida de resultados

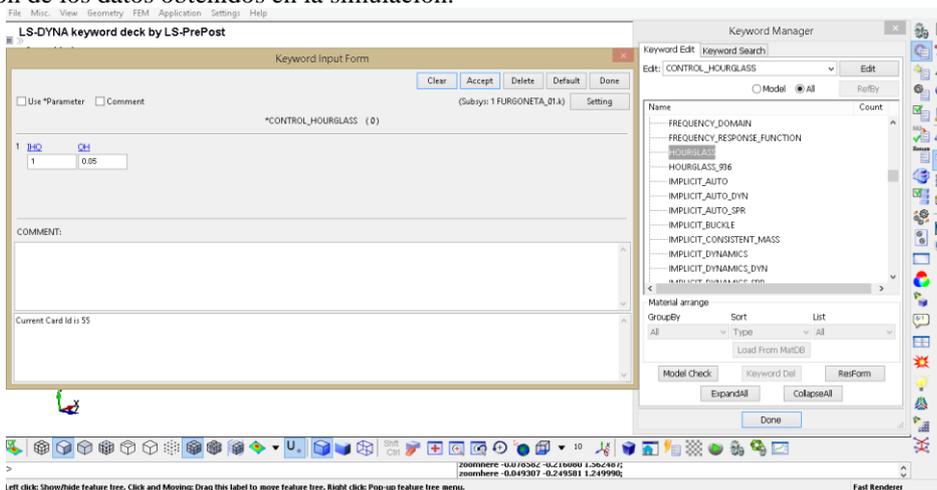
Véase 2.11.8 Control del tiempo. Se ingresó el tiempo que dura la simulación, se puede ingresar un tiempo mayor, sin embargo, se toma hasta el instante que se desea analizar.



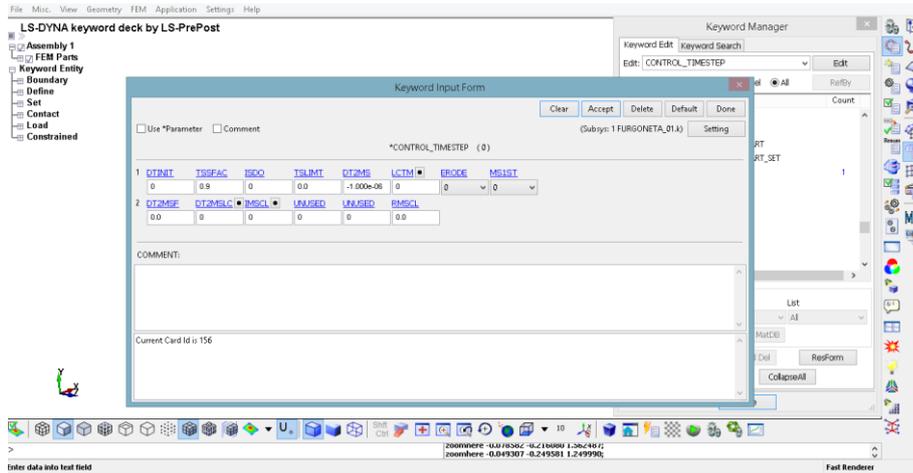
Véase 2.11.8 Control de energías. ENERGY: Se activan el control de todas las energías del sistema como se muestra continuación.



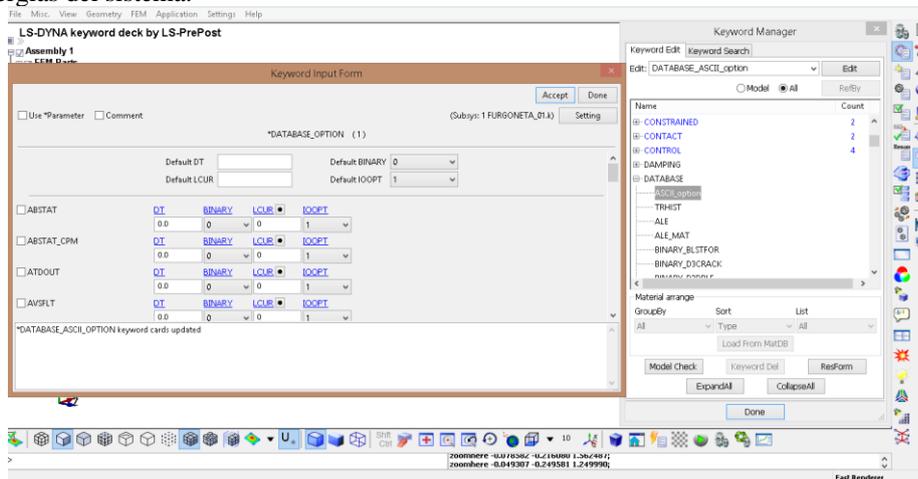
Véase 2.11.8 Control de Hourglass. Se activó esta opción para obtener el valor, que permitió evaluar la validación de los datos obtenidos en la simulación.



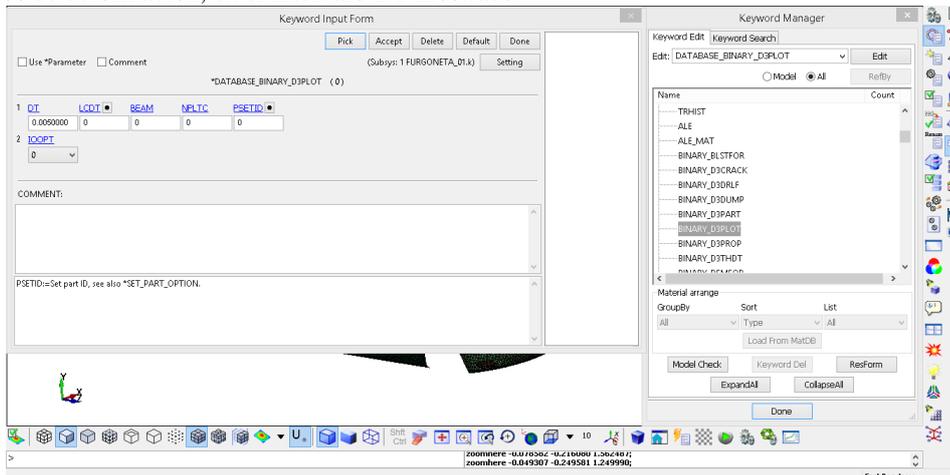
Véase 2.11.8 Control del paso de tiempo. STEP: Se ingresó el paso de tiempo que tendrá la simulación, para el respectivo procesamiento solver.



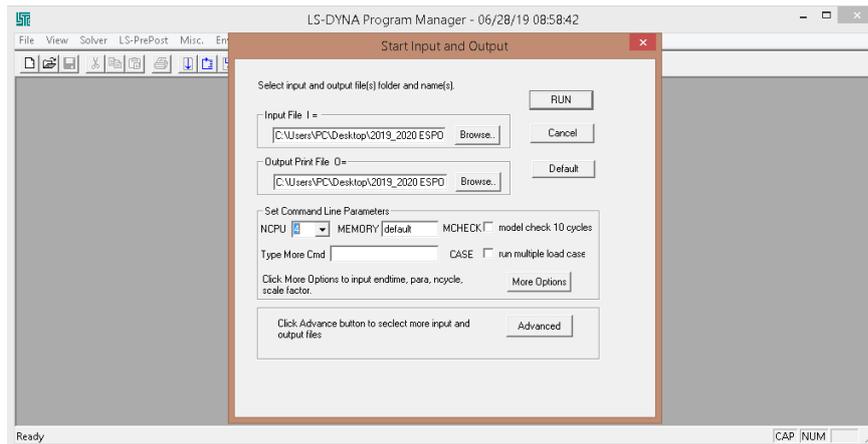
**Véase 2.11.8 Configuración de datos de salida:** Se selecciona esta opción, para obtener los resultados de las energías del sistema.



**Véase 2.11.8 Configuración de datos de salida:** Por medio de esta carta se obtiene en la simulación los resultados de deformación, en el intervalo DT mostrado.



**Véase 2.11.9 Ejecución en base las configuraciones del pre-proceso:** Con la configuraciones o parámetros antes mostrados, Se realizó la ejecución correspondiente.



```

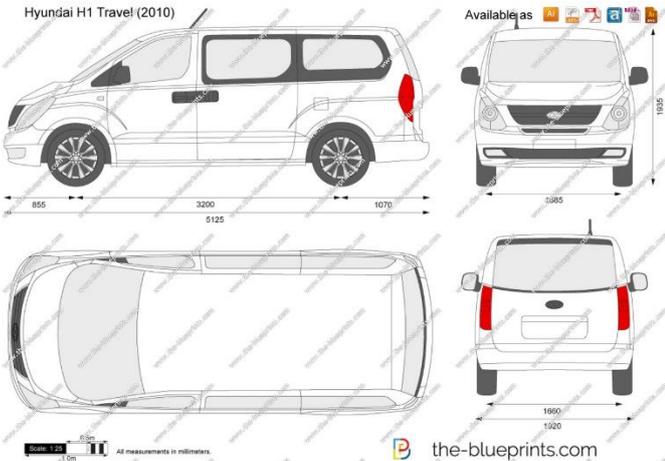
G:\LS-DYNA\program\ls-dyna_smp_d_R11_1_0_winx64_ifort160.exe I=C:\Users\PC\Desktop\2019_2-1\INTEGR-1\INSTAL-1\ENSAYO...
Timing information
CPU(seconds)    %CPU    Clock(seconds) %Clock
Keyword Processing ... 5.0000E+00    0.06    4.9750E+00    0.06
RW Reading ..... 3.0000E+00    0.04    3.0940E+00    0.04
KW Writing ..... 0.0000E+00    0.00    1.5600E-01    0.00
Initialization ..... 4.0000E+00    0.05    4.7970E+00    0.06
Init Proc Phase 1 ... 4.0000E+00    0.05    3.0590E+00    0.05
Init Proc Phase 2 ... 0.0000E+00    0.00    5.3200E-01    0.01
Element processing ... 3.2240E+03    40.09    3.1986E+03    40.56
Solids ..... 1.4000E+01    0.18    1.0656E+01    0.14
Shells ..... 3.2000E+03    40.60    3.1939E+03    40.30
ISO Shells ..... 1.0000E+00    0.01    3.1000E-02    0.00
Binary databases ..... 4.0000E+00    0.05    4.5330E+00    0.06
ASCII database ..... 0.0000E+00    0.00    9.5800E-01    0.01
Contact algorithm ... 2.3960E+03    30.39    2.4048E+03    30.50
Interf. ID ..... 1.4660E+03    18.59    1.4581E+03    18.49
Interf. ID ..... 2.9230E+02    11.71    9.4224E+02    11.95
Rigid Bodies ..... 1.3000E+01    0.16    9.0000E+00    0.11
Time step size ..... 0.0000E+00    0.00    1.2660E-01    0.02
Group force file .... 0.0000E+00    0.00    3.4500E-01    0.00
Others ..... 4.0100E+02    6.10    4.8107E+02    6.11
Misc. 1 ..... 2.4300E+02    3.00    2.4446E+02    3.10
Misc. 2 ..... 4.5900E+02    5.82    4.4831E+02    5.69
Misc. 3 ..... 2.0000E+00    0.03    1.9840E+00    0.03
Misc. 4 ..... 1.0540E+03    13.37    1.0797E+03    13.69
-----
T o t a l s ..... 7.8850E+03    100.00    7.8857E+03    100.00
Problem time = 1.5000E-01
Problem cycle = 166667
Total CPU time = 7885 seconds ( 2 hours 11 minutes 25 seconds)
CPU time per zone cycle = 601.603 nanoseconds
Clock time per zone cycle = 601.603 nanoseconds
Number of CPU's 4
NLQ used/max 136/ 136
Start time 03/15/2021 01:47:22
End time 03/15/2021 03:58:47
Elapsed time 7885 seconds for 166667 cycles using 4 SMP threads
( 2 hours 11 minutes 25 seconds)
Normal termination 03/15/21 03:58:47
Click close button or execute exit command to quit the Window
C:\Users\PC\Desktop\2019_2020 ESPOCH\INTEGRACION CURRICULAR\INSTALADORRES_LS-DYNA_ANS\ENSAYOS-SIMULACIONES\ENSAYO FMUSS-216>

```

**Proceso- Obtención de resultados.**

**Véase 2.11.10 Pos-proceso.** Los resultados obtenidos, conforme al ensayo FMVSS-216, con los parámetros descritos variándose dos cargas se muestran en el capítulo III. Simulación 3, Simulación 4.

## ANEXO C: Dimensiones generales del modelo de furgoneta.

| Dimensiones generales del modelo  |  |
|---|--|
|    | <p>Hyundai H1 Travel (2010)</p>  <p>Available as </p> <p>Scale: 1:25<br/>All measurements in millimeters.</p> <p>the-blueprints.com</p> |
| Datos para el coquizado de los elementos estructurales                              |  |
|   |   |
| <p>Fuente:(SHINERAY, 2021)</p>  | <p>Fuente:(Autor, 2021)</p>  |
|  |    |
| <p>Fuente:(Autor, 2021)</p>   | <p>Fuente:(Autor, 2021)</p>  |