



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**Evaluación del diseño de las estructuras de sujeción  
para cilindros de gas natural vehicular instalados en  
vehículos automotores.**

Ávila R., Yhonan A.  
Pérez J., Markos A.

Naguanagua, 24 de mayo de 2011.





UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## **Evaluación del diseño de las estructuras de sujeción para cilindros de gas natural vehicular instalados en vehículos automotores.**

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de  
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

**Tutor Académico:**

Ing. Javier Arruti

**Autores:**

Ávila R., Yhonan A.

Pérez J., Markos A.

Naguanagua, 24 de mayo de 2011.





UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE SUJECCIÓN PARA CILINDROS DE GAS NATURAL VEHICULAR INSTALADOS EN VEHÍCULOS AUTOMOTORES”**, presentada por los bachilleres: **Ávila R., Yhonan A. y Pérez J., Markos A.**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **18.956.743** y **17.639.547**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

---

Prof. Tutor, *Javier Arruti, Ing.*  
*Presidente del jurado*

---

Prof. *Edwin Peña, Ing.*  
*Miembro del jurado*

---

Prof. *David Ojeda, Ing.*  
*Miembro del jurado*

En Naguanagua a los 24 días del mes de mayo de 2011.



# ***AGRADECIMIENTOS***

---

El desarrollo de esta tesis sólo ha sido posible gracias a la colaboración, a la comprensión y a las palabras oportunas de muchas personas, a las que debemos gratitud perenne.

Agradecemos primeramente a DIOS por todas sus bendiciones, porque en los momentos difíciles solo pudimos levantarnos gracias a su presencia, por que día a día nos dio fuerzas para continuar y nos iluminó en el camino del aprendizaje, por enseñarnos a ser humildes en cada éxito recibido y no dar ningún punto final en el primer contratiempo.

A nuestros padres y hermanas por todo su amor, por todos los esfuerzos y sacrificios hechos por nosotros. Ellos han sido y son, sin lugar a dudas, fuente de energía continua para seguir avanzando.

A la Universidad de Carabobo, por brindarnos la oportunidad de realizar nuestros estudios de pregrado. A la Escuela de Ingeniería Mecánica y sus Profesores, principalmente aquellos que no solo nos guiaron en el ámbito académico, sino que también se esforzaron en abarcar el lado humano y personal; gracias por su invaluable labor formadora.

Al Profesor Javier Arruti, por aceptarnos para realizar este trabajo de grado bajo su dirección, por darnos la oportunidad de aprender a su lado, por sus consejos, su apoyo, por sus útiles sugerencias durante todo el período de trabajo y elaboración de esta tesis.

Al Profesor Edwin Peña, por prestar una ayuda invaluable, porque sin ninguna obligación nos colaboró, fue paciente y nos aconsejó durante todo el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Al Profesor David Ojeda, por permitirnos usar las herramientas computacionales del CEBIOMEUC UC; sin ello habríamos durado una eternidad para culminar la tesis.

Al Ingeniero Ricardo Carmona y todo el equipo de Autogas por toda la colaboración, la paciencia y el apoyo prestado al abrirnos las puertas de su empresa durante el desarrollo de este trabajo.

A la empresa TRAILVENCA por todo su aporte durante el desarrollo de la fase experimental del presente trabajo.

A aquellos compañeros de estudio y amigos que sin ser nombrados saben la importancia que tuvieron durante la elaboración de este trabajo de grado, gracias por ser ese bastón en momentos difíciles y brindarnos su apoyo de manera incondicional.

# **DEDICATORIA**

---

*A mi Familia porque sin ellos no hubiera alcanzado esta meta en mi vida, a la casa de estudio la UNIVERSIDAD DE CARABOBO, que fue durante 5 años un hogar y un espacio de formación profesional. A la ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA y a sus profesores por brindarme la oportunidad de desarrollar mis habilidades y cualidades en ella. A todos mis amigos que me brindaron el apoyo incondicional en esos momentos difíciles.*

Ávila R., Yhonan A.



# DEDICATORIA

---

*A mi padre Alexander José, que desde el cielo me guía y estoy seguro que en estos momentos está orgulloso de mí. A mi madre Rosa Marbella, por todo lo que me ha dado en esta vida, especialmente por sus sabios consejos y por estar a mi lado en los momentos difíciles. A mi hermana Marbelys, que sin dudarle me ha prestado su ayuda en todo momento. A mis tíos, especialmente Inocencio Pérez, por estar siempre dispuestos a apoyarme en todo lo referente a mi desarrollo académico y personal. A mis abuelos y primos que siempre me han brindado su ayuda. A todos mis amigos que me apoyaron y estuvieron siempre presentes durante el desarrollo de la carrera...! A ustedes les dedico el éxito alcanzado con este trabajo de grado.*

Pérez J., Markos A.



# ***RESUMEN***

---

La siguiente investigación tiene como propósito evaluar el diseño de las estructuras de sujeción para cilindros de gas natural vehicular. Para ello, se estudian dos modelos de estructuras que son fabricadas e instaladas por Autogas. Empleando el Método de Elementos Finitos (MEF), se evalúa la distribución de esfuerzos y desplazamientos en cada modelo para los diferentes estados de carga estipulados en las normas *ISO 15501* y *ANSI-NFPA 52*. Estas condiciones se simulan a través de un programa computacional basado en el MEF (ABAQUS™ versión 6.9). Los resultados obtenidos muestran que los estados críticos se obtienen al aplicar la carga longitudinal posterior establecida en la norma *ISO 15501*. Para la estructura “A”, la zona más esforzada se encuentra en uno de sus flejes de fijación, no obstante, dicho esfuerzo no produce la falla del sistema. La estructura de sujeción “B” presenta un esfuerzo máximo superior a la resistencia a la tracción del material, ubicado en las zonas cercanas a la unión del ángulo con la pletina de anclaje; esto conlleva a que la estructura no cumpla con el criterio de aceptación de la norma *ISO 15501*. Adicionalmente, se efectúa un análisis comparativo que permite validar los resultados obtenidos en el simulador. Para ello, se ejecuta una simulación aplicando dos cargas longitudinales posteriores en la estructura de sujeción “A”, menores a las

establecidas en las normas. Las mismas se aplican en un ensayo físico mediante una prensa hidráulica; allí se registra el comportamiento de la estructura utilizando un dispositivo que permite cuantificar los esfuerzos generados. Se verifica que los resultados del simulador son aceptables, ya que estos tienen concordancia con los datos experimentales. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos, se proponen una serie de modificaciones que permiten mejorar el diseño de las estructuras evaluadas.

# Índice General

Índice General .....	i
Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tablas .....	xvii
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1: <i>El Problema</i>.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.1. <i>Objetivo General</i> .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Justificación.....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. Alcance.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 2: <i>Marco Teórico</i>.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Antecedentes.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Bases Teóricas.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1. <i>Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA</i>.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.2. <i>Gas Natural Vehicular (GNV)</i>.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.3. <i>Autogas: Sistema Alterno de Combustible</i> .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.4. <i>Estructura de Sujeción</i>.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.5. <i>Método de Elementos Finitos</i> .....</b>	<b>20</b>

2.2.5.1. Descripción del Método de Elementos Finitos .....	20
2.2.5.2. Características generales del Método de Elementos Finitos....	23
2.2.5.3. Tipos de Elementos Finitos .....	24
<b>CAPÍTULO 3: Metodología.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1. Nivel de la investigación.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2. Diseño de la investigación.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.1. Investigación sobre Normas Internacionales .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2. Selección y obtención de las Normas Internacionales .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.3. Definición de los parámetros a evaluar.....</b>	<b>30</b>
3.2.3.1. Método de Evaluación según ISO 15501 .....	30
3.2.3.2. Método de Evaluación según ANSI – NFPA 52 .....	33
<b>3.2.4. Investigación y comparación de distintos programas</b>	
<b>computacionales de simulación .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.5. Selección del programa computacional.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.6. Determinación de los modelos de estructuras de sujeción a</b>	
<b>evaluar .....</b>	<b>34</b>
3.2.6.1. Estructura de sujeción “A” .....	34
3.2.6.2. Estructura de sujeción “B” .....	35
<b>3.2.7. Modelación en CAD de las estructuras de sujeción .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.8. Simulación en el programa computacional .....</b>	<b>37</b>
3.2.8.1. Pre-procesador .....	38
3.2.8.2. Calculador .....	44
3.2.8.3. Post-procesador.....	45
<b>3.2.9. Realización de Ensayo Físico .....</b>	<b>46</b>

<b>3.2.10. Comparar resultados obtenidos</b> .....	53
<b>3.2.11. Elaborar especificaciones con las que se pueda desarrollar un manual que describa las características de un diseño óptimo y confiable de los sistemas de sujeción</b> .....	53
<b>CAPÍTULO 4: Resultados</b> .....	55
<b>4.1. Validación del Programa Computacional</b> .....	55
<b>4.1.1. Simulación de Ensayo Físico</b> .....	55
4.1.1.1. Aplicación de 1.170 N.....	56
4.1.1.2. Aplicación de 2.340 N.....	60
<b>4.1.2. Ensayo Físico</b> .....	65
4.1.2.1. Resistencia eléctrica en galgas extensométricas. ....	65
4.1.2.2. Variación de resistencia eléctrica. ....	66
4.1.2.3. Esfuerzos normales para cada punto de estudio.....	67
<b>4.2. Simulaciones</b> .....	67
<b>4.2.1. Estructura de Sujeción “A”</b> .....	68
4.2.1.1. Aplicación de carga posterior según norma ISO 15501.....	69
4.2.1.2. Aplicación de carga delantera según norma ISO 15501.....	71
4.2.1.3. Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3.....	74
4.2.1.4. Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3. ....	77
4.2.1.5. Aplicación de carga ascendente según norma ISO 15501.....	80
4.2.1.6. Aplicación de carga descendente según norma ANSI-NFPA 52.....	83

4.2.1.7. Aplicación de carga ascendente según norma ANSI-NFPA 52. ....	86
4.2.1.8. Aplicación de carga lateral según norma ANSI-NFPA 52, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3.....	88
4.2.1.9. Aplicación de carga lateral según norma ANSI-NFPA 52, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3. ....	88
4.2.1.10. Aplicación de carga delantera según norma ANSI-NFPA 52. ....	89
4.2.1.11. Aplicación de carga posterior según norma ANSI-NFPA 52. ....	91
<b>4.2.2. Estructura de Sujeción “B”</b> .....	<b>94</b>
4.2.2.1. Aplicación de carga longitudinal según norma ISO 15501.....	94
4.2.2.2. Aplicación de carga ascendente según norma ISO 15501.....	97
4.2.2.3. Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501. ....	100
4.2.2.4. Aplicación de carga ascendente según norma ANSI-NFPA 52. ....	103
4.2.2.5. Aplicación de carga descendente según norma ANSI-NFPA 52. ....	106
4.2.2.6. Aplicación de carga lateral según norma ANSI-NFPA 52. ....	108
4.2.2.7. Aplicación de carga longitudinal según norma ANSI-NFPA 52. ....	108
<b>4.2.3. Modificaciones propuestas para la estructura de sujeción “A”</b> .....	<b>111</b>
<b>4.2.4. Modificaciones propuestas para la estructura de sujeción “B”</b> .....	<b>116</b>

<b>CAPÍTULO 5: Análisis de Resultados</b> .....	121
<b>5.1. Validación del Programa Computacional</b> .....	121
<b>5.1.1. Simulación de Ensayo Físico</b> .....	121
<b>5.1.2. Ensayo Físico</b> .....	125
<b>5.2. Simulaciones</b> .....	126
<b>5.2.1. Estructura de Sujeción “A”</b> .....	127
5.2.1.1. <i>Aplicación de carga posterior según norma ISO 15501</i> .....	127
5.2.1.2. <i>Aplicación de carga delantera según norma ISO 15501</i> .....	127
5.2.1.3. <i>Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501, en                     dirección negativa respecto al eje coordenado 3.</i> .....	128
5.2.1.4. <i>Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501, en                     dirección positiva respecto al eje coordenado 3.</i> .....	128
5.2.1.5. <i>Aplicación de carga ascendente según norma ISO 15501</i> ....	128
5.2.1.6. <i>Aplicación de cargas según norma ANSI-NFPA 52</i> .....	128
<b>5.2.2. Estructura de Sujeción “B”</b> .....	129
5.2.2.1. <i>Aplicación de carga longitudinal según norma ISO 15501</i> .....	129
5.2.2.2. <i>Aplicación de carga ascendente según norma ISO 15501</i> ....	129
5.2.2.3. <i>Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501</i> .....	130
5.2.2.4. <i>Aplicación de cargas según norma ANSI-NFPA 52</i> .....	130
<b>5.2.3. Modificaciones propuestas</b> .....	130
5.2.3.1. <i>Modelo propuesto para la estructura de sujeción “A”</i> . .....	130
5.2.3.2. <i>Modelo propuesto para la estructura de sujeción “B”</i> . .....	131

<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>133</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>137</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>139</b>
<b>APÉNDICE A .....</b>	<b>141</b>
<b>APÉNDICE B .....</b>	<b>147</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Cilindros de GNV instalados en un vehículo tipo Pickup (a), y un Aveo (b). .....	4
<b>Figura 2.1.</b> Presentación virtual de un centro de conversión de Autogas (Fuente: Autogas). .....	14
<b>Figura 2.2.</b> Modelación de geometrías con mallado de dominios en el espacio (Liu y Quek, 2003). .....	21
<b>Figura 2.3.</b> Dominio rectangular mallado por elementos rectangulares (Liu y Quek, 2003). .....	22
<b>Figura 2.4.</b> Elementos tipo viga con sus grados de libertad (Rockey, 1983).25	
<b>Figura 2.5.</b> Representación de los grados de libertad de elemento tipo armadura (Rockey, 1983). .....	26
<b>Figura 2.6.</b> Elemento tipo membrana de forma triangular (Rockey, 1983)...27	
<b>Figura 2.7.</b> Elementos tipo elástico bidimensional triangular con sus grados de libertad (Rockey, 1983)...27	
<b>Figura 2.8.</b> Representación gráfica de un elemento tipo bloque en forma de punto nodales (Rockey, 1983). .....	28
<b>Figura 3.1.</b> Representación de las direcciones de aplicación de carga sobre cilindros según ANSI – NFPA 52. ....	33
<b>Figura 3.2.</b> Estructura de sujeción “A” .....	35
<b>Figura 3.3.</b> Estructura de sujeción B. ....	36
<b>Figura 3.4.</b> Representación en CAD de la estructura de sujeción “A”. .....	37
<b>Figura 3.5.</b> Representación en CAD de la estructura de sujeción “B”. .....	37

<b>Figura 3.6.</b> Diagrama de operación del programa ABAQUS™	38
<b>Figura 3.7.</b> Ensamblaje de la estructura de sujeción “A” relacionado al sistema de coordenadas del programa computacional ABAQUS™	39
<b>Figura 3.8.</b> Aplicación de empotramientos en la estructura de sujeción “A”	40
<b>Figura 3.9.</b> Aplicación de contactos tipo <i>atadura</i> en la estructura de sujeción “A”	41
<b>Figura 3.10.</b> Aplicación de contactos tangencial-normal en la estructura de sujeción “A”	42
<b>Figura 3.11.</b> Aplicación de carga puntual longitudinal en el cilindro de la estructura de sujeción “A”	42
<b>Figura 3.12.</b> Elemento finito C3D4	43
<b>Figura 3.13.</b> Representación de un mallado de la estructura de sujeción “A”	44
<b>Figura 3.14.</b> Visualización de esfuerzos de Von Mises en el programa computacional ABAQUS™ (Unidades en MPa)	45
<b>Figura 3.15.</b> Visualización de desplazamientos en el programa computacional ABAQUS™ (Unidades en mm)	46
<b>Figura 3.16.</b> Ubicación de los puntos de estudio en la estructura durante el ensayo	47
<b>Figura 3.17.</b> Prensa hidráulica utilizada para realizar el ensayo físico	48
<b>Figura 3.18.</b> Sujetador de la estructura de sujeción	49
<b>Figura 3.19.</b> Ubicación de las galgas para cada punto de estudio	50
<b>Figura 3.20.</b> Transductor Análogo-Digital MCC USB-2404-UI	51
<b>Figura 3.21.</b> Montaje del transductor Análogo-Digital MCC USB-2404-UI	51
<b>Figura 4.1.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos para la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga de 1.170 N	57

<b>Figura 4.2.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos para la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga de 1.170 N.....	57
<b>Figura 4.3.</b> Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 1 y 4 durante la aplicación de la carga de 1.170 N. ....	58
<b>Figura 4.4.</b> Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 2 para los puntos de estudio 1 y 4 durante la aplicación de la carga de 1.170 N. ....	59
<b>Figura 4.5.</b> Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 2 y 5 durante la aplicación de la carga de 1.170 N. ....	59
<b>Figura 4.6.</b> Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 3 y 6 durante la aplicación de la carga de 1.170 N. ....	60
<b>Figura 4.7.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos para la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga de 2.340 N. ....	61
<b>Figura 4.8.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos para la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga de 2.340 N.....	62
<b>Figura 4.9.</b> Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 1 y 4 durante la aplicación de la carga de 2.340 N. ....	63
<b>Figura 4.10.</b> Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 2 para los puntos de estudio 1 y 4 durante la aplicación de la carga de 2.340 N. ....	63

<b>Figura 4.11.</b> Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordinado 3 para los puntos de estudio 2 y 5 durante la aplicación de la carga de 2.340 N.....	64
<b>Figura 4.12.</b> Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordinado 3 para los puntos de estudio 3 y 6 durante la aplicación de la carga de 2.340 N.....	64
<b>Figura 4.13.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga posterior según norma <i>ISO 15501</i> .....	69
<b>Figura 4.14.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga posterior según norma <i>ISO 15501</i> .....	70
<b>Figura 4.15.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga posterior según la norma <i>ISO 15501</i> (Valores en MPa). .....	71
<b>Figura 4.16.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según norma <i>ISO 15501</i> .....	72
<b>Figura 4.17.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según norma <i>ISO 15501</i> .....	73
<b>Figura 4.18.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según la norma <i>ISO 15501</i> (Valores en MPa). .....	74
<b>Figura 4.19.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según norma <i>ISO 15501</i> , en dirección negativa respecto al eje coordinado 3. ....	75

<b>Figura 4.20.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según norma <i>ISO 15501</i> , en dirección negativa respecto al eje coordenado 3.....	76
<b>Figura 4.21.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según la norma <i>ISO 15501</i> , en dirección negativa respecto al eje coordenado 3 (Valores en MPa). .....	77
<b>Figura 4.22.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según norma <i>ISO 15501</i> , en dirección positiva respecto al eje coordenado 3.....	78
<b>Figura 4.23.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según norma <i>ISO 15501</i> , en dirección positiva respecto al eje coordenado 3.....	79
<b>Figura 4.24.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según la norma <i>ISO 15501</i> , en dirección positiva respecto al eje coordenado 3 (Valores en MPa). .....	80
<b>Figura 4.25.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga ascendente según norma <i>ISO 15501</i> .....	81
<b>Figura 4.26.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga ascendente según norma <i>ISO 15501</i> .....	82
<b>Figura 4.27.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises durante la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “A” según la norma <i>ISO 15501</i> (Valores en MPa). .....	83

<b>Figura 4.28.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga descendente según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . ....	84
<b>Figura 4.29.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga descendente según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . ....	85
<b>Figura 4.30.</b> Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga descendente en la estructura de sujeción “A” según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> (Valores en mm). ....	85
<b>Figura 4.31.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga ascendente según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . ....	86
<b>Figura 4.32.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga ascendente según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . ....	87
<b>Figura 4.33.</b> Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “A” según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> (Valores en mm). ....	87
<b>Figura 4.34.</b> Distribución de desplazamientos en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> , en dirección positiva respecto al eje coordenado 3 (Valores en mm). ....	88
<b>Figura 4.35.</b> Distribución de desplazamientos en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> , en dirección negativa respecto al eje coordenado 3 (Valores en mm). ....	89
<b>Figura 4.36.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . ....	90

<b>Figura 4.37.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	90
<b>Figura 4.38.</b> Distribución de desplazamientos en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> (Valores en mm). .....	91
<b>Figura 4.39.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga posterior según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	92
<b>Figura 4.40.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga posterior según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	93
<b>Figura 4.41.</b> Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga posterior en la estructura de sujeción “A” según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> (Valores en mm). .....	93
<b>Figura 4.42.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga longitudinal según norma <i>ISO 15501</i> . .....	95
<b>Figura 4.43.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga longitudinal según norma <i>ISO 15501</i> . .....	95
<b>Figura 4.44.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises durante la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción “B” según la norma <i>ISO 15501</i> (Valores en MPa). .....	96
<b>Figura 4.45.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga ascendente según norma <i>ISO 15501</i> . .....	98

<b>Figura 4.46.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga ascendente según norma <i>ISO 15501</i> . .....	98
<b>Figura 4.47.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises durante la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “B” según la norma <i>ISO 15501</i> (Valores en MPa). .....	99
<b>Figura 4.48.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga lateral según norma <i>ISO 15501</i> . .....	101
<b>Figura 4.49.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga lateral según norma <i>ISO 15501</i> . .....	101
<b>Figura 4.50.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises durante la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción “B” según la norma <i>ISO 15501</i> (Valores en MPa). .....	102
<b>Figura 4.51.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga ascendente según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	104
<b>Figura 4.52.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga ascendente según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	104
<b>Figura 4.53.</b> Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “B” según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> (Valores en mm). .....	105
<b>Figura 4.54.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga descendente según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	106

<b>Figura 4.55.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga descendente según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	107
<b>Figura 4.56.</b> Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga descendente en la estructura de sujeción “B” según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> (Valores en mm). .....	107
<b>Figura 4.57.</b> Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción “B” según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> (Valores en mm). .....	108
<b>Figura 4.58.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga longitudinal según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	109
<b>Figura 4.59.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga longitudinal según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	110
<b>Figura 4.60.</b> Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción “B” según la norma <i>ANSI-NFPA 52</i> (Valores en mm). .....	111
<b>Figura 4.61.</b> Representación en CAD de la estructura de sujeción “A” modificada. ....	112
<b>Figura 4.62.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” modificada, durante la aplicación de la carga posterior según norma <i>ISO 15501</i> . .....	114
<b>Figura 4.63.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” modificada, durante la aplicación de la carga posterior según norma <i>ISO 15501</i> . .....	114
<b>Figura 4.64.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” modificada, durante la aplicación de la carga posterior según la norma <i>ISO 15501</i> (Valores en MPa). .....	115

<b>Figura 4.65.</b> Representación en CAD de la estructura de sujeción “B” modificada. ....	117
<b>Figura 4.66.</b> Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” modificada, durante la aplicación de la carga longitudinal según norma <i>ISO 15501</i> . ....	119
<b>Figura 4.67.</b> Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” modificada, durante la aplicación de la carga longitudinal según norma <i>ISO 15501</i> . ....	119
<b>Figura 4.68.</b> Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “B” modificada, durante la aplicación de la carga longitudinal según la norma <i>ISO 15501</i> (Valores en MPa). ....	120

## Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Características de flejes y tornillos de las estructuras de sujeción según el peso del(los) cilindro(s) (Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA). .....	12
<b>Tabla 2.2.</b> Características de los cilindros que instala Autogas (Fuente: Autogas). .....	16
<b>Tabla 2.3.</b> Materiales utilizados para la fabricación y ensamblaje de las estructuras de sujeción (Fuente: Autogas). .....	16
<b>Tabla 3.1.</b> Propiedades del material usadas en el programa computacional.	39
<b>Tabla 3.2.</b> Cargas a aplicar durante el ensayo físico. ....	47
<b>Tabla 4.1.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga de 1.170 N. ....	56
<b>Tabla 4.2.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga de 2.340 N. ....	60
<b>Tabla 4.3.</b> Valores de resistencia registrados por las galgas extensométricas para cada punto de estudio y condición de carga ensayada. ....	65
<b>Tabla 4.4.</b> Variación de resistencia asociada a cada punto de estudio y carga aplicada. ....	66
<b>Tabla 4.5.</b> Esfuerzos normales generados en los puntos de estudio para cada condición de carga evaluada. ....	67
<b>Tabla 4.6.</b> Cargas a aplicar durante la prueba estática en estructuras de sujeción con cilindros de 40L (ISO 15501). ....	68

<b>Tabla 4.7.</b> Carga a aplicar durante la prueba estática en estructuras de sujeción con cilindros de 40L ( <i>ANSI – NFPA 52</i> ). .....	68
<b>Tabla 4.8.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga posterior en la estructura de sujeción “A” según norma <i>ISO 15501</i> . .....	69
<b>Tabla 4.9.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga delantera en la estructura de sujeción “A” según norma <i>ISO 15501</i> . .....	71
<b>Tabla 4.10.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción “A” según norma <i>ISO 15501</i> , en <i>dirección negativa respecto al eje coordenado 3</i> . .....	74
<b>Tabla 4.11.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción “A” según norma <i>ISO 15501</i> , en <i>dirección positiva respecto al eje coordenado 3</i> . .....	78
<b>Tabla 4.12.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “A” según norma <i>ISO 15501</i> . .....	80
<b>Tabla 4.13.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga descendente en la estructura de sujeción “A” según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	84
<b>Tabla 4.14.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “A” según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	86
<b>Tabla 4.15.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga delantera en la estructura de sujeción “A” según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	89
<b>Tabla 4.16.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga posterior en la estructura de sujeción “A” según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	91
<b>Tabla 4.17.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción “B” según norma <i>ISO 15501</i> . .....	94
<b>Tabla 4.18.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “B” según norma <i>ISO 15501</i> . .....	97
<b>Tabla 4.19.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción “B” según la norma <i>ISO 15501</i> . .....	100

<b>Tabla 4.20.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “B” según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	103
<b>Tabla 4.21.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga descendente según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	106
<b>Tabla 4.22.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción “B” según norma <i>ANSI-NFPA 52</i> . .....	109
<b>Tabla 4.23.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga posterior en la estructura de sujeción “A” modificada, según norma <i>ISO 15501</i> . .....	113
<b>Tabla 4.24.</b> Resultados numéricos para la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción “B” modificada, según norma <i>ISO 15501</i> . .....	118
<b>Tabla 5.1.</b> Comparación de resultados numéricos y experimentales obtenidos durante la aplicación de la carga de 1.170 N. ....	126
<b>Tabla 5.2.</b> Comparación de resultados numéricos y experimentales obtenidos durante la aplicación de la carga de 2.340 N. ....	126



# ***INTRODUCCIÓN***

---

El uso masivo de vehículos automotores es una de las principales causas de la contaminación a nivel mundial; por esta razón, se están desarrollando e implementando nuevos combustibles que permiten disminuir la emisión de agentes contaminantes hacia la atmósfera.

En Venezuela, PDVSA fomenta el uso del gas natural vehicular a través de un programa llamado Autogas, el cual se fundamenta en un sistema alternativo de combustible, que se instala en vehículos automotores con el objetivo que el automóvil funcione con un gas poco contaminante. Dicho combustible se almacena en cilindros especiales, los cuales se sujetan al vehículo por medio de una estructura de sujeción.

Este proyecto pretende evaluar el diseño de diferentes estructuras de sujeción a partir de simulaciones realizadas en computadora, donde se representen situaciones críticas que pueden experimentar estos sistemas en condiciones reales.

El trabajo se divide en cinco capítulos para facilitar la comprensión de la información presentada.

En el primer capítulo se describe el contexto del problema y se exponen cada uno de los objetivos que se deben alcanzar durante el desarrollo del estudio; además, se presentan los alcances del tema.

En el segundo capítulo se presenta la información teórica que permite abordar el tema con mayor facilidad, como lo son los antecedentes y las bases teóricas de la investigación.

En el tercer capítulo se describe la metodología asociada al desarrollo de la investigación, desglosando las fases de estudio que permitirán alcanzar los objetivos y los métodos utilizados para la obtención de los resultados.

En el cuarto y quinto capítulo se presentan los resultados obtenidos y los análisis respectivamente.

Para finalizar, se presentan las conclusiones alcanzadas y las recomendaciones que deben ser consideradas en estudios posteriores.

# **CAPÍTULO 1**

## *El Problema*

---

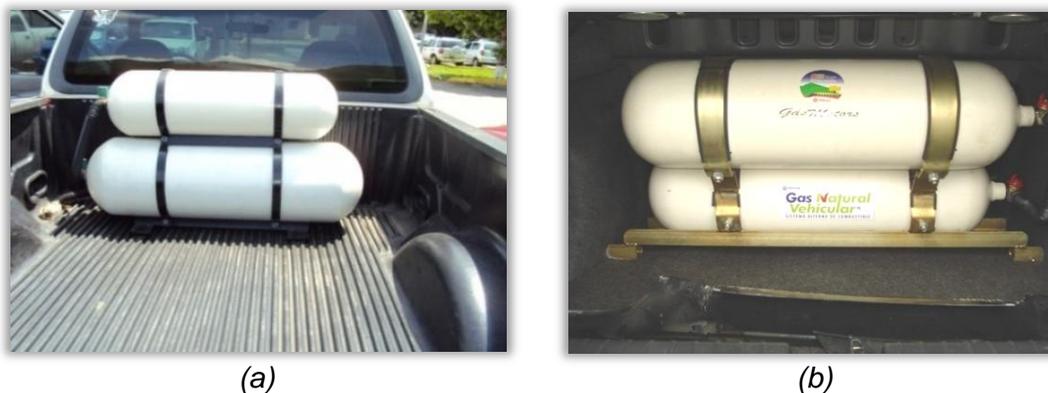
A continuación se indican los aspectos fundamentales que definen el presente estudio como lo es el planteamiento del problema, a partir del cual se han generado los objetivos que se persiguen con este trabajo. Asimismo, se señalan los alcances de la investigación y las razones que la justifican.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Autogas es un proyecto que desarrolla PDVSA, el cual tiene como objetivo introducir en el mercado venezolano un combustible alternativo para uso automotor que permita disminuir el impacto ambiental producido con los combustibles tradicionales.

Por esta razón, Autogas instala en vehículos automotores un sistema que les permite funcionar de manera dual o dedicada utilizando gas natural vehicular (GNV); todo esto tomando como referencia lo establecido en normas nacionales e internacionales, con el propósito de prevenir la ocurrencia de situaciones que pongan en peligro la integridad del usuario, de las instalaciones del centro de conversión y del vehículo.

Para poseer este sistema se necesita instalar obligatoriamente los cilindros de almacenamiento de GNV. La ubicación de estos cilindros en el vehículo dependerá de los procedimientos y especificaciones establecidas en las normas. Cabe resaltar que estos cilindros se fijan al automóvil por medio de un sistema llamado estructura de sujeción (Ver Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Cilindros de GNV instalados en un vehículo tipo Pickup (a), y un Aveo (b).

Autogas, a través de distintos talleres metalmecánicos que se encuentran distribuidos en todo el país, se encarga de fabricar estas estructuras las cuales deben estar sujetas a los parámetros señalados en el Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA, donde se establecen ciertas condiciones que deben ser evaluadas para la aprobación del diseño de estas estructuras. Sin embargo, en caso de que no se pueda implementar los métodos de evaluación que allí se especifican, el manual permite fabricar estos dispositivos bajo condiciones de “Ingeniería Experimental”, en donde solo se define la resistencia mínima a la tracción que deben poseer los componentes metálicos que conforman la estructura de sujeción, además del ancho y espesor de los flejes y diámetros de los tornillos. Como estas especificaciones son muy generales, el fabricante

cuenta con gran libertad al momento de definir la configuración y las dimensiones de diseño de la estructura.

Actualmente, Autogas no cuenta con los equipos necesarios que permitan evaluar las condiciones de trabajo establecidas en el manual; por esta razón, se ha venido fabricando estas estructuras siguiendo los parámetros de “Ingeniería Experimental”, situación que ha permitido a los fabricantes elaborar distintos modelos de estructuras de sujeción, que aunque en algunos casos son muy similares, no son fabricadas siguiendo una serie de parámetros de diseño más específicos, que garanticen la seguridad de la estructura. Por ello, existe la necesidad de evaluar el diseño de estas estructuras y así poder verificar si los modelos que se fabrican actualmente se comportan de manera adecuada y segura.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar el diseño de las estructuras de sujeción para cilindros de GNV instalados en vehículos automotores con sistema dedicado o dual.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

1. Investigar sobre normas internacionales que traten el diseño de este tipo de estructuras.
2. Establecer las condiciones que deben ser evaluadas, de acuerdo a lo establecido en las normas internacionales y en el Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA.

3. Simular por el método de elementos finitos, bajo las condiciones establecidas en las normas internacionales como cargas y deformaciones permitidas, el diseño de las estructuras de sujeción.
4. Realizar ensayos en físico de las estructuras de sujeción.
5. Comparar los resultados obtenidos en la simulación con los resultados obtenidos en los ensayos.
6. Elaborar, de acuerdo a los resultados obtenidos, las especificaciones para desarrollar un manual que describa las características de un diseño óptimo y confiable de los sistemas de sujeción.

### **1.3. Justificación**

Actualmente existe cierto grado de incertidumbre en cuanto al comportamiento de las estructuras de sujeción cuando estas son sometidas a condiciones críticas, como por ejemplo situaciones de impacto; ya que desde el punto de vista ingenieril los parámetros de “Ingeniería Experimental” que define el Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA no son muy convincentes. Esta situación de alguna manera afecta el privilegio que tiene el usuario de contar con un sistema confiable que no atente contra su seguridad, aun en casos de accidentes automovilísticos.

También es importante mencionar que como no se han implementado métodos de evaluación que certifiquen la calidad del diseño de las estructuras de sujeción, puede que estas estén siendo fabricadas con exceso de material (sobre diseñada), hecho que afecta negativamente al proyecto Autogas desde el punto de vista económico, ya que éste se encarga de asumir todos los costos asociados a la conversión y mantenimiento de los vehículos.

Por todo esto se hace necesario realizar un estudio que permita determinar qué tan seguras y eficientes son las estructuras de sujeción que fabrica e instala el proyecto Autogas.

#### **1.4. Alcance**

- Las estructuras de sujeción a estudiar solo serán las elaboradas y proporcionadas por el proyecto Autogas.
- El análisis se basará únicamente en normas internacionales.
- Las condiciones a evaluar deben abarcar situaciones tanto de carga estática como de carga dinámica.



# ***CAPÍTULO 2***

## ***Marco Teórico***

---

### **2.1. Antecedentes**

Damaso (2004) desarrolló el modelo de la estructura de un automóvil real con el objetivo de analizar su diseño. El modelo se elaboró en CAD y posteriormente se simuló a través del método de los elementos finitos bajo la acción de cargas estáticas que se presentan en dicha estructura. El programa computacional utilizado para realizar la simulación fue ALGOR<sup>TM</sup>. Los resultados que se obtuvieron fueron acordes con lo esperado ya que la estructura no presentó esfuerzos elevados debido a la amortiguación por la suspensión. De esta manera se estableció que el elemento en general posee un factor de seguridad con un alto grado de confianza para condiciones estáticas.

López (2005) estudió los esfuerzos causados por la acción de cargas reales estáticas en el bastidor del Auto Deportivo “MXT” elaborado por la empresa Tecnoidea S.A, con el objetivo de optimizar su diseño. Para ello, desarrolló un análisis de elementos finitos basado en el programa ALGOR<sup>TM</sup>. Observó que el modelo suministrado por la empresa se comporta de manera estable y no presenta esfuerzos elevados para condiciones estáticas, sin embargo,

considerando que la estructura estará sometida a fuerzas dinámicas, fatiga y posiblemente impacto (condiciones reales), llevó a cabo una serie de modificaciones que permitieron disminuir los esfuerzos concentrados en la estructura. Dichas modificaciones estuvieron relacionadas a los materiales y la geometría de determinados componentes del vehículo.

Moisés (2007) elaboró y estudió, por el método de elementos finitos, tres amortiguadores distintos como propuesta de amortiguación de una aeronave de radio control, con el propósito de poder definir el sistema más adecuado. Trabajó con el programa computacional ALGOR<sup>TM</sup>, permitiéndole hacer simulaciones con valores límites de las variables para determinar comportamiento y reacción del elemento estudiado. Observó los pros y los contras de distintas situaciones, encontrando la alternativa más adecuada. También pudo definir el ángulo de inclinación más conveniente al momento de instalar el sistema en la aeronave.

Summerscales (2009) realizaron el diseño, fabricación, pruebas mecánicas y análisis numérico de una viga de ballesta con el fin de crear un modelo que presente un buen rendimiento balístico. Este componente fue fabricado usando la infusión de resina, y se modeló usando un código comercial de elemento finito llamado ABAQUS<sup>TM</sup>; además, el modelo fue validado por pruebas mecánicas. Una buena correlación fue encontrada entre las desviaciones experimentalmente moderadas y los resultados numéricos.

Sánchez (2003) analizó los esfuerzos generados en distintos recipientes cilíndricos sometidos a presión. Para ello, empleó el método de elementos finitos debido a la facilidad que este ofrece respecto a otros métodos matemáticos que son asociados con el estudio de recipientes a presión. El programa computacional utilizado fue ALGOR<sup>TM</sup>. Durante el desarrollo del trabajo, se

cambiaron distintas variables de los recipientes evaluados, hasta que finalmente se determinó el modelo que mejor se adapta a las condiciones de funcionamiento.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. *Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA***

La certificación del diseño de las estructuras de sujeción que fabrica Autogas está avalada por el Manual de Ingeniería de Diseño elaborado por PDVSA, el cual lleva por título *“ESTRUCTURA DE SUJECIÓN PARA CILINDROS DE GNV EN VEHÍCULOS AUTOMOTORES. DISEÑO, FABRICACIÓN E INSTALACIÓN”*.

Este manual tiene como objetivo establecer los requerimientos corporativos necesarios para el diseño, fabricación e instalación de la estructura de sujeción para cilindros de GNV instalados en vehículos automotores con sistema biocombustible, dedicado o dual, con la finalidad de prevenir la ocurrencia de situaciones que pongan en peligro la integridad del usuario, de las instalaciones del centro de conversión y del vehículo. Entre los métodos de certificación que establece el manual se encuentra: Por Ingeniería Experimental (Cilindros de Acero). Este procedimiento es utilizado en aquellos casos donde la estructura cuenta con la ausencia de un diseño específico, soportado por pruebas experimentales y adecuados criterios de ingeniería. El método considera válida aquellas estructuras que cumplan las siguientes condiciones:

- Los componentes metálicos de la estructura de sujeción, deben tener una resistencia mínima a la tracción de 340 MPa, de acuerdo al método ASTM E8.

- Los flejes de la estructura de sujeción deben ser de aceros estructurales. Las medidas deben ser las indicadas en la Tabla 2.1. Se debe tomar en cuenta que en caso de instalar más de un cilindro por medio de una sola estructura, el peso del cilindro debe ser la suma de los cilindros instalados.

**Tabla 2.1.** Características de flejes y tornillos de las estructuras de sujeción según el peso del(los) cilindro(s) (Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA).

<b>Peso de Cilindro (kg)</b>	<b>Diámetro del Tornillo (mm)</b>	<b>Medida de Flejes (mm)</b>
0 - 100	10	30 x 3
101 - 150	12	50 x 6
151 – más	Requiere de un diseño especial	

- Los tornillos utilizados para el ensamble y la fijación deben ser grado 8.8, de acero forjado o trefilado de una resistencia mínima a la tracción de 500 MPa. Las tuercas serán de acero forjado o trefilado de una resistencia mínima a la tracción de 340 MPa. Ambos deben ser resistentes a la corrosión. En caso de que no posean tratamiento a la corrosión, se debe aplicar tratamiento superficial como cromado, zincado u otro similar.

### **2.2.2. Gas Natural Vehicular (GNV)**

El GNV es una mezcla de hidrocarburos, cuyo componente principal es el metano (CH<sub>4</sub>) y se encuentra de forma natural en las cuencas petrolíferas. El mismo es transportado mediante el uso de tuberías denominadas gasoductos a través de redes de transporte y distribución las cuales son operadas por la filial de PDVSA denominada PDVSA Gas.

El GNV es el mismo gas directo que se utiliza en los hogares, adopta el término de Gas Natural Vehicular cuando se comprime a presiones de 3.000 psi con la finalidad de ser empleado como combustible automotor.

### **2.2.3. Autogas: Sistema Alterno de Combustible**

El proyecto Autogas tiene como propósito disponer en el mercado venezolano un combustible alternativo para uso automotor que permita liberar el combustible líquido (gasolinas y diesel) de elevados costos de producción y gran valor comercial, los cuales podrían ser exportados, generando ingresos extras a la nación.

#### *Antecedentes del proyecto:*

- ✓ **1989:** Se inició el programa de Gas Natural Vehicular en Venezuela.
- ✓ **1990-1997:** Se construyeron 145 puntos de expendio de GNV y se convirtieron aproximadamente 33.000 vehículos de transporte público y de algunos organismos del Estado al sistema dual (gasolina-gas).
- ✓ **1998:** Se culmina la construcción de puntos de expendio y conversión vehicular programados.
- ✓ **2006:** Siguiendo instrucciones del Ejecutivo Nacional, se reactiva el programa con el nombre de Proyecto Gas Natural Vehicular.

#### *Centros de conversión:*

Los centros de conversión realizan la instalación, debidamente autorizada por el organismo competente para efectuar el proceso de conversión de un vehículo de manera tal que funcione con GNV (Ver Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Presentación virtual de un centro de conversión de Autogas  
(Fuente: Autogas).

Esta conversión se divide en tres fases que son:

- **Pre-conversión:** Antes de convertir todo vehículo a Gas Natural Vehicular, este debe ser evaluado previamente según la norma COVENIN 3228-99, completando un formato de evaluación que determina si el vehículo está apto para convertir a Gas Natural Vehicular, el procedimiento es denominado “PRUEBA DE PRE-CONVERSIÓN”.

En la etapa de la Pre-conversión se evalúan las siguientes condiciones:

- ✓ **Debe poseer sistema de Gasolina:** No se convertirán los vehículos que funcionen con Diesel, ya que por no poseer bujías y disponer de un sistema diferente de combustión habría que realizar modificaciones mayores al motor.
- ✓ **El vehículo debe ser de inyección (fuel injection):** La inyección computarizada tiene la ventaja que se puede emular haciendo uso de la electrónica avanzada del vehículo para una combustión eficiente y una pérdida de potencia mínima

- ✓ **El vehículo debe estar homologado:** Existen más de 200 vehículos homologados para la conversión al sistema dual, proceso que se lleva a cabo en conjunto con el INTEVEP.
- ✓ **El vehículo debe pasar la prueba de pre-conversión:** El vehículo debe ser evaluado a condiciones normales a gasolina para observar su rendimiento.
  
- **Conversión:** Es el proceso mediante el cual se adapta un vehículo para que funcione con Gas Natural Vehicular como combustible alternativo, que comprende la instalación de cada uno de los componentes del sistema dual y su posterior calibración.
  
- **Post-conversión:** Es una serie de pruebas que se realiza al vehículo una vez convertido al sistema dual Gasolina - Gas Natural Vehicular, para evaluar las condiciones de operación bajo especificaciones del fabricante trabajando tanto con gasolina como con Gas Natural Vehicular con la finalidad de garantizar la calidad de la conversión, según la norma 3228 del año 1999. En dichas pruebas básicamente se evalúan los cambios de combustible, aceleración y desaceleración, crucero general, entre otros.

#### **2.2.4. Estructura de Sujeción**

Se define como el conjunto de componentes y accesorios que conforman la sujeción del cilindro de GNV en un vehículo automotor con sistema de GNV.

Actualmente, todo lo relacionado a estas estructuras se desenvuelve de la siguiente manera:

- *Cilindros utilizados:*

Autogas utiliza actualmente cilindros de 27, 40 y 80 litros (capacidad asociada a litros de agua) con características bien definidas (Ver Tabla 2.2). Sin embargo, no se descarta la utilización de tamaños diversos, e incluso de diferentes diámetros.

**Tabla 2.2.** Características de los cilindros que instala Autogas (Fuente: Autogas).

Capacidad referencial (Litros de agua)	Capacidad de GNV (Nm <sup>3</sup> )	Diámetro Externo (mm)	Longitud (mm)	Peso (Kg)
27	6,75	232	795	30
40	10	273	860	40
80	20	356	1.021	80

- *Materiales utilizados en las estructuras de sujeción:*

Para la fabricación y ensamblaje de los dispositivos de sujeción se han venido utilizando los materiales que se indican en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Materiales utilizados para la fabricación y ensamblaje de las estructuras de sujeción (Fuente: Autogas).

Elemento	Propiedades
Pletinas y ángulos estructurales	Acero AISI-SAE 1020 Laminado Límite Elástico: 331 MPa Resistencia a la Tracción: 448 MPa Densidad: 7.900 kg/m <sup>3</sup> Módulo de Elasticidad: 210 GPa Alargamiento: 36%
Tornillo hexagonal zincado	M10 x 1,5 x 45 Grado 8.8 (Acero) Resistente a la corrosión

Continuación Tabla 2.3.

Elemento	Propiedades
Tuerca hexagonal de seguridad	M10 x 1,5 Grado 8 (Acero) Resistente a la corrosión
Arandelas especiales	Son fabricadas con el mismo material de las pletinas. Sus dimensiones son de 60 x 60 mm por lo que cuentan con por lo menos 3.600mm <sup>2</sup> de área de contacto como mínimo con el cuerpo del vehículo
Arandela plana para M10	El material corresponde a una aleación de Zinc
Goma aislante	50 x 3 mm (ancho x espesor)

- *Procesos básicos de fabricación e instalación de las estructuras de sujeción:*

Para la fabricación de los dispositivos de sujeción, se deben seguir los siguientes pasos:

I. Medición.

Se realiza la medición del espacio disponible en el vehículo, para verificar interferencias y plantear la ubicación preliminar del cilindro.

II. Corte.

Se realiza el corte de las pletinas, ángulos y vigas necesarias para realizar el montaje. Las herramientas necesarias para llevar a cabo esta actividad son:

- ✓ Taladro.
- ✓ Prensas.
- ✓ Cortadora de discos de mesa y de mano.
- ✓ Amoladoras / Desbastadoras de mano.

### III. Punteado Soldadura.

En esta etapa se realiza una soldadura preliminar para presentar los elementos armados en la cabina o maletero donde se fijará la estructura definitivamente, esto con la finalidad de poder soltar la unión con facilidad en caso de que sea necesario realizar un cambio en el ensamblaje. Para realizar estas soldaduras se utilizan las siguientes herramientas:

- ✓ Máquina de soldadura por arco eléctrico.
- ✓ Electrodo.

### IV. Soldadura Definitiva.

Posteriormente la soldadura se realiza de forma definitiva, con cordones continuos a lo largo de la superficie de unión indicada. Dicha soldadura es efectuada manualmente por herreros calificados. Las herramientas que se utilizan son:

- ✓ Máquina de soldadura por arco eléctrico.
- ✓ Electrodo ER70S-6 (0,1%C; 0,9%Si; 1,5%Mn).

### V. Pintura.

Una vez que la estructura esté finalizada, se pinta con pistolas de aire comprimido. Primero con una capa de fondo anticorrosivo y posteriormente con el acabado final en pintura de esmalte color negro.

### VI. Instalación.

Finalmente, la estructura se fija en el lugar definitivo, realizando perforaciones a la carrocería del vehículo en lugares donde no comprometa

estructuralmente el chasis del mismo, o que se vea afectado durante alguna eventualidad. Los cilindros son colocados en su sitio manualmente.

De acuerdo al Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA, algunas condiciones generales que deben cumplir los sistemas de sujeción son:

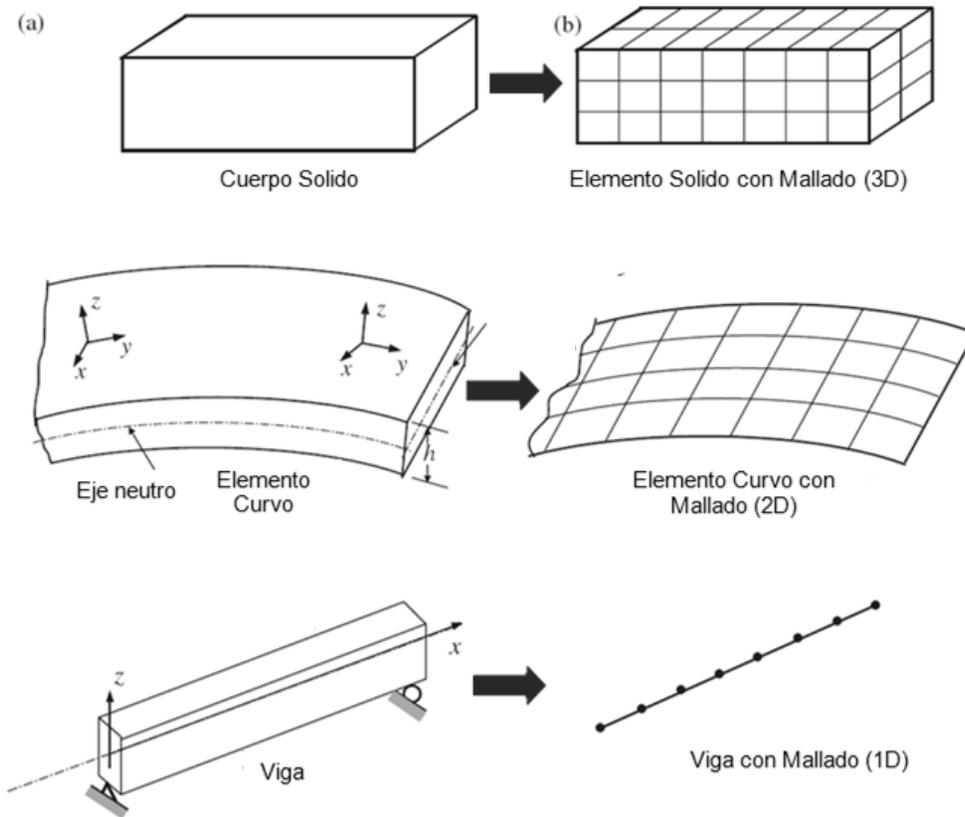
- ✓ Las estructuras de sujeción debe ser diseñadas para cada modelo de vehículo automotor. Se debe tomar en cuenta que no debilite las estructuras del vehículo y pueda soportar uno o más cilindros según el diseño.
- ✓ Las estructuras de sujeción se considerarán una sola pieza al momento de estar armada, por lo tanto se debe garantizar su fijación a las secciones estructurales del vehículo automotor. Esta debe quedar firmemente instalada para evitar cualquier tipo de movimiento.
- ✓ Para la instalación de más de un cilindro se deben hacer diseños tomando el grupo de cilindros como una unidad y que distribuyan los esfuerzos en la estructuras del vehículo, por el peso de los cilindros.
- ✓ Los agujeros realizados al vehículo deben ser protegidos contra la corrosión.
- ✓ Los componentes metálicos de la estructuras de sujeción, deben ser revestidas contra la corrosión, se les puede aplicar tratamiento superficial como pintado, cromado, zincado, entre otros.
- ✓ Las estructuras de sujeción no debe tener contacto directo con el o los cilindros.
- ✓ Para evitar el contacto directo, los componentes metálicos de la estructura de sujeción, deben ser aislados en la superficie de contactos con el cilindro, por una banda separación aislante acanalada con materiales elastoméricos.

## **2.2.5. Método de Elementos Finitos**

### *2.2.5.1. Descripción del Método de Elementos Finitos*

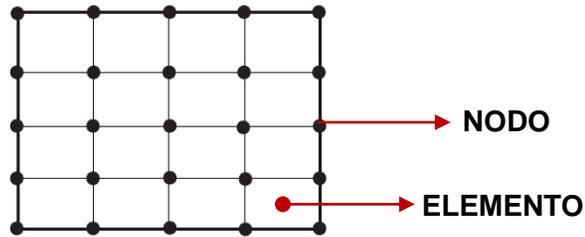
El método de elementos finitos es un método numérico generalmente utilizado para la solución de problemas con alto grado de dificultad, ya que involucran geometrías complejas, propiedades de materiales y cargas no distribuidas. El análisis por elementos finitos es un método computarizado que permite predecir como un objeto real reaccionará a determinados estados de fuerzas, calor, vibración, flujo de fluidos, fenómenos eléctricos y magnéticos, entre otros; en términos generales, permite al usuario conocer si el objeto en estudio fallará o trabajará como fue diseñado.

El concepto básico del análisis con elementos finitos es el dividir el continuo en un número finito de elementos, es decir, discretizar o mallar el continuo y resolver cada uno de los elementos de las ecuaciones del sistema, para luego ensamblar la solución total. Se entiende por discretizar al proceso de modelación de un cuerpo en la división equivalente del mismo, en un sistema conformado por cuerpos más pequeños, a los cuales se les denomina elementos finitos (Ver Figura 2.2).



**Figura 2.2.** Modelación de geometrías con mallado de dominios en el espacio (Liu y Quek, 2003).

Estos elementos están interconectados por medio de puntos comunes llamados nodos, los cuales forman superficies que se comportan como volúmenes de control independiente (Ver Figura 2.3). En el análisis de elementos finitos no se intenta resolver el problema como si fuese una sola pieza, sino por el contrario, se subdivide el elemento en un número finito de elementos que a su vez arrojan resultados individuales que como conclusión se fusionan para generar una sola solución.



**Figura 2.3.** Dominio rectangular mallado por elementos rectangulares (Liu y Quek, 2003).

Dentro de la ingeniería mecánica, las aplicaciones prácticas en la mecánica de sólidos pueden agruparse en dos grandes familias: la de los problemas asociados con sistemas discretos y la de los problemas asociados a sistemas continuos. En los primeros sistemas lo que se analiza está dividido de forma natural, es decir, en elementos claramente definidos. En el segundo caso el sistema no puede ser dividido en forma natural, en unidades simples, por lo que el análisis resulta mucho más complejo; por esta razón es necesario utilizar el método de elemento finito.

El comportamiento mecánico de cada elemento en los que se subdivide el modelo analizado queda definido por un número finito de parámetros llamados grados de libertad, asociados a los puntos que en dicho momento se unen al resto de los elementos de su entorno conocidos como nodos. Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada función de interpolación.

Como puede apreciarse, en el método de elementos finitos son casi esenciales los conceptos de discretización o acción de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado y de interpolación, o

acción de aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos. Por lo tanto, este es un método aproximado desde múltiples perspectivas (Liu y Quek, 2003).

#### *2.2.5.2. Características generales del Método de Elementos Finitos*

Existen dos aspectos generales relacionados al entendimiento y aplicación del método de elementos finitos. El primero se denomina como método de fuerza o flexibilidad, el cual se basa en el uso de fuerzas internas tales como las incógnitas del problema. Para poder obtener las ecuaciones gobernantes anteriormente se tienen que resolver las ecuaciones de equilibrio. Es importante aclarar que las ecuaciones gobernantes son expresadas en términos de desplazamientos nodales usando las ecuaciones de equilibrio en cada nodo, para que se aplique la relación de fuerza y desplazamiento. A continuación es necesario introducir ecuaciones adicionales generadas por las ecuaciones de compatibilidad. Con todo esto se obtendrá el resultado surgido de la unión de todas de las ecuaciones de compatibilidad, y así se podrán determinar las fuerzas internas desconocidas.

El segundo aspecto del método de elemento finito es conocido como el método de desplazamiento o método de rigidez. Su característica principal es que las incógnitas del problema son asumidas a partir de desplazamiento de nodos. También se necesita que los elementos estudiados se interconecten por nodos comunes entre sí, a lo largo de un eje o superficie común, de tal manera que aun después de que se presente la deformación, los nodos permanecerán conectados al nodo común. De esta manera, cada elemento interconectado se liga entre sí, ya sea de manera directa o indirecta a través de interfaces comunes como bordes, nodos y superficies.

Cuando se tienen incógnitas de propiedades de materiales en una estructura en la cual se estudian tanto el esfuerzo como la deformación es posible determinar el comportamiento de un nodo específico en relación a las propiedades de cualquier otro elemento en la estructura.

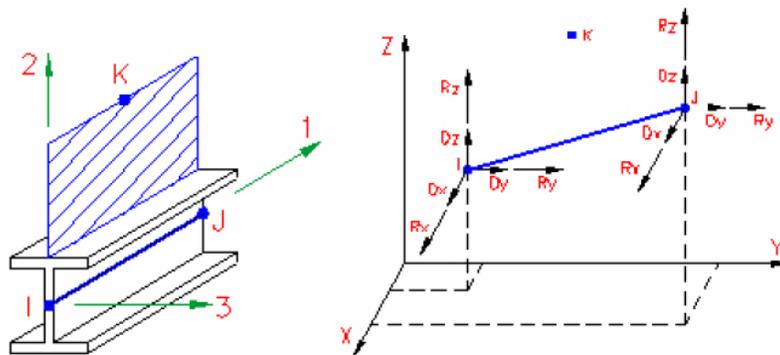
Finalmente al momento de generar el arreglo total de las ecuaciones, es posible describir el comportamiento de cada uno de los nodos en una serie de ecuaciones algebraicas. Para poder tener una mejor comprensión de todo el proceso, las ecuaciones son expresadas en notación matricial lo que ocasiona que su solución se vuelva mucho más sencilla (Seegerlind, 1984).

#### 2.2.5.3. *Tipos de Elementos Finitos*

Los tipos de elementos pueden ser divididos en muy pocos grupos básicos, armazón, membrana, ladrillo, elemento elástico, vigas y placas. Otros tipos de elementos especiales son resortes, masas concentradas, holgura y elementos amortiguados (Rockey, 1983).

- Elemento tipo viga:

Los elementos tipo viga tienen solamente un nodo en cada vértice, pero tienen grados de libertad rotacionales con el fin de transferir momento al igual que las fuerzas. Los seis grados de libertad por nodo para una viga son los tres desplazamientos añadiendo tres rotaciones o inclinaciones (Ver Figura 2.4). Los elementos tipo viga asumen una constante o variación lineal del área seccional transversal.



**Figura 2.4.** Elementos tipo viga con sus grados de libertad (Rockey, 1983).

- Elemento tipo Placa:

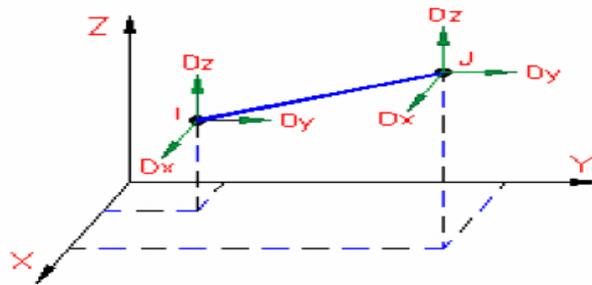
Los elementos tipo placa o cascara también tienen seis grados de libertad por nodo y son una parte contada de los elementos tipo viga. Muchos elementos tipo placa tienen un solo nodo en sus vértices tal que el grosor de la placa debe ser especificado como una constante.

- Elemento Tipo Armadura:

Son elementos de dos nodos que se pueden orientar arbitrariamente en el plano  $x$ ,  $y$  o  $z$ . Estos transmiten únicamente fuerza axial y en general tiene tres grados de libertad de traslación pero no de rotación (Ver Figura 2.5). Este tipo de elementos se utiliza para modelar estructuras como torres, puentes y edificios. Los elementos tridimensionales del tipo de las barras son modelados con área constante y se pueden emplear en el análisis de tipo elástico, no lineal y de grandes desplazamientos geométricos. Y se cumple cuando:

1. La longitud del elemento es mucho mayor que su ancho entre 8 y 10 veces.
2. Está conectado al resto del modelo con uniones que no transmiten momentos.

3. Las fuerzas externas son aplicadas únicamente en los nodos o en las articulaciones.

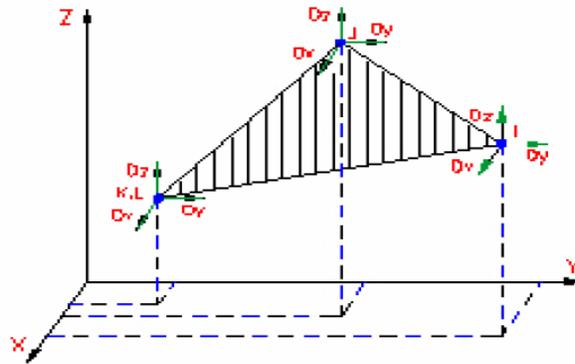


**Figura 2.5.** Representación de los grados de libertad de elemento tipo armadura (Rockey, 1983).

○ Elemento tipo Membrana:

Son elementos formados por tres o cuatro nodos en tres dimensiones. Estos elementos se emplean para modelar objetos como redes o tejidos por ejemplo una lámina de aluminio usada como techo. Son capaces de simular sólidos de un grosor específico que no relevan esfuerzos normales al contorno (Ver Figura 2.6). Al igual que la armadura no tiene grados de libertad rotacionales, pero sí de traslación. Es por eso que solo se emplean cuando:

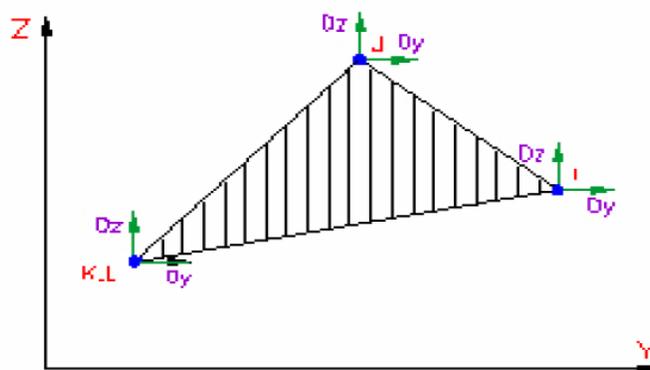
1. El grosor del elemento es más pequeño que su longitud o ancho.
2. El elemento no sufre ninguna tensión normal al plano que lo representa.



**Figura 2.6.** Elemento tipo membrana de forma triangular (Rockey, 1983).

- Elemento elástico Bidimensional:

Son formados por tres o cuatro nodos. Tienen solo 2 grados de libertad de traslación y ninguno de tipo rotacional, y por lo general siempre están al plano YZ (Ver Figura 2.7). Es ideal cuando se desea modelar una sección transversal de un componente y no hay deformaciones en la coordenada X.

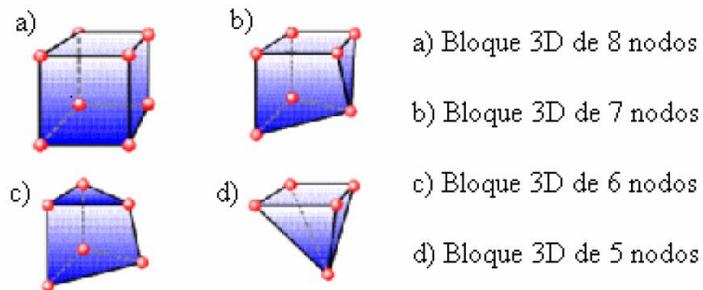


**Figura 2.7.** Elementos tipo elástico bidimensional triangular con sus grados de libertad (Rockey, 1983).

○ Elementos Tipo Ladrillo o Bloque:

Estos elementos poseen seis u ocho nodos que forman caras en un plano tridimensional. Los bloques básicos se emplean para materiales isotrópicos (Ver Figura 2.8). Hay una gama de bloques que van desde los cuatro hasta los ocho nodos y algunos son capaces de incorporar nodos intermedios. Por lo regular son usados cuando:

1. Se desea conocer los esfuerzos colineales al grosor
2. El modelo tiene una fuerza hidrostática aplicada.



**Figura 2.8.** Representación gráfica de un elemento tipo bloque en forma de punto nodales (Rockey, 1983).

# **CAPÍTULO 3**

## *Metodología*

---

### **3.1. Nivel de la investigación**

La presente investigación es de tipo descriptiva, pues plantea una combinación de técnicas experimentales con modelado a través del MEF, para lograr determinar el comportamiento de los esfuerzos y desplazamientos de diversas estructuras de sujeción cuando éstas son sometidas a distintos estados de carga.

### **3.2. Diseño de la investigación**

Con la finalidad de cumplir con cada uno de los objetivos planteados, se estableció una serie de pasos que permitieron alcanzar la conclusión exitosa del trabajo de investigación; estos se presentan a continuación:

#### **3.2.1. Investigación sobre Normas Internacionales**

De acuerdo a las características y funciones de las estructuras de sujeción, se investigó a través de todos los medios posibles (bibliografía, internet, entre

otros) sobre normas internacionales que permitieran avalar el diseño de las estructuras.

### **3.2.2. Selección y obtención de las Normas Internacionales**

Una vez recopilada la información suficiente sobre normas internacionales, se seleccionaron las que mejor se ajustaban a las características y funciones que desarrollan las estructuras.

Las normas seleccionadas son:

- *ISO 15501 “Road vehicles - Compressed natural gas (CNG) fuel systems”.*
- *ANSI-NFPA 52 “Standard on Compressed Natural Gas (CNG) Vehicular Fuel Systems”.*

### **3.2.3. Definición de los parámetros a evaluar**

De acuerdo a lo establecido en las normas seleccionadas, se definieron cada uno de los métodos de evaluación a ser aplicados en las estructuras de sujeción. A continuación se describen cada uno de ellos:

#### *3.2.3.1. Método de Evaluación según ISO 15501*

##### *Consideraciones generales de la norma:*

Durante el ensayo, se debe tener en cuenta que el cilindro debe permanecer fijado al vehículo bajo las siguientes aceleraciones, donde “g” es la aceleración de gravedad:

- a. Para vehículos con un máximo de peso total autorizado de hasta 3,5 toneladas:

- 20g para la aceleración longitudinal delantera.
  - 20g para la aceleración longitudinal posterior.
  - 8g para la aceleración lateral en ambas direcciones.
  - 4,5g para la aceleración vertical ascendente.
- b. Para vehículos con un máximo de peso total autorizado de más de 3,5 toneladas:
- 10g para la aceleración longitudinal delantera.
  - 10g para la aceleración longitudinal posterior.
  - 5g para la aceleración lateral en ambas direcciones.
  - 4,5g para la aceleración vertical ascendente.

En caso de que se instalen varios cilindros en un vehículo, estos deben ser evaluados como una unidad. Cuando los cilindros son instalados en el vehículo, de forma que están anclados por separado, se debe probar cada cilindro individualmente.

Al realizar estas pruebas, los accesorios y la canalización rígida (Tubería metálica que transporta el GNV desde la conexión de llenado hasta el cilindro, y desde éste hasta el regulador) no deben contribuir al refuerzo el montaje del cilindro.

*Prueba Estática:*

La elaboración de esta prueba se puede realizar en un cuerpo del vehículo o una parte del cuerpo del vehículo (Carrocería). El o los cilindros que se evaluarán, debe(n) ser instalados en el vehículo con las especificaciones definitivas de diseño.

El método usado para anclar la estructura al cuerpo del vehículo o parte del cuerpo del vehículo en esta prueba no debe:

- a. Someter los puntos de sujeción y el área de sujeción (círculo del diámetro de 300 mm) a tensiones y/o deformaciones.
- b. Dar lugar al refuerzo de los puntos de sujeción del cilindro o a la estructuras del vehículo que participa en dicha prueba.

La fuerza de tracción a aplicar se define en la ecuación (3.1).

$$F = (M_c + 0,9 * \rho * V) * a \quad \dots(3.1)$$

Dónde:

F: Fuerza de tracción.

$M_c$ : Masa del (los) cilindro(s) vacío en Kg.

V: Volumen del (los) cilindro(s) en litros.

$\rho$ : Densidad del GNV a 20 MPa y 15°C (considerar igual a 0,2kg/l).

a: Aceleración definida en las consideraciones generales de la norma.

Para realizar la prueba estática, se debe aplicar la fuerza de tracción en el centro de gravedad del (los) cilindro(s), por lo menos durante 0,2s, en las direcciones establecidas en las consideraciones generales.

*Criterios de aceptación:*

El(los) cilindro(s) debe(n):

- Seguir atados al cuerpo del vehículo o a la parte del cuerpo del vehículo.

- No interferir con la estructura del asiento.

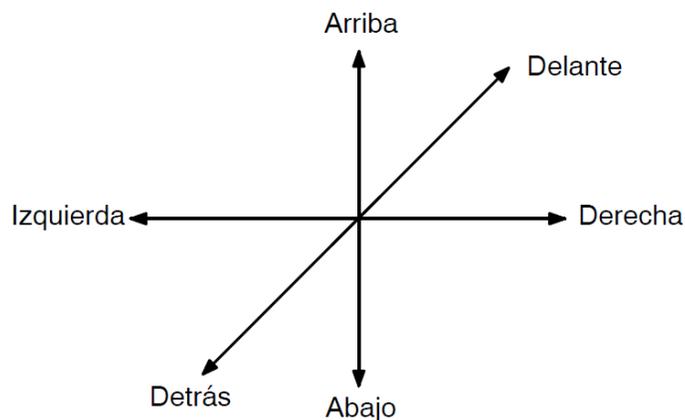
### 3.2.3.2. Método de Evaluación según ANSI – NFPA 52

#### Consideraciones generales de la norma:

La Norma ANSI hace referencia a que la estructura de sujeción debe de estar fijada al cuerpo, piso o chasis del vehículo, para prevenir accidentes ocasionados por deslizamiento, desajustes o rotación, independientemente del peso de (los) cilindro(s).

#### Criterios de aceptación:

Para validar la instalación de la estructura de sujeción, ésta debe tener la capacidad de soportar una fuerza estática de ocho (8) veces el peso del (los) cilindro(s) completamente presurizado (s) con GNV, en cada una de las seis (6) direcciones principales (Ver Figura 3.1). Se tomará como criterio de aceptación, que la estructura de sujeción tenga un desplazamiento máximo de trece (13) milímetros.



**Figura 3.1.** Representación de las direcciones de aplicación de carga sobre cilindros según ANSI – NFPA 52.

### **3.2.4. Investigación y comparación de distintos programas computacionales de simulación**

Partiendo de información disponible en internet, en los antecedentes, entre otros; se reunió la mayor cantidad de información posible referente a los programas computacionales de simulación por elementos finitos. Luego, se definieron las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, para posteriormente ser comparados.

### **3.2.5. Selección del programa computacional**

De acuerdo a las variables que están relacionadas con los métodos de evaluación se seleccionó el programa computacional ABAQUS™ versión 6.9, ya que este es capaz de realizar análisis estáticos considerando no linealidad en las condiciones de borde y en la geometría del modelo a evaluar.

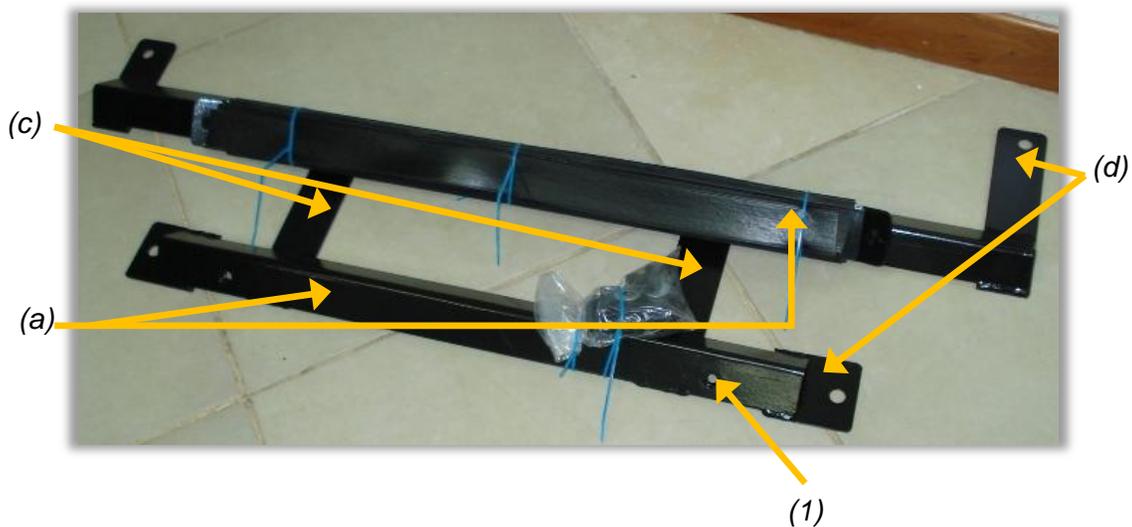
### **3.2.6. Determinación de los modelos de estructuras de sujeción a evaluar**

Durante el proceso de selección de las estructuras de sujeción a estudiar se consideraron aquellos modelos que más se han instalado a nivel nacional, además se tomó en cuenta la disponibilidad de Autogas al momento de suministrar la estructura necesaria para llevar a cabo el ensayo físico; conjuntamente, se consideró el tiempo de procesamiento requerido por el paquete computacional al evaluar cada uno de los modelos respecto al número de condiciones a analizar y la geometría de las estructuras. A continuación se describen cada uno de los modelos evaluados:

#### **3.2.6.1. Estructura de sujeción "A"**

Este tipo de estructura es instalada en la maletera de los vehículos marca KIA, específicamente en los modelos Rio. Está formada por dos ángulos

estructurales (a) que actúan como soporte inferior del cilindro, siendo uno más largo que el otro debido a la geometría de la maletera del vehículo. Estos ángulos poseen dos perforaciones a los lados (1) que permiten fijar los aros por medio de tornillos. La estructura también cuenta con dos pletinas rectangulares (c) que están soldados a los ángulos en su parte inferior, actuando como una placa de refuerzo. En cada extremo de los ángulos igualmente se encuentran unidos unos flejes (d) que permiten fijar la estructura al vehículo por medio de tornillos, tuercas y arandelas especiales (Ver Figura 3.2).

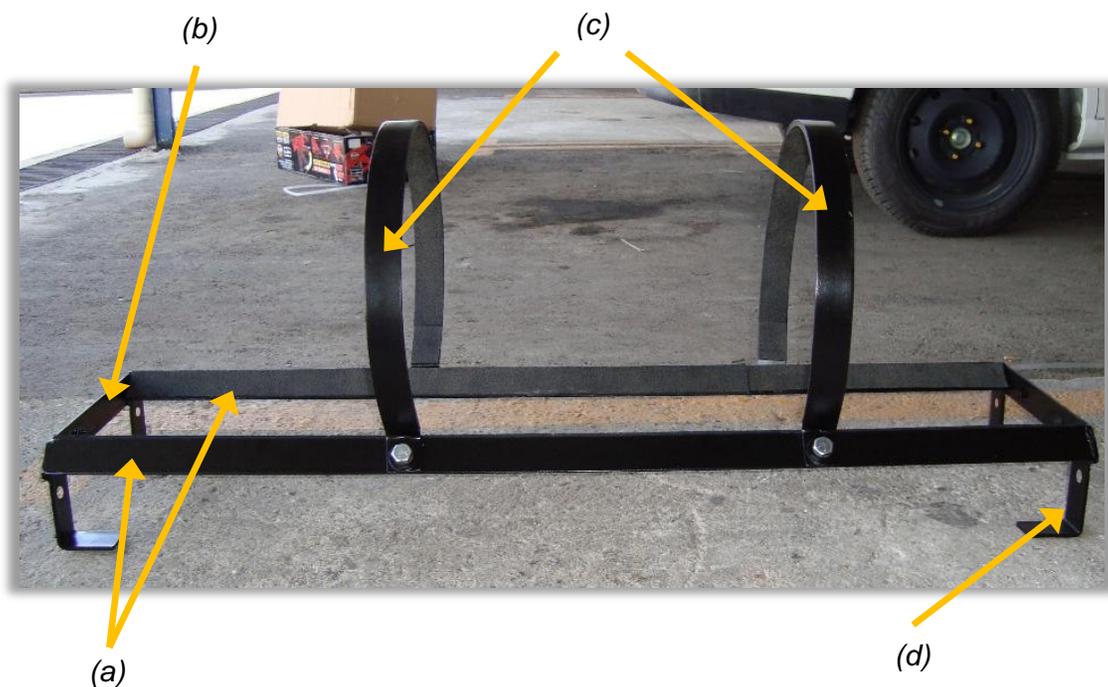


**Figura 3.2.** Estructura de sujeción "A".

### 3.2.6.2. Estructura de sujeción "B"

Se instalan en la maletera de los vehículos marca CHEVROLET, modelo Optra. La conforman dos ángulos estructurales (a) ubicados de forma horizontal, de tal manera que sirvan como soporte del cilindro. Estos ángulos se encuentran unidos en los extremos por una pletina rectangular (b). Los aros (c) funcionan

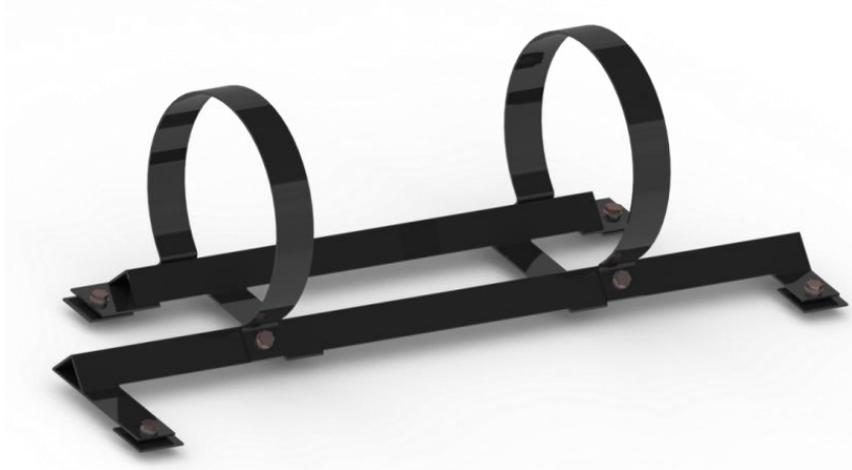
como sujetadores del cilindro y se ajustan por medio de tornillos a cada uno de los ángulos (a). Al otro lado de la pletina (b) se encuentran soldados unos flejes (d) que están doblados en su extremo inferior, los cuales se encargan de actuar como soporte de la estructura de sujeción respecto al piso de la maletera del vehículo. Estos soportes cuentan con una perforación que permite unir la estructura al vehículo por medio de tornillos, tuercas y arandelas especiales (Ver Figura 3.3).



**Figura 3.3.** Estructura de sujeción B.

### **3.2.7. Modelación en CAD de las estructuras de sujeción**

Partiendo de las características geométricas de las estructuras de sujeción, cada uno de los modelos a evaluar fueron representados en el computador a través del programa computacional SolidWorks™ (Ver Figura 3.4 y 3.5).



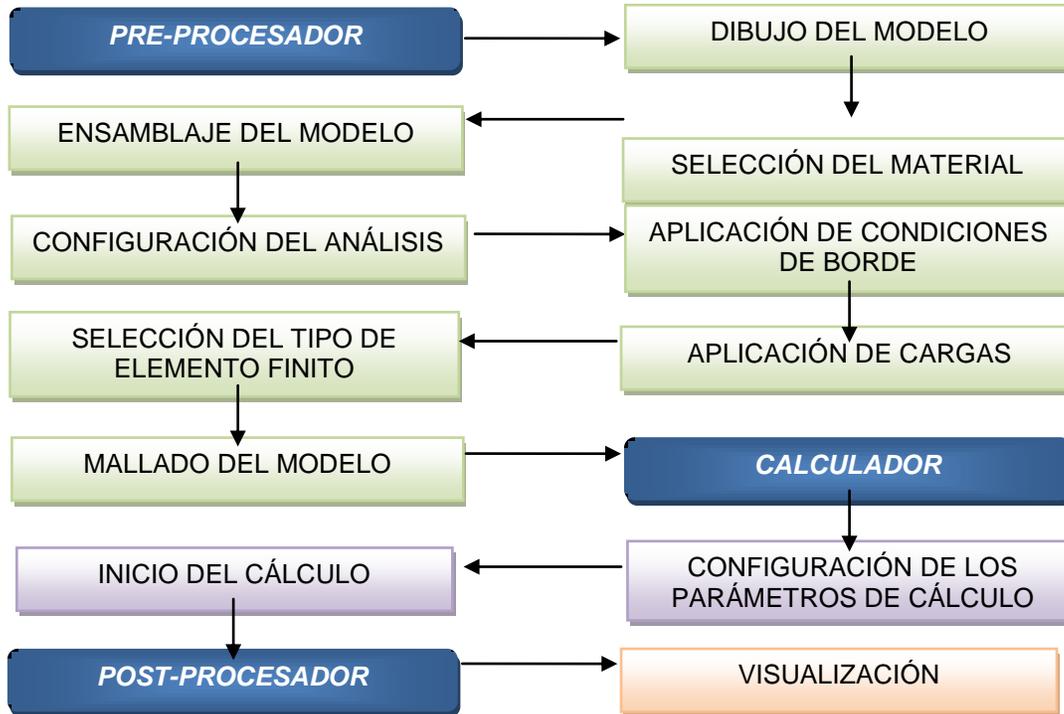
**Figura 3.4.** Representación en CAD de la estructura de sujeción “A”.



**Figura 3.5.** Representación en CAD de la estructura de sujeción “B”.

### **3.2.8. Simulación en el programa computacional**

Para estudiar el modelo propuesto en el programa de análisis de elementos finitos, se emplearon tres módulos de trabajo. En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de operación del programa.



**Figura 3.6.** Diagrama de operación del programa ABAQUS™.

### 3.2.8.1. Pre-procesador

En este módulo se prepararon los modelos para el cálculo numérico; allí se realizaron las siguientes operaciones:

a. *Dibujo del modelo:*

Una vez creado cada uno de los modelos de estructuras de sujeción en el programa SolidWorks™, estos fueron exportados a ABAQUS™ en archivo .SAT. Cabe resaltar que durante el análisis no se iba a considerar la deformación del cuerpo del vehículo y del cilindro de almacenamiento de GNV el cual sujeta la estructura, por ello, en el programa computacional ABAQUS™ estos componentes fueron modelados como un cuerpo rígido.

b. *Selección del material:*

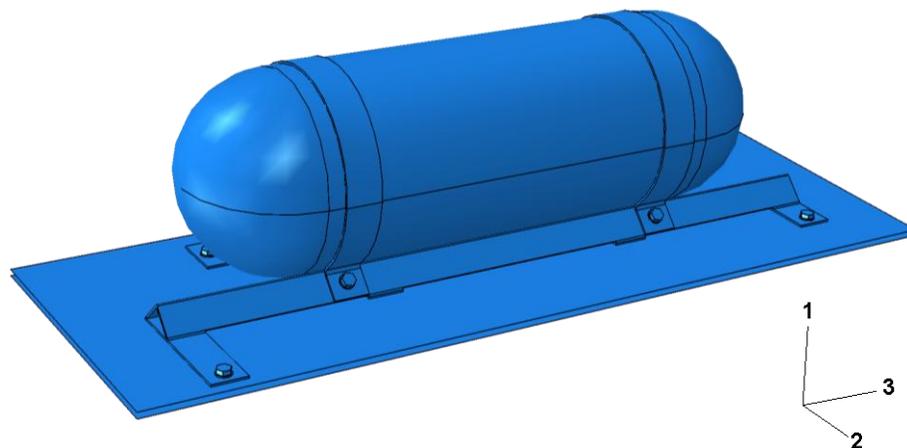
Para el desarrollo de este trabajo se definieron las propiedades de cada uno de los componentes considerando el comportamiento elástico lineal del acero AISI-SAE 1020 Laminado. En la Tabla 3.1 se muestran las propiedades usadas en la simulación.

**Tabla 3.1.** Propiedades del material usadas en el programa computacional.

Módulo de Young (MPa)	Módulo de Poisson	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
210.000	0,29	7.900

c. *Ensamblaje del modelo:*

Cada una de las partes que conforman los modelos se encuentra orientada en su propio sistema coordenado y son independientes de las otras. En este paso se especificó la geometría del conjunto completo, relacionando cada una de las partes del ensamblaje en un sistema global de coordenadas (Ver Figura 3.7).



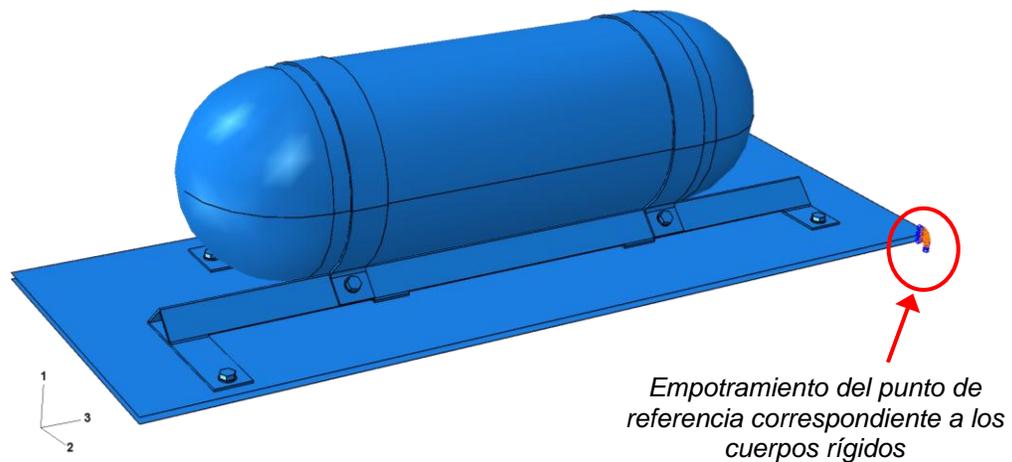
**Figura 3.7.** Ensamblaje de la estructura de sujeción “A” relacionado al sistema de coordenadas del programa computacional ABAQUS™.

d. *Configuración del análisis:*

Para llevar a cabo el procesamiento de datos en el programa computacional fue necesario definir una serie de pasos, los cuales estarán asociados a las condiciones de borde aplicadas a cada modelo. Para ello, ABAQUS™ genera un paso inicial automáticamente, en donde se definen las restricciones de movimiento. Adicionalmente, se creó un paso para definir las relaciones de contacto en el cálculo, y otro relacionado a la aplicación de la carga en el modelo. El estado de la estructura al final de un paso provee las condiciones iniciales para el próximo paso del análisis, obteniéndose fácilmente simulaciones consecutivas de condiciones de cargas para un modelo.

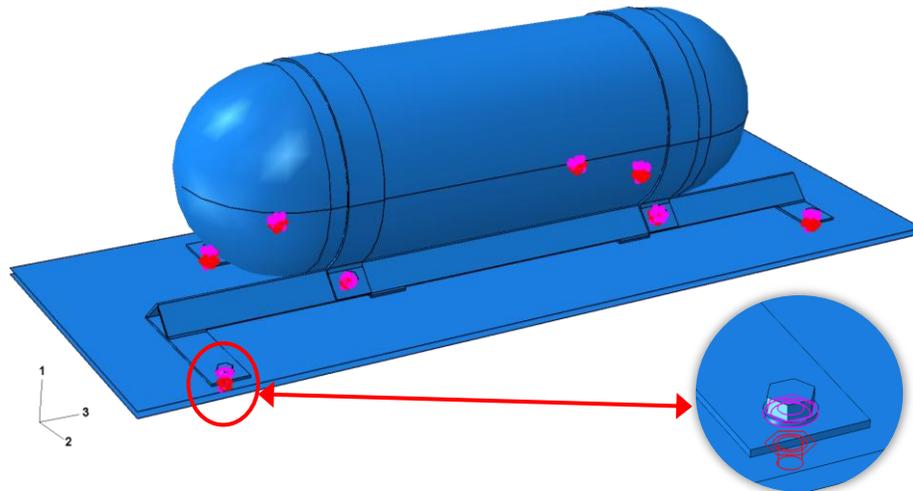
e. *Definición de las condiciones de borde:*

En esta etapa se designan las restricciones que deben poseer los modelos evaluados para cada uno de los pasos ya definidos. Las estructuras de sujeción fueron fijadas mediante un empotramiento (completamente restringidas, sin ningún grado de libertad de movimiento), específicamente en las piezas que simulan la carrocería o cuerpo del vehículo (Ver Figura 3.8).



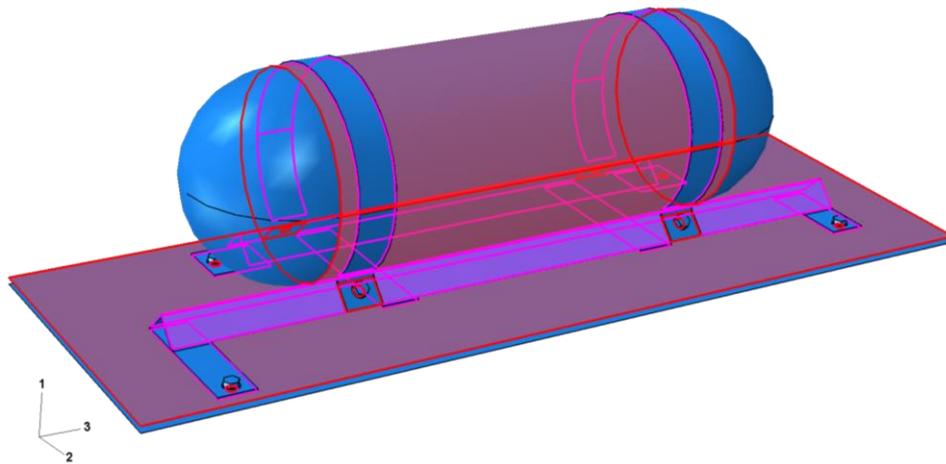
**Figura 3.8.** Aplicación de empotramientos en la estructura de sujeción "A".

También se definieron interacciones de contacto de tipo *superficie-a-superficie* con una propiedad denominada *atadura*, la cual permite fijar los nodos de una pieza a los nodos de otra. Este tipo de interacción fue aplicada a los contactos asociados a tornillo-tuerca-arandela, de tal manera de poder simular el apriete generado por los mismos (Ver Figura 3.9).



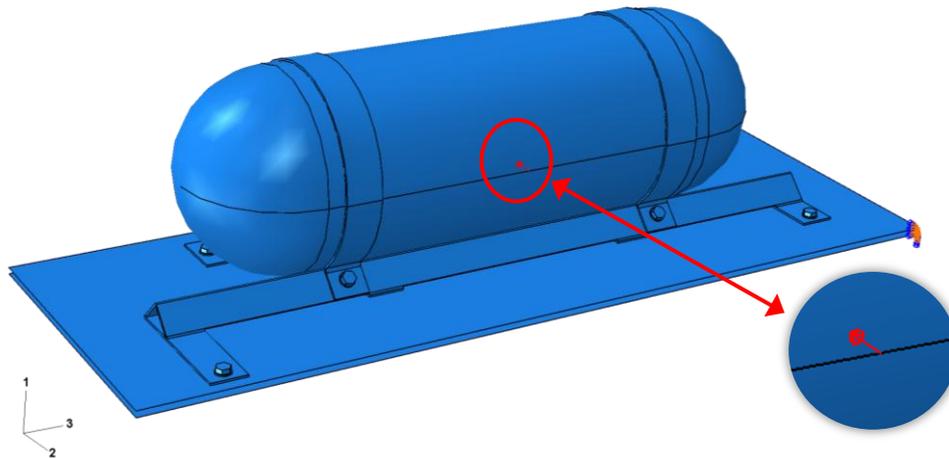
**Figura 3.9.** Aplicación de contactos tipo *atadura* en la estructura de sujeción “A”.

Luego, para garantizar un buen ensamblaje del sistema y la correcta transmisión de carga en cada uno de los modelos, fueron asignadas interacciones de tipo *superficie-a-superficie* con propiedades de contacto tangencial y normal, específicamente en las caras externas de los elementos que pueden separarse de la zona de contacto durante la aplicación de la carga (Ver Figura 3.10). En el caso del contacto tangencial, se implementó la propiedad denominada *en bruto*, la cual crea un coeficiente de fricción infinito entre las partes que están en contacto, para así de igual manera simular el apriete generado por los tornillos sobre los distintos elementos del ensamblaje.



**Figura 3.10.** Aplicación de contactos tangencial-normal en la estructura de sujeción “A”.

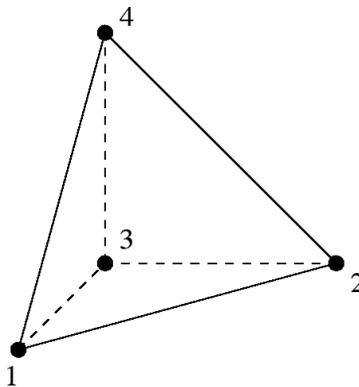
Finalmente, se aplicaron cargas puntuales a los modelos según las especificaciones establecidas en los puntos 3.2.3.1 y 3.2.3.2 (Ver Figura 3.11).



**Figura 3.11.** Aplicación de carga puntual longitudinal en el cilindro de la estructura de sujeción “A”.

f. *Selección del tipo de elemento finito:*

Dadas las características geométricas de los modelos de estructuras de sujeción a evaluar, se emplearon elementos tetraédricos C3D4 (Ver Figura 3.12). Este es un elemento sólido 3-D continuo para esfuerzos y desplazamientos que lo hace apropiado para el mallado de modelos irregulares. Está definido por cuatro nodos ubicados en los vértices del elemento; estos poseen tres grados de libertad en cada nodo y son de orden lineal, por lo cual admite la formulación de materiales con plasticidad, endurecimiento, fluencia y capacidad de grandes deformaciones, además su figuración tetraédrica le permite adaptarse a la geometría de modelos complejos (ABAQUS™).



**Figura 3.12.** Elemento finito C3D4.

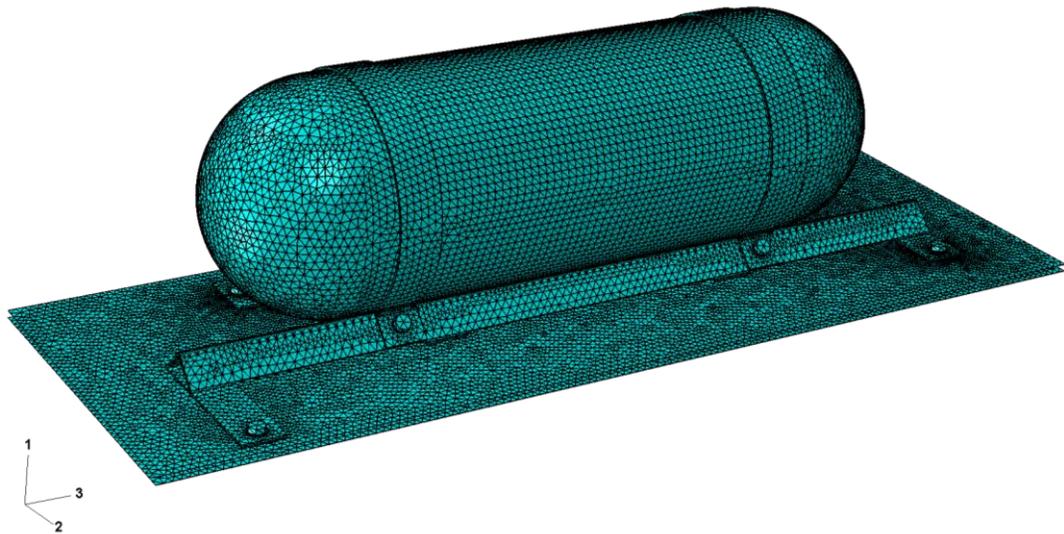
g. *Mallado del modelo:*

La densidad del mallado (Ver Figura 3.13) fue definida por la curva de convergencia. Para ello se realizaron varias discretizaciones del modelo donde se va reduciendo el tamaño del elemento de manera progresiva, obteniendo valores de esfuerzos y desplazamientos para cada mallado, con ello se elabora la curva de convergencia y se observa el valor del número

de elementos para el cual la curva comienza a presentar un comportamiento asintótico. Para cada valor obtenido se realiza un análisis de sensibilidad, en el cual se emplea la ecuación 3.2.

$$E = \frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{\sigma_{n-1}} * 100 \quad \dots(3.2)$$

Donde  $\sigma_n$  representa el valor del esfuerzo o desplazamiento obtenido, y  $\sigma_{n-1}$  el valor obtenido en el mallado anterior. De esta manera se obtienen los errores porcentuales entre las distintas discretizaciones, permitiendo así definir de manera más precisa la convergencia del modelo analizado.



**Figura 3.13.** Representación de un mallado de la estructura de sujeción “A”.

### 3.2.8.2. *Calculador*

El programa realiza todo el cálculo del MEF y genera las soluciones. Los pasos a seguir en este módulo de trabajo son los siguientes:

a. *Configuración de los parámetros de cálculo:*

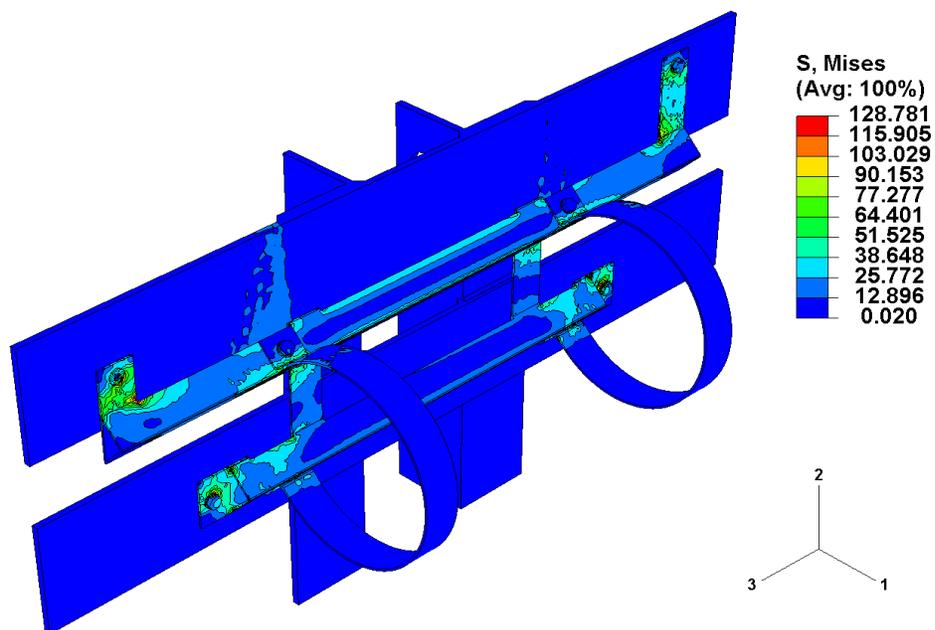
Se seleccionaron los intervalos de tiempo y número de iteraciones necesarias para ejecutar el cálculo.

b. *Inicio de cálculo:*

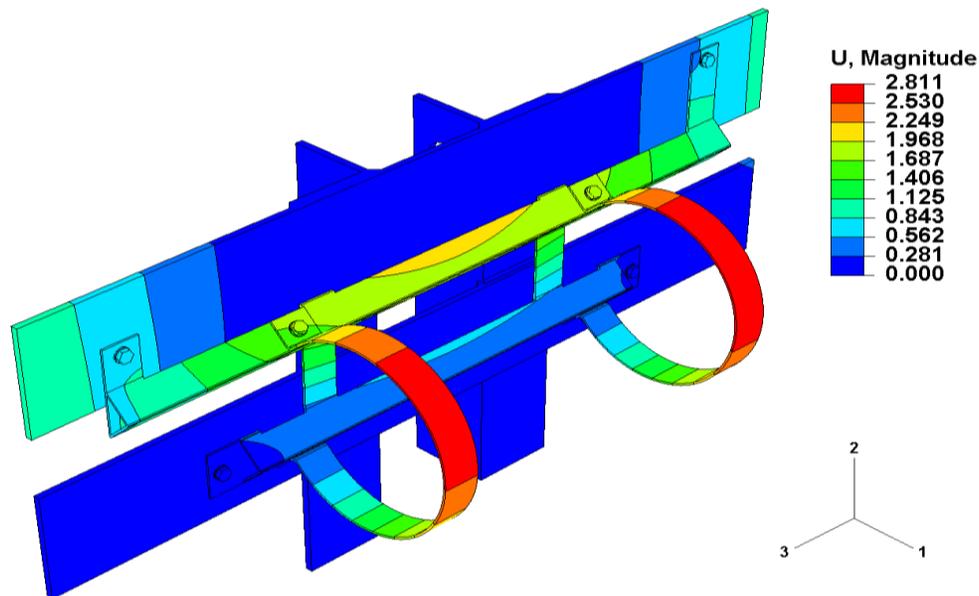
Durante este paso el programa transfiere las cargas al modelo, genera las matrices, realiza la triangulación de las mismas, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución.

3.2.8.3. *Post-procesador*

Esta herramienta permite representar gráficamente los resultados obtenidos; mostrando los valores de esfuerzos y desplazamientos en un orden asociado a una escala de colores generados en toda la geometría estudiada (Ver Figuras 3.14 y 3.15).



**Figura 3.14.** Visualización de esfuerzos de Von Mises en el programa computacional ABAQUS™ (Unidades en MPa).



**Figura 3.15.** Visualización de desplazamientos en el programa computacional ABAQUS™ (Unidades en mm).

### 3.2.9. Realización de Ensayo Físico

Para la realización del ensayo se ejecutaron los siguientes pasos:

1. *Definición de la carga a aplicar:*

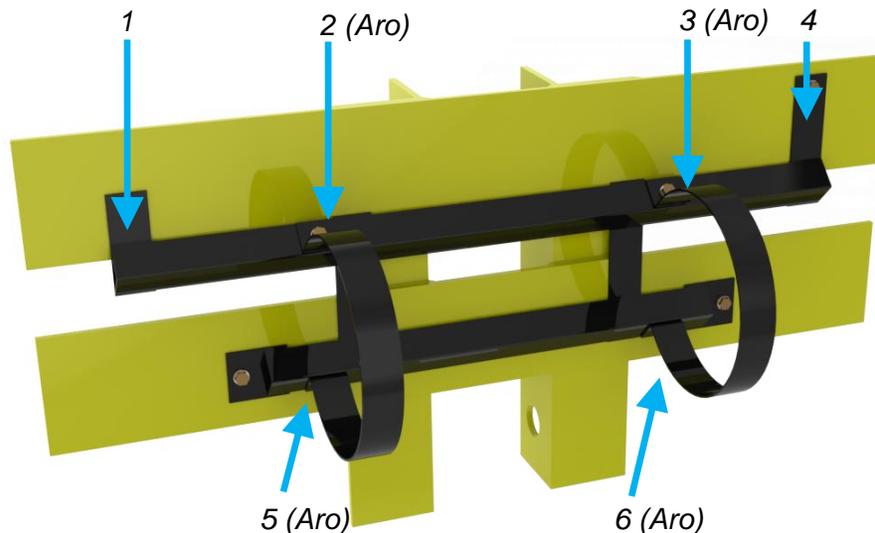
Para poder registrar los esfuerzos generados en la estructura de sujeción durante el ensayo físico, se utilizaron galgas extensométricas. Estos instrumentos generan errores de medición cuando el esfuerzo generado lleva a la galga fuera del margen elástico. Por esta razón, antes de ejecutar el ensayo, fue necesario conocer las cargas que podían ser aplicadas a la estructura sin afectar el proceso de medición. Para ello, se realizó un análisis del montaje por medio del programa computacional ABAQUS™, en el cual se fueron aplicando distintas cargas al modelo hasta que se determinaron aquellas que garantizaban el buen funcionamiento de los dispositivos de medición (Ver Tabla 3.2).

**Tabla 3.2.** Cargas a aplicar durante el ensayo físico.

Cargas a aplicar para toma de datos (N)	
1.170	2.340

2. *Definición de los puntos de estudio:*

El análisis antes mencionado también permitió definir la ubicación de los puntos de estudio en la estructura ensayada, ya que se logró observar cuales eran las distintas zonas que estaban sometidos a un mayor esfuerzo durante la aplicación de la carga (Ver Figura 3.14 y 3.16).



**Figura 3.16.** Ubicación de los puntos de estudio en la estructura durante el ensayo.

3. *Definición del equipo a utilizar:*

De acuerdo a las condiciones a las cuales se debía someter la estructura de sujeción durante el ensayo, se realizó la búsqueda del equipo adecuado que permitiera realizar dicha evaluación. El mecanismo seleccionado fue la prensa hidráulica que se encuentra en el laboratorio de proceso de

fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo (Ver Figura 3.17), ya que ésta ofrecía la capacidad de carga requerida y las dimensiones adecuadas para poder ajustar la estructura de sujeción a la misma.



**Figura 3.17.** Prensa hidráulica utilizada para realizar el ensayo físico.

4. *Elaboración del sujetador de la estructura de sujeción:*

Se fabricó un sujetador que permitiera fijar la estructura de sujeción en la prensa hidráulica, de tal manera que simulara el cuerpo del vehículo

durante el ensayo. Este sujetador se construyó a partir de vigas perfil H y ángulos estructurales. Las piezas fueron unidas por medio de soldadura de arco eléctrico, con electrodos E6013 (Ver Figura 3.18).



**Figura 3.18.** Sujetador de la estructura de sujeción.

5. *Montaje del ensayo:*

Para determinar acertadamente los esfuerzos normales presentes en cada uno de los puntos de estudio, se utilizaron galgas extensométricas (Ver Figura 3.19). Estas son capaces de censar de forma precisa las pequeñas deformaciones que se producen en los puntos de estudio durante la aplicación de la carga. La técnica seguida para la adhesión e instalación de galgas puede observarse en el APÉNDICE A. Posteriormente se colocó el sujetador en la columna de la prensa hidráulica, para luego fijar la estructura con el cilindro. Se procedió a aplicar las dos condiciones de carga por separado (Ver Tabla 3.2).



*Punto de estudio 1*



*Punto de estudio 2*



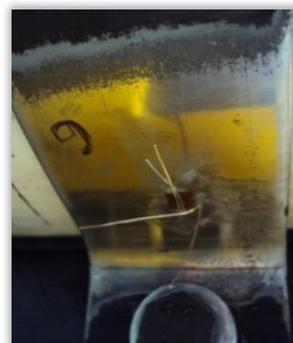
*Punto de estudio 3*



*Punto de estudio 4*



*Punto de estudio 5*



*Punto de estudio 6*

**Figura 3.19.** Ubicación de las galgas para cada punto de estudio.

6. *Recolección de datos:*

Las galgas extensométricas convierten las deformaciones en señales eléctricas, debido a que su resistencia eléctrica varía en función de pequeños cambios de longitud. Estas variaciones de resistencia eléctrica fueron digitalizadas mediante un transductor Analógico-Digital Marca: MCC, Modelo: USB-2404-UI (Ver Figura 3.20), el cual permitió realizar el registro de las mismas en un ordenador (Ver Figura 3.21).



**Figura 3.20.** Transductor Análogo-Digital MCC USB-2404-UI.



**Figura 3.21.** Montaje del transductor Análogo-Digital MCC USB-2404-UI.

6. *Conversión de datos:*

Habiéndose ya obtenido los valores de resistencia de las galgas antes y durante la aplicación de las cargas, se procedió a calcular las variaciones de resistencia generadas según la ecuación 3.3.

$$\Delta R = R_f - R_i \quad \dots(3.3)$$

Dónde:

$\Delta R$  = Variación de resistencia ( $\Omega$ ).

$R_f$  = Resistencia después de aplicar la carga ( $\Omega$ ).

$R_i$  = Resistencia antes de aplicar la carga ( $\Omega$ ).

Ya obtenidas las variaciones de resistencia, bastó con aplicar la ecuación 3.4 para obtener los esfuerzos normales que se presentaron en cada uno de los puntos de estudio durante la aplicación de las cargas.

$$\sigma_n = \frac{\Delta R}{R_i \times K_s} \times E \quad \dots(3.4)$$

Dónde:

$\sigma_n$  = Esfuerzo normal, depende de la dirección de medición de la galga (MPa).

$\Delta R$  = Variación de resistencia ( $\Omega$ ).

$R_i$  = Resistencia antes de aplicar la carga ( $\Omega$ ).

$K_s$  = Factor de la galga.

$E$  = Módulo de elasticidad del material utilizado (MPa).

### **3.2.10. Comparar resultados obtenidos**

Se compararon los resultados obtenidos en la simulación de elementos finitos con respecto a los logrados experimentalmente; de esta manera se verificó que tan exacto es el modelo con relación a los resultados logrados en la realidad.

### **3.2.11. Elaborar especificaciones con las que se pueda desarrollar un manual que describa las características de un diseño óptimo y confiable de los sistemas de sujeción**

Partiendo de los resultados obtenidos en las simulaciones, se establecieron una serie de características que describen un diseño más específico y concreto de cada uno de los modelos de estructuras de sujeción evaluados.



# **CAPÍTULO 4**

## *Resultados*

---

En este capítulo se presentan los resultados numéricos obtenidos durante la evaluación de las estructuras de sujeción, razonados en un procedimiento de análisis por el método de elementos finitos. Además, se muestran los esfuerzos normales obtenidos en el ensayo físico para cada uno de los puntos de estudio previamente definidos.

### **4.1. Validación del Programa Computacional**

Con el objetivo de validar el programa computacional utilizado en la investigación, se realizó la simulación de los distintos estados de cargas a los cuales fue sometida la estructura de sujeción “A” durante la ejecución del ensayo físico. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

#### **4.1.1. Simulación de Ensayo Físico**

Como se indicó en el capítulo anterior, durante el ensayo físico se ejecutaron dos condiciones de carga (Ver Tabla 3.2).

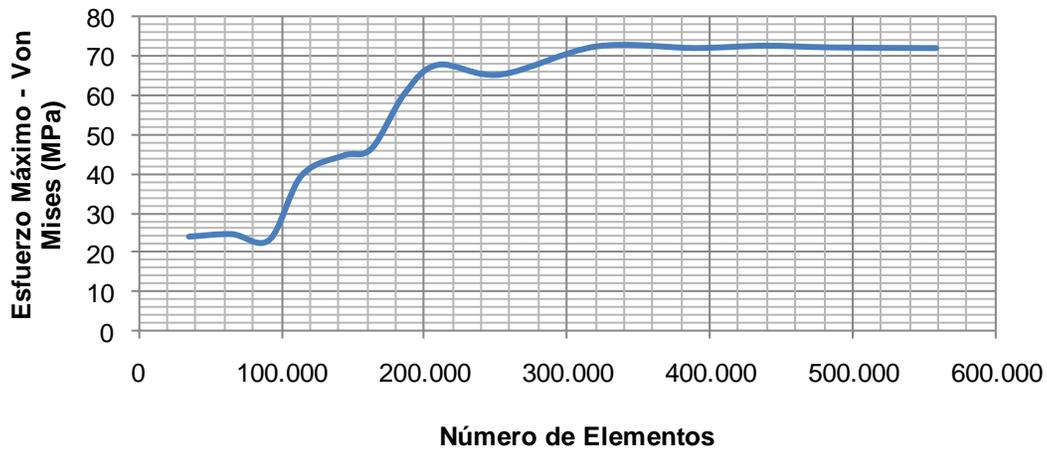
#### 4.1.1.1. Aplicación de 1.170 N.

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad del modelo, para ello se emplea la ecuación 3.2 (Ver Tabla 4.1).

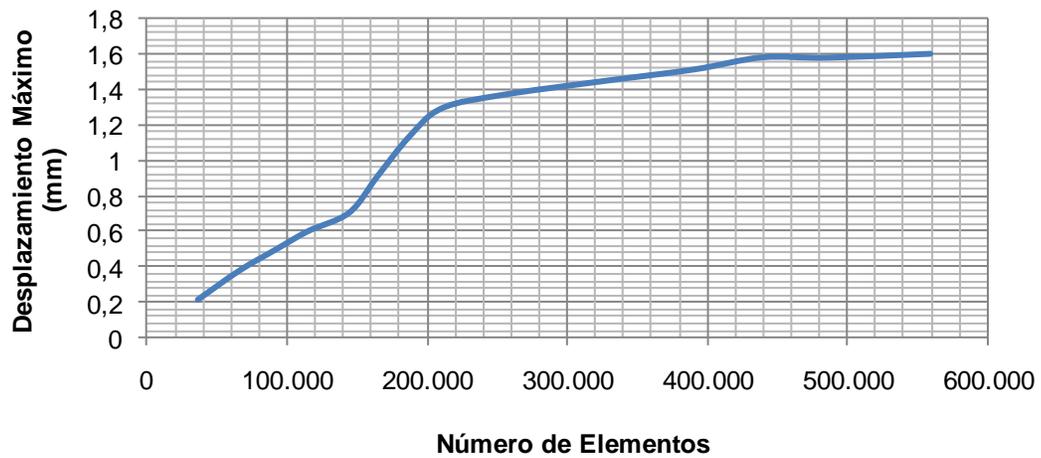
**Tabla 4.1.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga de 1.170 N.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
35.777	24,149	--	0,215	--
65.566	24,791	2,690	0,379	76,279
92.068	23,350	-5,810	0,500	31,926
114.613	39,639	69,760	0,601	20,200
143.980	44,689	12,730	0,705	17,304
163.673	46,491	4,030	0,905	28,368
186.929	60,498	30,120	1,134	25,303
210.198	67,673	11,850	1,293	14,021
253.733	65,189	-3,670	1,368	5,800
321.145	72,330	10,950	1,441	5,336
390.182	71,920	-0,570	1,511	4,857
438.778	72,510	0,820	1,579	4,500
484.656	72,080	-0,590	1,577	-0,126
558.841	71,898	-0,250	1,599	1,395

Gráficamente, la convergencia del modelo para distintos mallados se observa en la Figura 4.1 y 4.2.



**Figura 4.1.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos para la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga de 1.170 N.

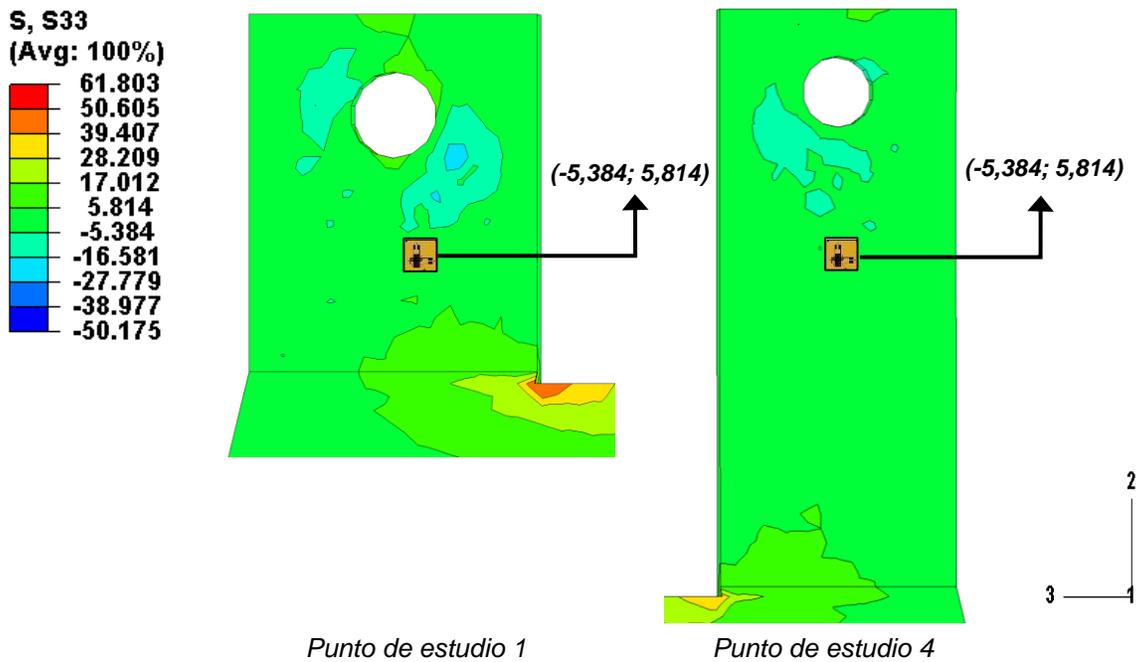


**Figura 4.2.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos para la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga de 1.170 N.

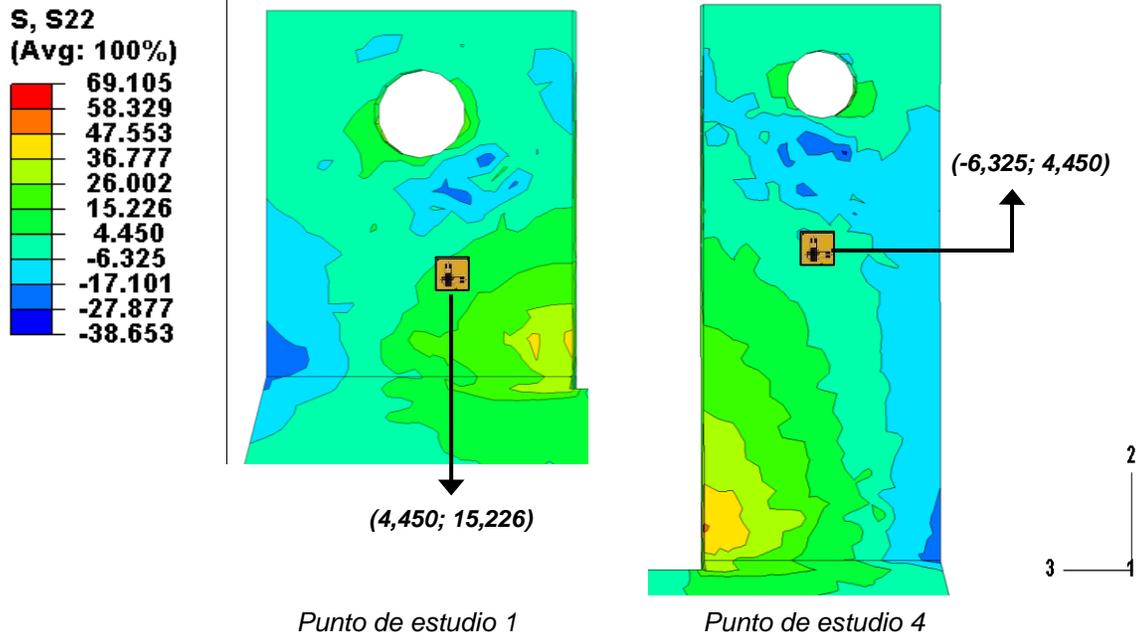
En este caso, el resultado numérico converge para una malla de 558.841 elementos, con lo que se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx. V.M.}} = 71,898 \text{ MPa}$  y

$D_{M\acute{a}x} = 1,599 \text{ mm}$ , presentando un error de 0,250% y 1,395% respectivamente, lo cual se considera una muy buena aproximación en el análisis de MEF.

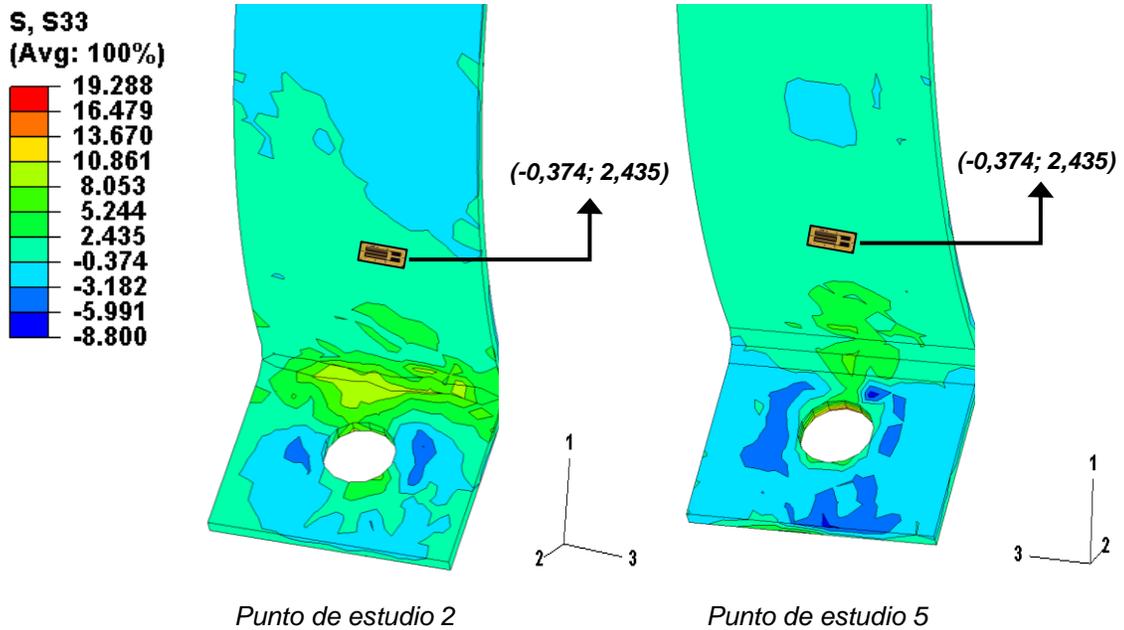
Para poder comparar los resultados numéricos con los experimentales, se presentan las Figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, en las cuales se observa la distribución de esfuerzos normales obtenidos en la simulación de la estructura para cada punto de estudio durante la aplicación de la carga.



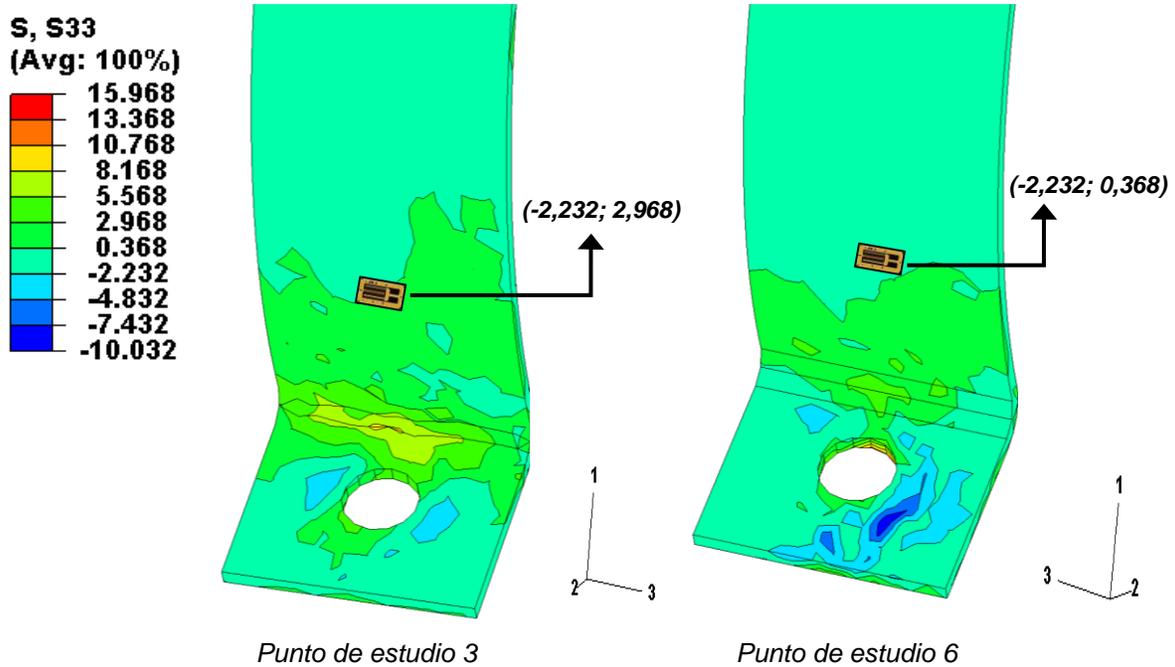
**Figura 4.3.** Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 1 y 4 durante la aplicación de la carga de 1.170 N.



**Figura 4.4.** Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 2 para los puntos de estudio 1 y 4 durante la aplicación de la carga de 1.170 N.



**Figura 4.5.** Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 2 y 5 durante la aplicación de la carga de 1.170 N.



**Figura 4.6.** Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 3 y 6 durante la aplicación de la carga de 1.170 N.

#### 4.1.1.2. Aplicación de 2.340 N.

Igualmente se realiza un análisis de sensibilidad del modelo a partir de la ecuación 3.2 (Ver Tabla 4.2).

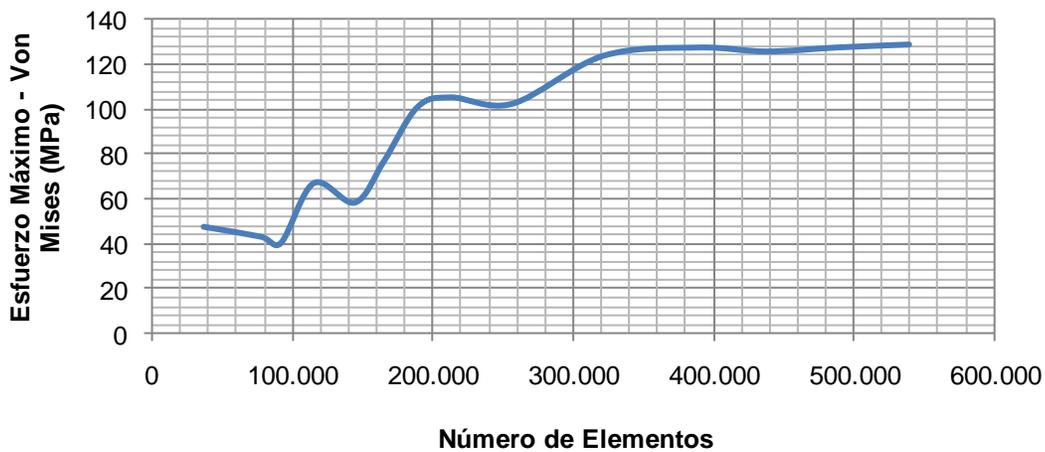
**Tabla 4.2.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga de 2.340 N.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
36.580	47,327	---	0,390	--
77.275	42,915	-9,322	0,671	72,051
91.727	40,132	-6,484	0,835	24,441
115.119	66,848	66,570	1,005	20,359
144.470	58,164	-12,990	1,153	14,726

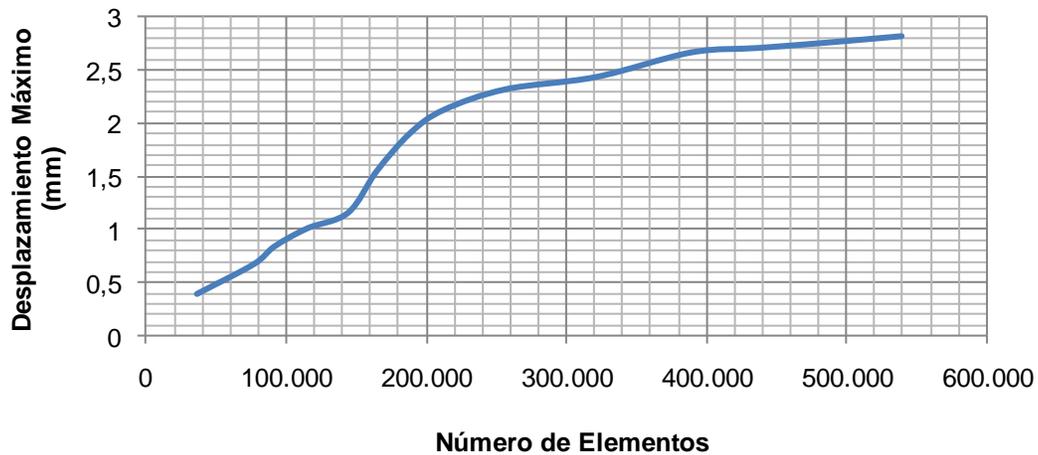
Continuación Tabla 4.2.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
165.003	76,537	31,588	1,546	34,084
188.858	100,738	31,620	1,902	23,027
212.566	105,156	4,385	2,118	11,356
256.661	102,310	-2,706	2,312	9,159
321.492	123,727	20,933	2,428	5,017
389.088	127,432	2,994	2,658	9,472
437.701	125,653	-1,396	2,701	1,617
488.196	127,450	1,430	2,753	1,925
539.416	128,781	1,044	2,811	2,106

Gráficamente, la convergencia del modelo para distintos mallados se observa en la Figura 4.7 y 4.8.



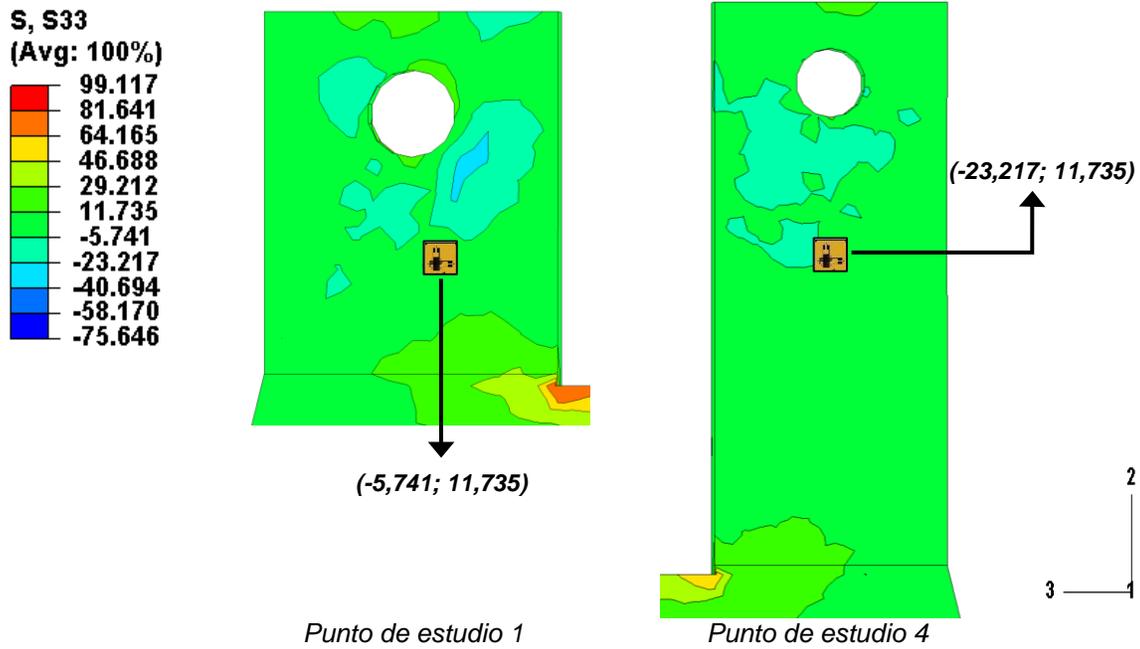
**Figura 4.7.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos para la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga de 2.340 N.



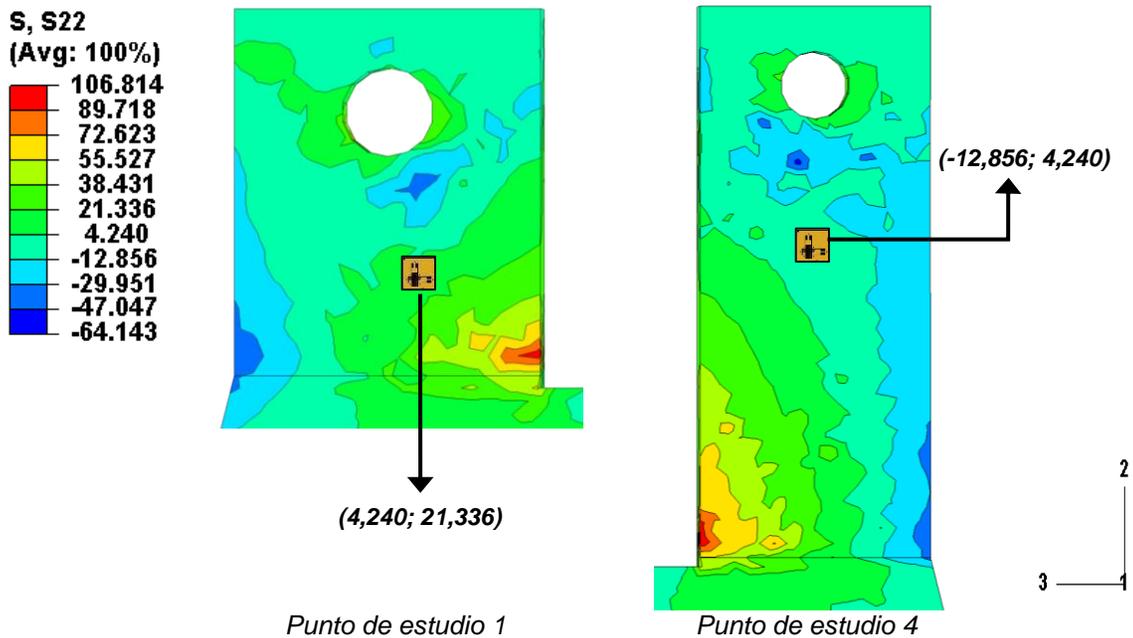
**Figura 4.8.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos para la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga de 2.340 N.

Para este caso, el resultado numérico converge para una malla de 539.416 elementos, donde se obtiene un valor de  $\sigma_{M\acute{a}x. V.M.} = 128,781$  MPa y  $D_{M\acute{a}x} = 2,811$  mm, con un error de 1,044% y 2,106% respectivamente, lo cual se considera una muy buena aproximación en el análisis de MEF.

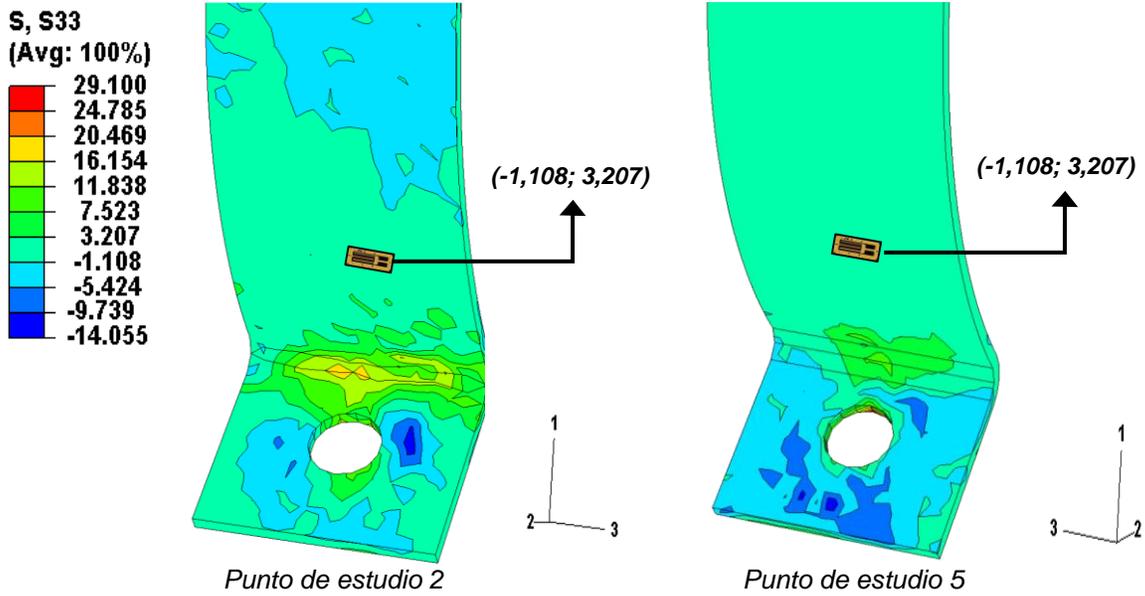
En las Figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 se presenta la distribución de esfuerzos normales obtenidos para cada uno de los puntos de estudio cuando es aplicada la carga en cuestión.



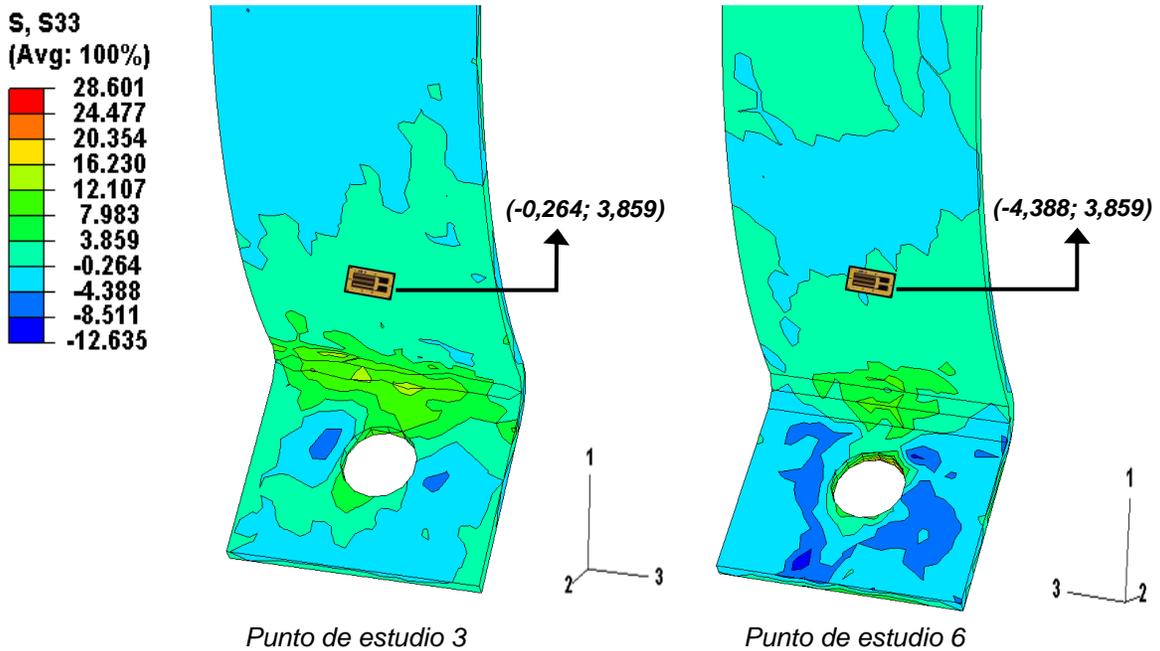
**Figura 4.9.** Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 1 y 4 durante la aplicación de la carga de 2.340 N.



**Figura 4.10.** Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 2 para los puntos de estudio 1 y 4 durante la aplicación de la carga de 2.340 N.



**Figura 4.11.** Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 2 y 5 durante la aplicación de la carga de 2.340 N.



**Figura 4.12.** Distribución de esfuerzos normales en la dirección del eje coordenado 3 para los puntos de estudio 3 y 6 durante la aplicación de la carga de 2.340 N.

#### 4.1.2. Ensayo Físico

En esta sección se muestran los esfuerzos normales obtenidos en cada punto de estudio de acuerdo a las condiciones de carga aplicada durante el ensayo físico.

##### 4.1.2.1. Resistencia eléctrica en galgas extensométricas.

Luego de instalar las galgas extensométricas en los distintos puntos de estudio de la estructura de sujeción, se registraron los valores de resistencia para cada una de ellos. Estos valores se observan en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3.** Valores de resistencia registrados por las galgas extensométricas para cada punto de estudio y condición de carga ensayada.

<b>Resistencia antes de la aplicación de la carga (<math>\Omega</math>)</b>		
<b>Punto de estudio</b>	<b>Eje coordenado 2</b>	<b>Eje coordenado 3</b>
1	120,500815	119,515898
2	--	120,231764
3	--	119,959939
4	119,819101	120,076604
5	--	119,971172
6	--	119,873993

<b>Resistencia durante la aplicación de 1.170 N de carga (<math>\Omega</math>)</b>		
<b>Punto de estudio</b>	<b>Eje coordenado 2</b>	<b>Eje coordenado 3</b>
1	120,505206	119,514868
2	--	120,232222
3	--	119,961072
4	119,812619	120,064786
5	--	119,969939
6	--	119,871629

Continuación Tabla 4.3.

<b>Resistencia durante la aplicación de 2.340 N de carga (<math>\Omega</math>)</b>		
<b>Punto de estudio</b>	<b>Eje coordenado 2</b>	<b>Eje coordenado 3</b>
1	120,509001	119,512401
2	--	120,234341
3	--	119,963167
4	119,802520	120,049120
5	--	119,968693
6	--	119,869984

#### 4.1.2.2. Variación de resistencia eléctrica.

Haciendo uso de la ecuación 3.3 se obtienen los valores correspondientes a la variación de resistencia eléctrica (Ver Tabla 4.4).

**Tabla 4.4.** Variación de resistencia asociada a cada punto de estudio y carga aplicada.

<b><math>\Delta R</math> para la aplicación de 1.170 N de carga (<math>\Omega</math>)</b>		
<b>Punto de estudio</b>	<b>Eje coordenado 2</b>	<b>Eje coordenado 3</b>
1	0,004391	-0,001030
2	--	0,000458
3	--	0,001133
4	-0,006482	-0,011818
5	--	-0,001233
6	--	-0,002364
<b><math>\Delta R</math> para la aplicación de 2.340 N de carga (<math>\Omega</math>)</b>		
<b>Punto de estudio</b>	<b>Eje coordenado 2</b>	<b>Eje coordenado 3</b>
1	0,008186	-0,003497
2	--	0,002577
3	--	0,003228
4	-0,016581	-0,027484
5	--	-0,002479
6	--	-0,004009

#### 4.1.2.3. Esfuerzos normales para cada punto de estudio.

Los esfuerzos normales generados en la estructura debido a la aplicación de las cargas, se determinaron a partir la ecuación 3.4. Se considera que el factor de galga  $K_s = 2$  (Dato suministrado por el fabricante). Los valores de esfuerzos obtenidos para los diferentes puntos de estudios se muestran en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5.** Esfuerzos normales generados en los puntos de estudio para cada condición de carga evaluada.

<b>Esfuerzo Normal para la aplicación de 1.170 N de carga (MPa)</b>		
<b>Punto de estudio</b>	<b>Eje coordenado 2</b>	<b>Eje coordenado 3</b>
1	3,826	-0,905
2	--	0,400
3	--	0,992
4	-5,680	-10,334
5	--	-1,079
6	--	-2,071
<b>Esfuerzo Normal para la aplicación de 2.340 N de carga (MPa)</b>		
<b>Punto de estudio</b>	<b>Eje coordenado 2</b>	<b>Eje coordenado 3</b>
1	7,133	-3,072
2	--	2,251
3	--	2,825
4	-14,530	-24,033
5	--	-2,170
6	--	-3,512

## 4.2. Simulaciones

Las estructuras de sujeción a evaluar están diseñadas para sujetar cilindros de 40L; por lo tanto, de acuerdo a las características descritas en la Tabla 2.2 y

haciendo uso de la ecuación 3.1, se definen las cargas a aplicar para el método de evaluación establecido en la norma *ISO 15501* (Ver Tabla 4.6).

**Tabla 4.6.** Cargas a aplicar durante la prueba estática en estructuras de sujeción con cilindros de 40L (*ISO 15501*).

Dirección de aplicación de la carga	Carga (N)
Longitudinal delantera y posterior	9.251,20
Lateral (Ambas direcciones)	3.700,48
Vertical ascendente	2.081,52

Para los métodos de evaluación establecidos en la norma *ANSI – NFPA 52* la fuerza a aplicar se calcula de la misma manera, ya que se considerará el peso del cilindro completamente presurizado en condiciones ideales (Ver Tabla 4.7).

**Tabla 4.7.** Carga a aplicar durante la prueba estática en estructuras de sujeción con cilindros de 40L (*ANSI – NFPA 52*).

Dirección de aplicación de la carga	Carga (N)
Seis (6) direcciones principales	3.700,48

#### **4.2.1. Estructura de Sujeción “A”**

A continuación se presentan los resultados numéricos obtenidos a través del análisis por elementos finitos de la estructura de sujeción “A”, cuando esta es sometida a los distintos métodos de evaluación establecidos en la norma *ISO 15501* y *ANSI - NFPA52*.

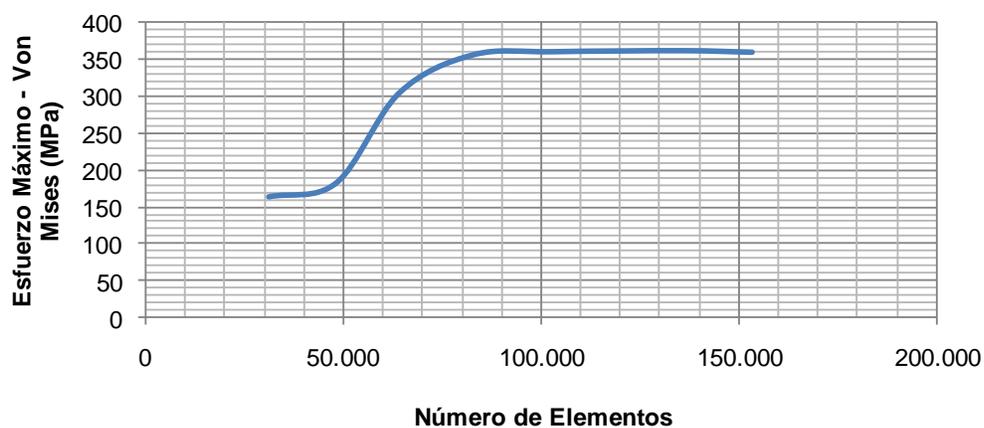
#### 4.2.1.1. Aplicación de carga posterior según norma ISO 15501.

En la Tabla 4.8 se muestra el análisis de sensibilidad del modelo para la condición en estudio.

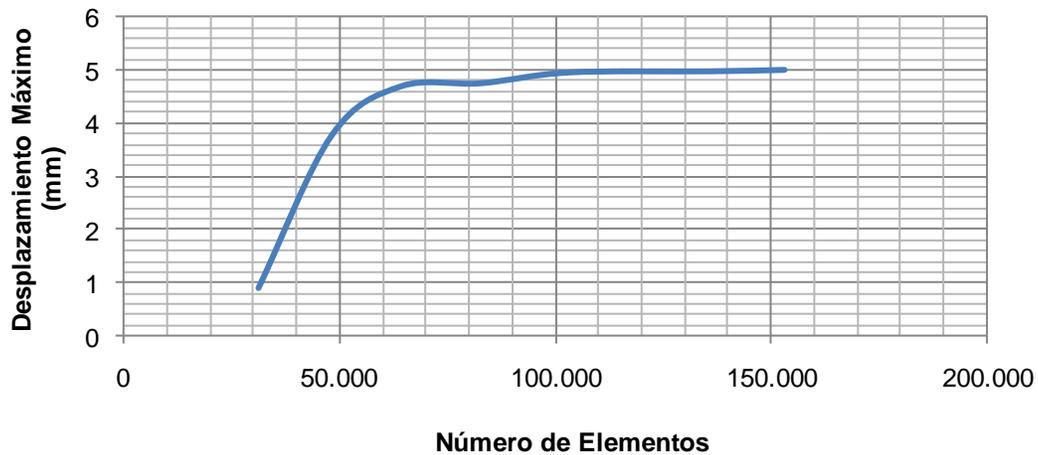
**Tabla 4.8.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga posterior en la estructura de sujeción “A” según norma ISO 15501.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
31.123	164,553	--	0,886	--
48.184	183,287	11,384	3,783	326,975
64.117	304,383	66,069	4,701	24,266
82.736	355,419	16,767	4,761	1,276
103.282	359,634	1,185	4,966	4,305
135.709	360,945	0,364	4,987	0,422
153.175	358,920	-0,561	5,014	0,541

En las Figuras 4.13 y 4.14 se muestra la convergencia del modelo según los esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos obtenidos.



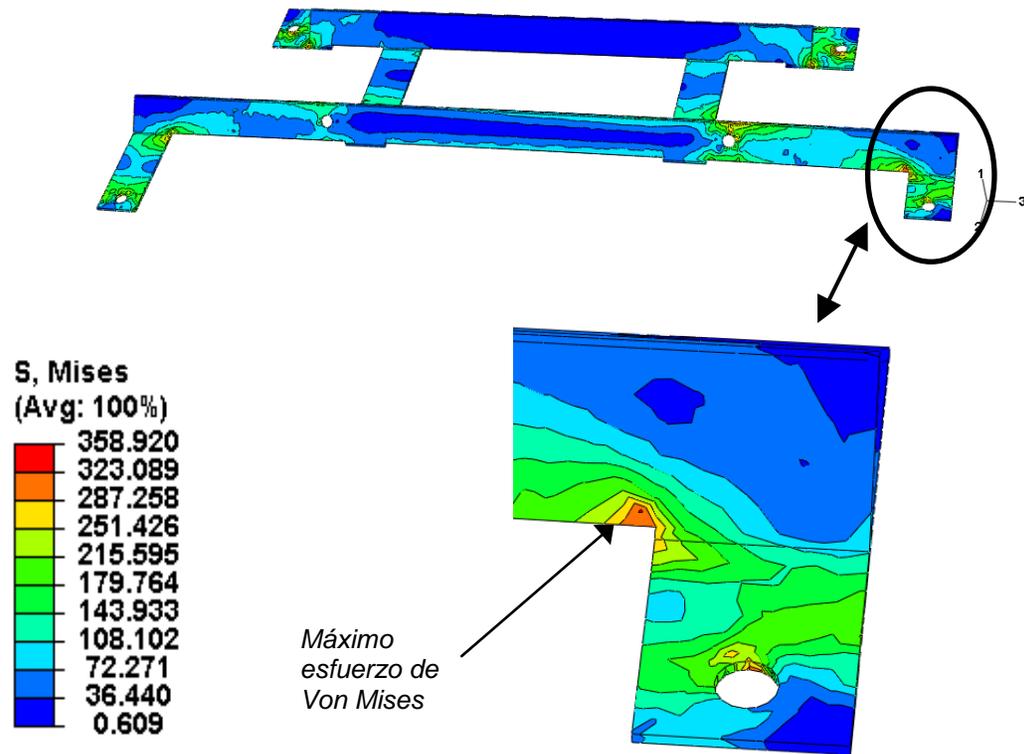
**Figura 4.13.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga posterior según norma ISO 15501.



**Figura 4.14.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga posterior según norma *ISO 15501*.

Para esta condición, el resultado numérico converge para una malla de 153.175 elementos, donde se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx. V.M.}} = 358,920$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 5,041$  mm, presentando un error de 0,561% y 0,541% respectivamente. En el análisis del MEF esto constituye una buena aproximación.

La zona donde ocurre el máximo esfuerzo de Von Mises se presenta en la Figura 4.15.



**Figura 4.15.** Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga posterior según la norma *ISO 15501* (Valores en MPa).

#### 4.2.1.2. Aplicación de carga delantera según norma *ISO 15501*.

El análisis de sensibilidad del modelo para la aplicación de la carga en cuestión se presenta en la Tabla 4.9.

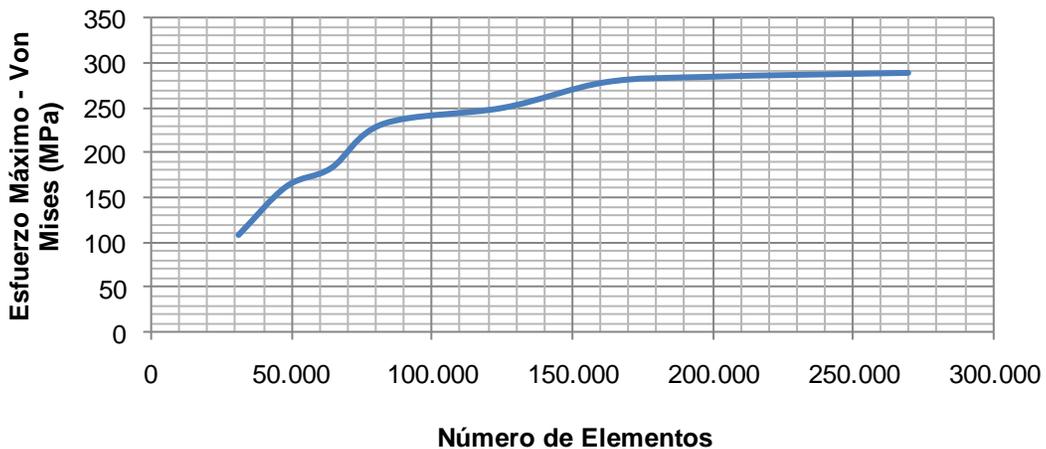
**Tabla 4.9.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga delantera en la estructura de sujeción “A” según norma *ISO 15501*.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
31.123	107,350	--	0,621	--
48.184	161,380	50,330	0,756	21,706

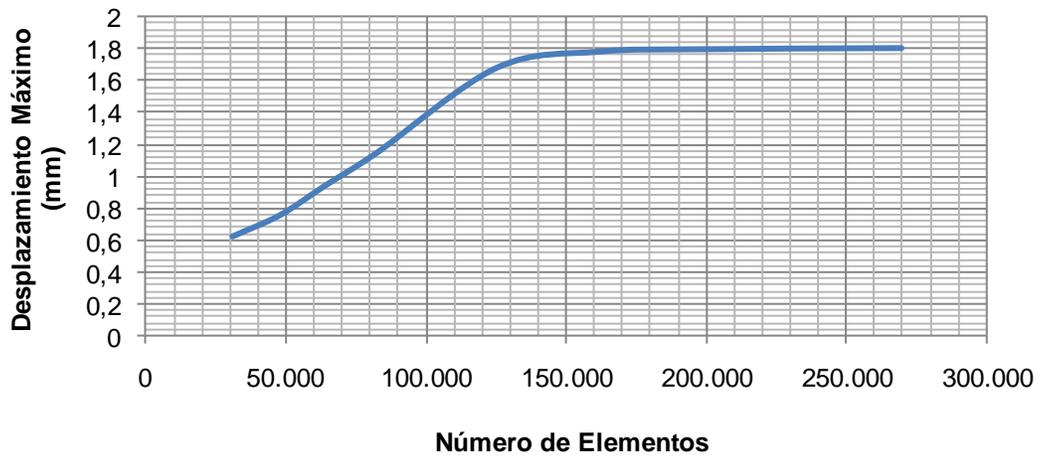
Continuación Tabla 4.9.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
64.117	181,836	12,675	0,940	24,338
82.736	231,113	27,099	1,148	22,127
125.516	249,003	7,740	1,682	46,027
162.045	277,470	11,432	1,783	6,004
199.074	283,463	2,159	1,798	0,841
269.790	287,853	1,548	1,805	0,389

Para la condición evaluada, la convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos se presenta en las Figuras 4.16 y 4.17.



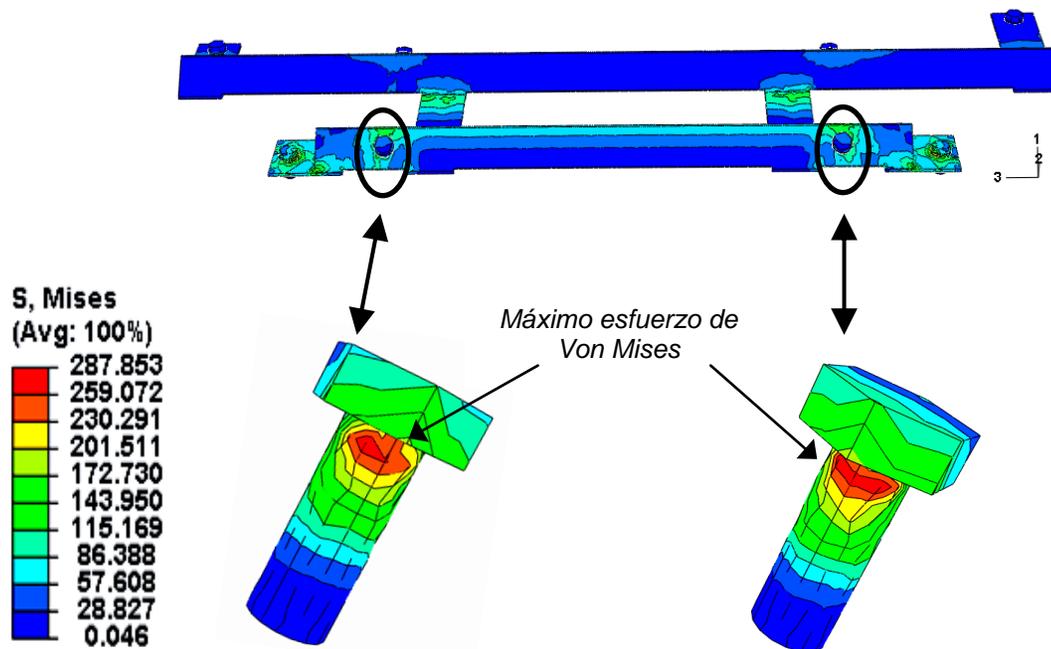
**Figura 4.16.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción "A" durante la aplicación de la carga delantera según norma ISO 15501.



**Figura 4.17.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según norma *ISO 15501*.

Como se observó anteriormente, el resultado numérico converge para una malla de 269.790 elementos, con un valor de  $\sigma_{\text{Máx. V.M.}} = 287,853$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 1,805$  mm, obteniéndose un error de 1,548% y 0,389% respectivamente. Esto representa una muy buena aproximación en el análisis de MEF.

La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se presenta en la Figura 4.18.



**Figura 4.18.** Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según la norma ISO 15501 (Valores en MPa).

4.2.1.3. *Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3.*

Para esta carga, el análisis de sensibilidad se muestra en la Tabla 4.10.

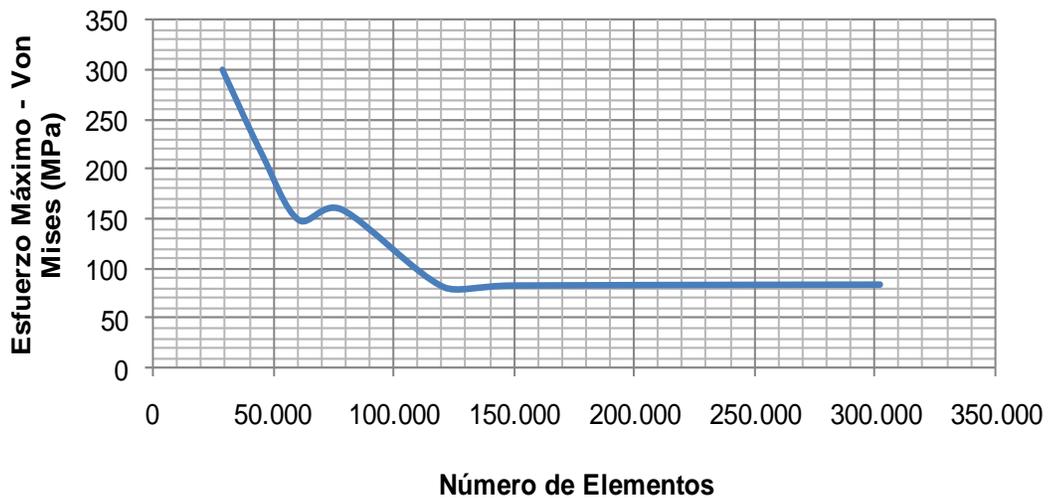
**Tabla 4.10.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción “A” según norma ISO 15501, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
29.213	298,689	--	0,370	--
45.327	215,856	-27,732	0,311	-15,945

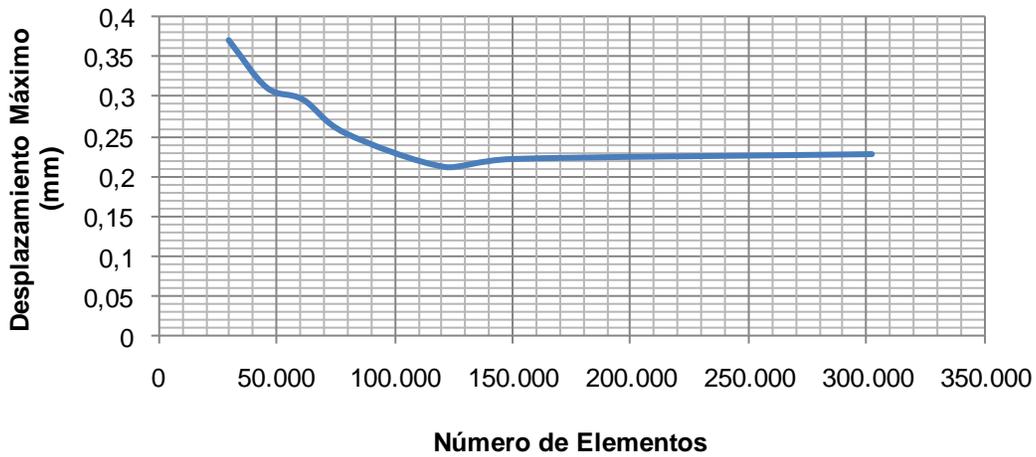
Continuación Tabla 4.10.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
60.790	148,897	-31,020	0,296	-4,823
78.901	159,009	6,791	0,254	-14,189
121.110	81,754	-48,585	0,212	-16,535
149.703	83,355	1,958	0,222	4,716
302.389	84,291	1,122	0,228	2,702

La convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos presentes en la estructura se expone en las Figuras 4.19 y 4.20.



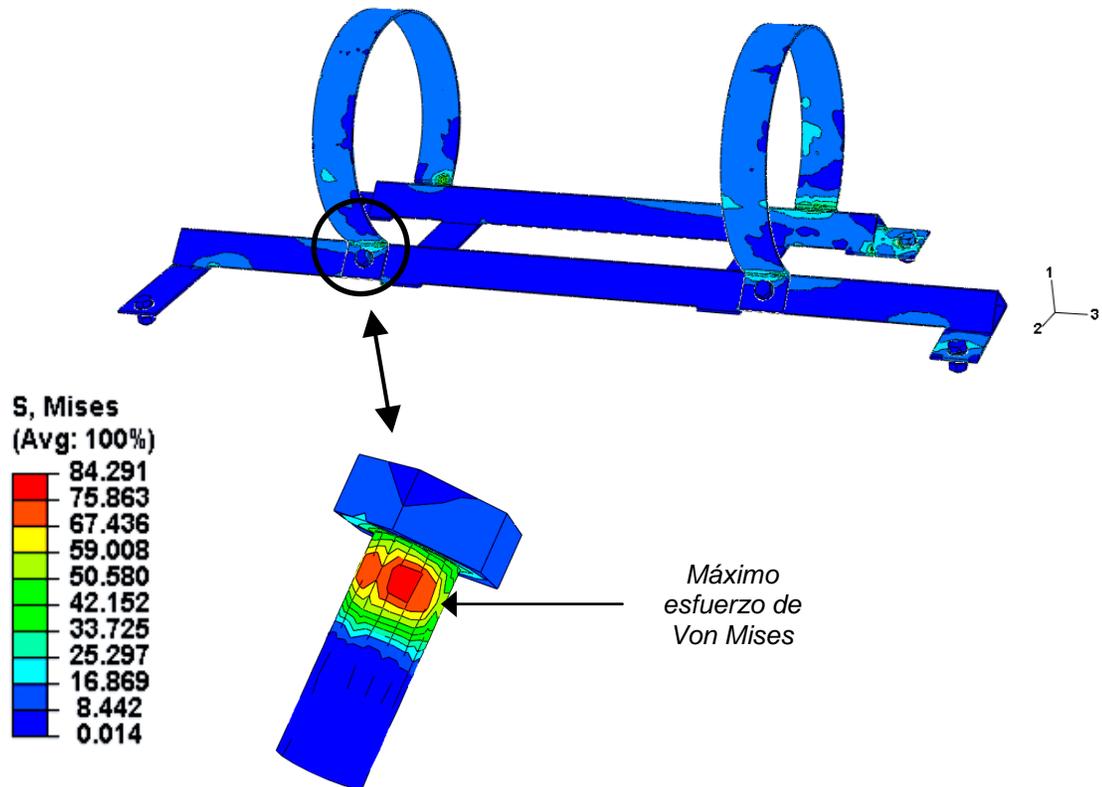
**Figura 4.19.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según norma *ISO 15501*, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3.



**Figura 4.20.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según norma *ISO 15501*, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3.

En este caso, el resultado numérico converge para una malla de 302.389 elementos, con el que se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx. V.M.}} = 84,291$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 0,228$  mm, con un error de 1,122% y 2,702% respectivamente, lo cual se considera una muy buena aproximación en el análisis de MEF. Estos mismos resultados corresponden a la norma *ANSI-NFPA 52*, ya que las condiciones de la prueba y la magnitud de la fuerza aplicada son iguales.

La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se muestra en la Figura 4.21.



**Figura 4.21.** Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según la norma *ISO 15501*, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3 (Valores en MPa).

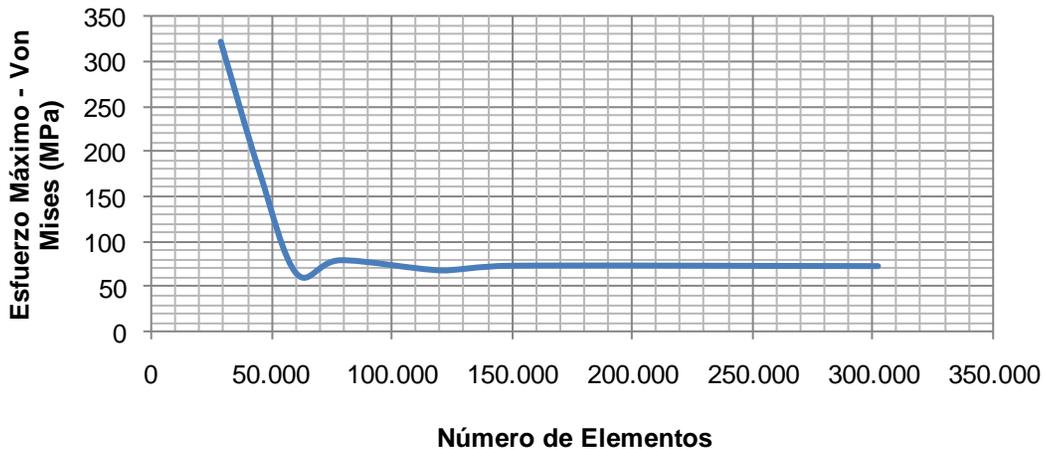
4.2.1.4. *Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3.*

En la Tabla 4.11 se muestra el análisis de sensibilidad del modelo para la condición en estudio.

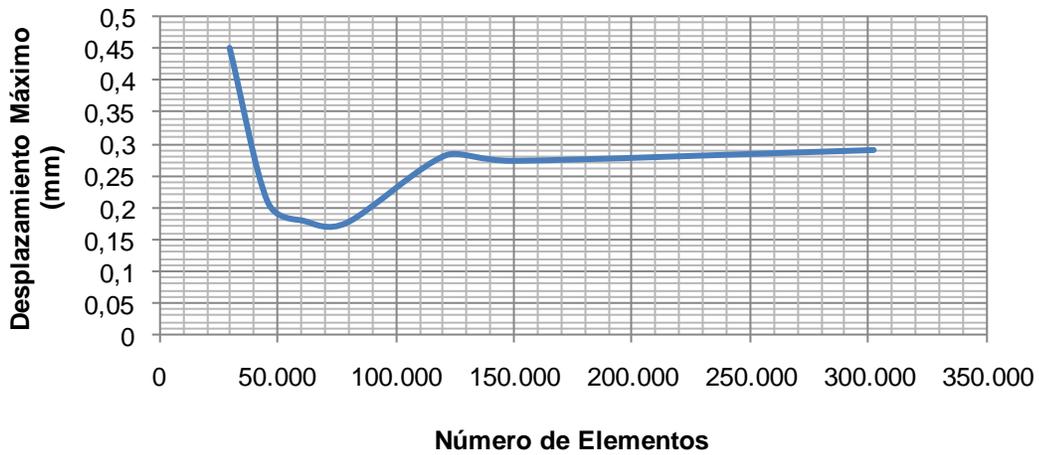
**Tabla 4.11.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción “A” según norma *ISO 15501*, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
29.213	321,689	--	0,451	--
45.327	176,671	-45,080	0,210	-53,436
60.790	63,336	-64,150	0,180	-14,285
78.901	78,458	23,875	0,177	-1,666
121.110	67,136	-14,430	0,283	59,887
149.703	72,334	7,742	0,274	-3,180
302.389	71,922	-0,569	0,291	6,204

En las Figuras 4.22 y 4.23 se muestra la convergencia del modelo según los esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos obtenidos.



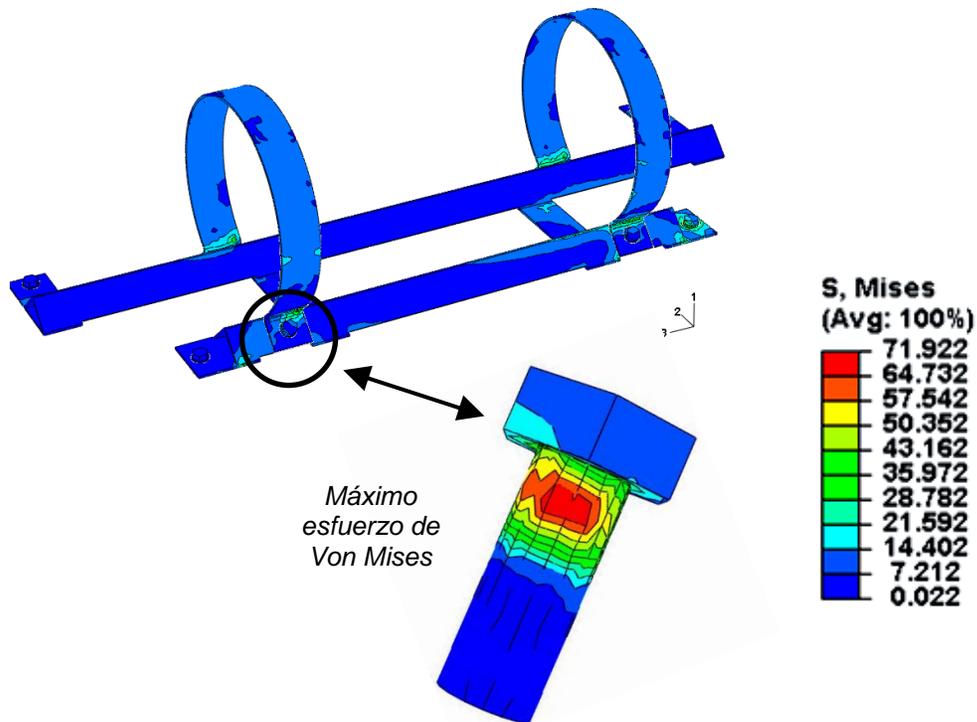
**Figura 4.22.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según norma *ISO 15501*, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3.



**Figura 4.23.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según norma *ISO 15501*, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3.

Para esta condición, el resultado numérico converge de igual manera para una malla de 302.389 elementos, donde se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 71,922 \text{ MPa}$  y  $D_{\text{Máx}} = 0,291 \text{ mm}$ , presentando un error de 0,569% y 6,204% respectivamente. En el análisis del MEF esto constituye una buena aproximación. Estos mismos resultados corresponden a la norma *ANSI-NFPA 52*, ya que las condiciones de la prueba y la magnitud de la fuerza aplicada son iguales.

En este caso, la zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se muestra en la Figura 4.24.



**Figura 4.24.** Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según la norma *ISO 15501*, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3 (Valores en MPa).

4.2.1.5. *Aplicación de carga ascendente según norma ISO 15501.*

El análisis de sensibilidad del modelo para la aplicación de la carga en estudio se presenta en la Tabla 4.12.

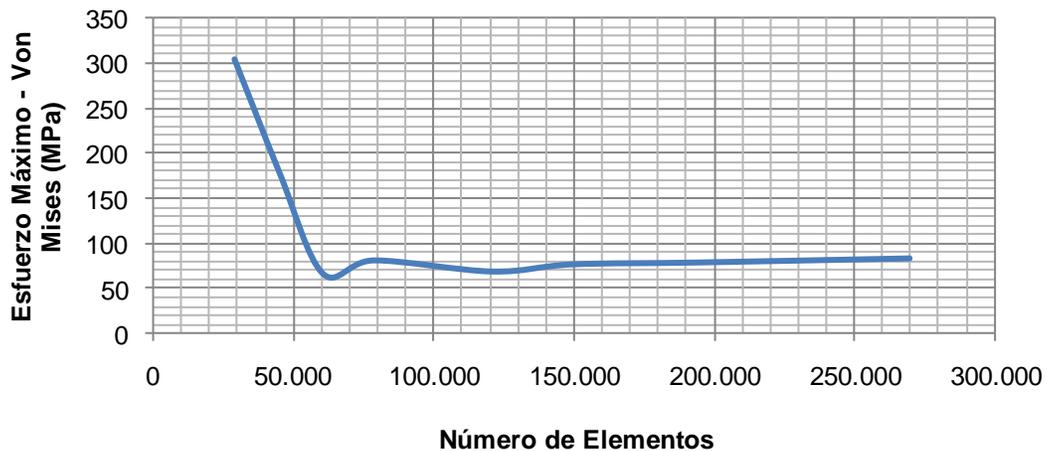
**Tabla 4.12.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “A” según norma *ISO 15501*.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
29.213	305,164	--	0,368	--
45.237	178,925	-41,367	0,349	-5,163

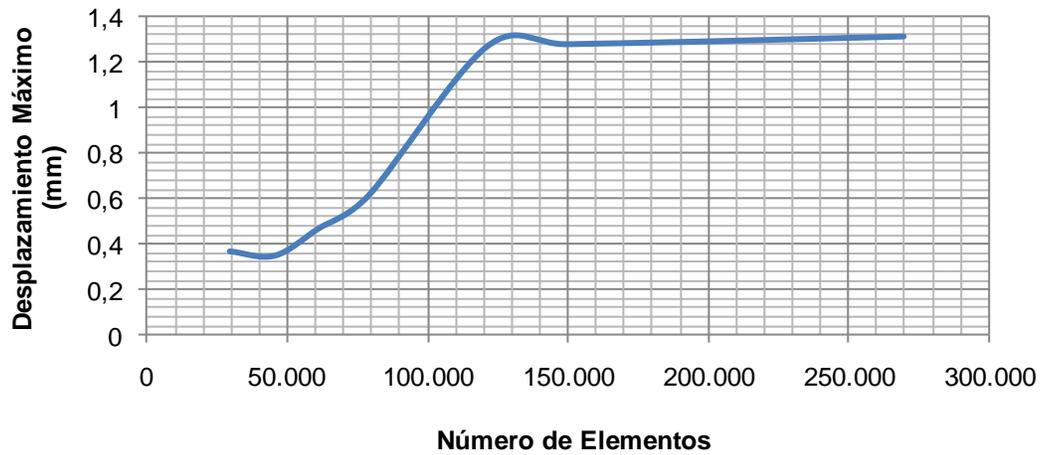
Continuación Tabla 4.12.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
60.790	66,320	-62,934	0,467	33,810
78.901	81,234	22,487	0,614	31,477
121.110	68,831	-15,268	1,266	106,188
149.730	76,814	11,597	1,276	0,789
195.082	78,926	2,749	1,287	0,862
269.900	83,487	5,759	1,310	1,787

Para la condición evaluada, la convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos se presenta en las Figuras 4.25 y 4.26.



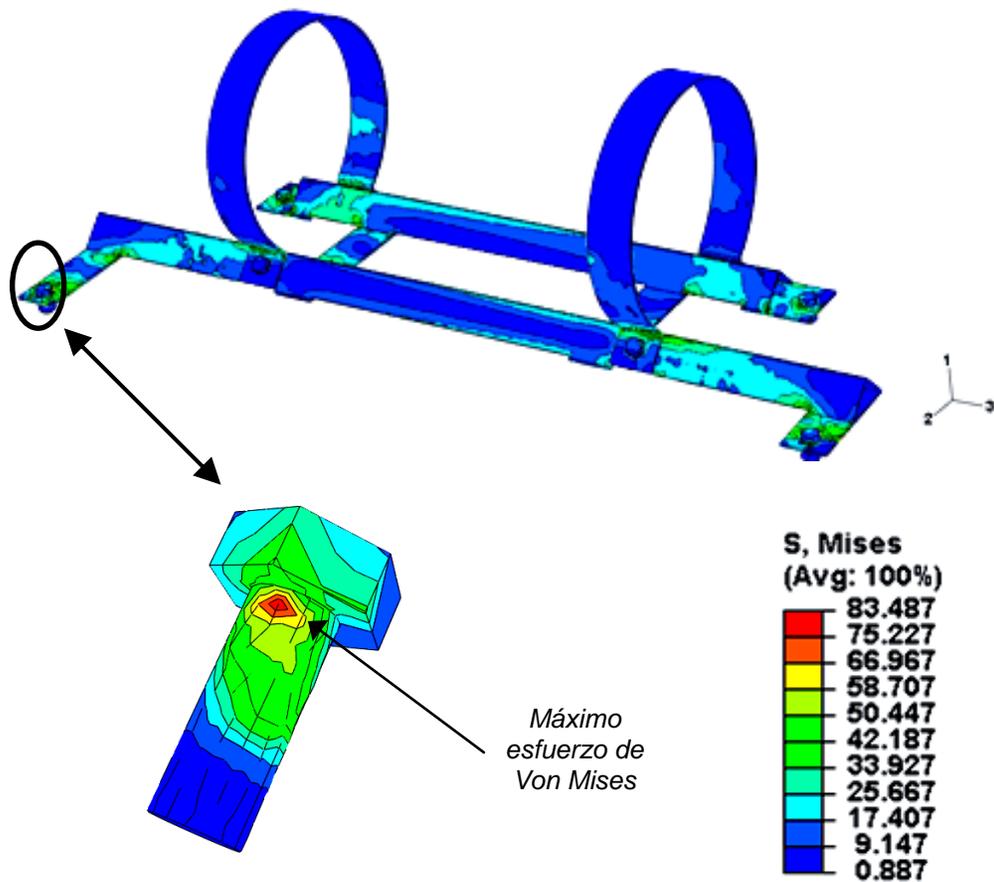
**Figura 4.25.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción "A" durante la aplicación de la carga ascendente según norma *ISO 15501*.



**Figura 4.26.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga ascendente según norma *ISO 15501*.

Como se observó anteriormente, el resultado numérico converge para una malla de 269.900 elementos, con un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 83,487$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 1,310$  mm, obteniéndose un error de 5,759% y 1,787% respectivamente, Esto representa una muy buena aproximación en el análisis de MEF.

La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se muestra en la Figura 4.27.



**Figura 4.27.** Distribución de esfuerzos de Von Mises durante la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “A” según la norma *ISO 15501* (Valores en MPa).

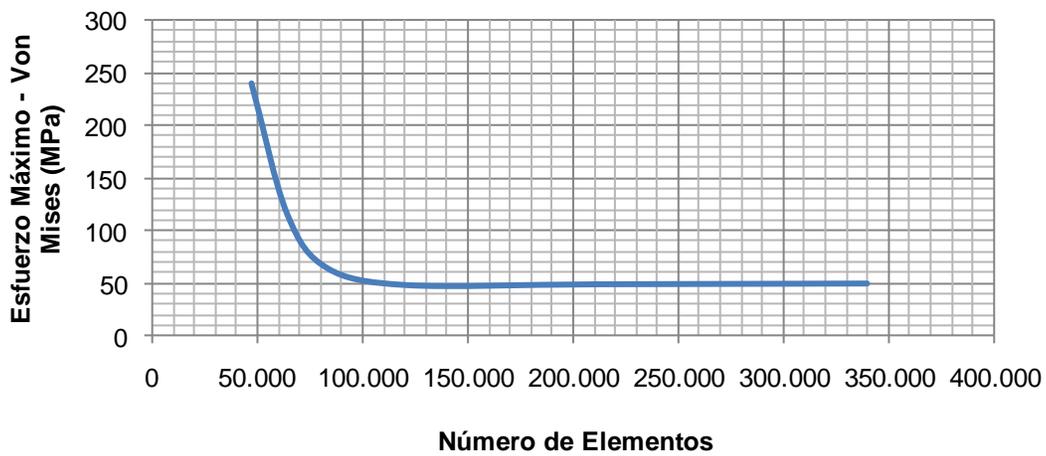
4.2.1.6. *Aplicación de carga descendente según norma ANSI-NFPA 52.*

Para esta carga, el análisis de sensibilidad se muestra en la Tabla 4.13.

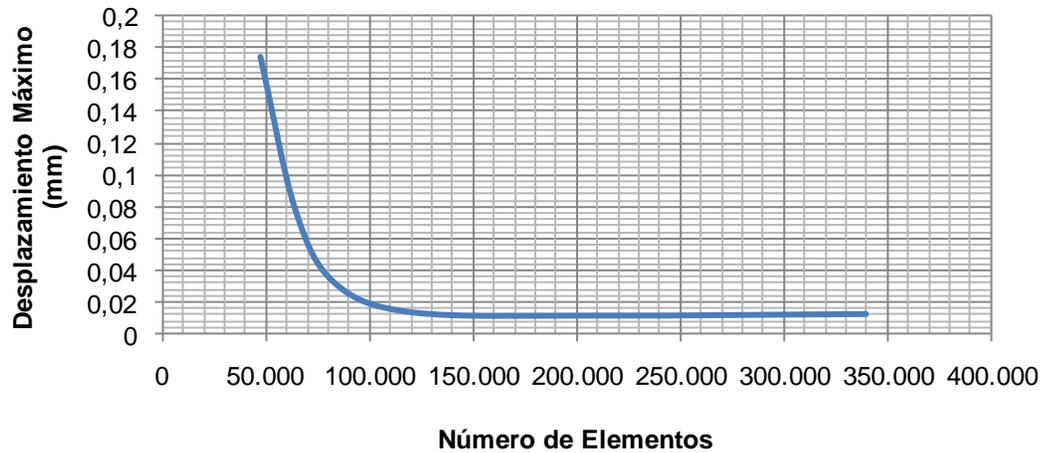
**Tabla 4.13.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga descendente en la estructura de sujeción “A” según norma *ANSI-NFPA 52*.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
47.505	239,999	--	0,174	--
64.417	115,734	-51,777	0,078	-55,172
83.728	63,838	-44,840	0,032	-58,974
121.110	47,998	-24,812	0,014	-56,375
211.652	48,754	1,575	0,012	-14,285
339.829	49,490	1,509	0,013	8,333

La convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos presentes en la estructura se expone en las Figuras 4.28 y 4.29.

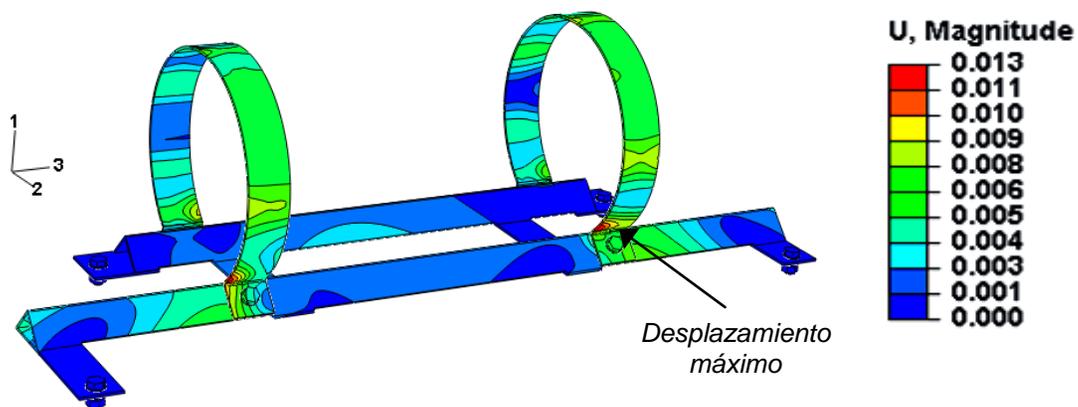


**Figura 4.28.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga descendente según norma *ANSI-NFPA 52*.



**Figura 4.29.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción "A" durante la aplicación de la carga descendente según norma *ANSI-NFPA 52*.

En este caso, el resultado numérico converge para una malla de 339.829 elementos, con el que se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 49,490$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 0,013$  mm, con un error de 1,509% y 8,333% respectivamente, lo cual se considera una muy buena aproximación en el análisis de MEF. La zona donde se registra el máximo desplazamiento se observa en la Figura 4.30.



**Figura 4.30.** Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga descendente en la estructura de sujeción "A" según la norma *ANSI-NFPA 52* (Valores en mm).

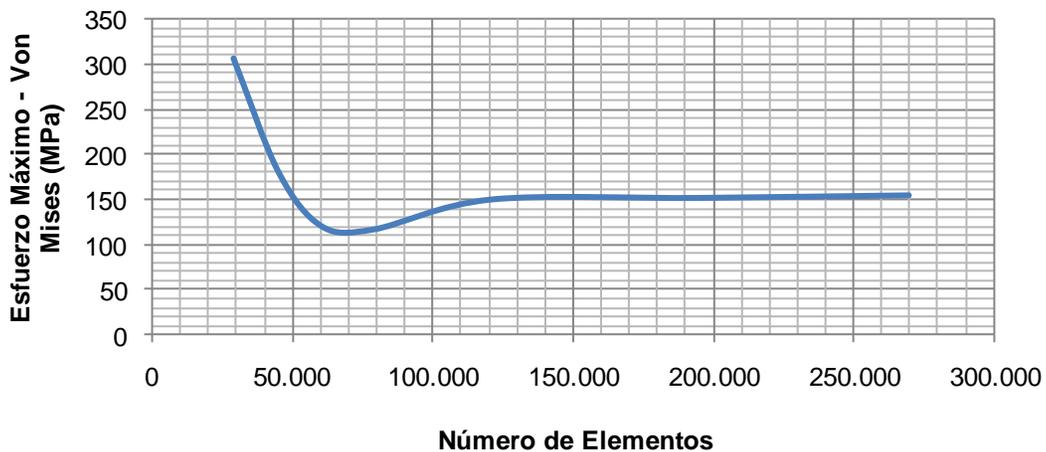
4.2.1.7. *Aplicación de carga ascendente según norma ANSI-NFPA 52.*

En la Tabla 4.14 se muestra el análisis de sensibilidad del modelo para la condición en estudio.

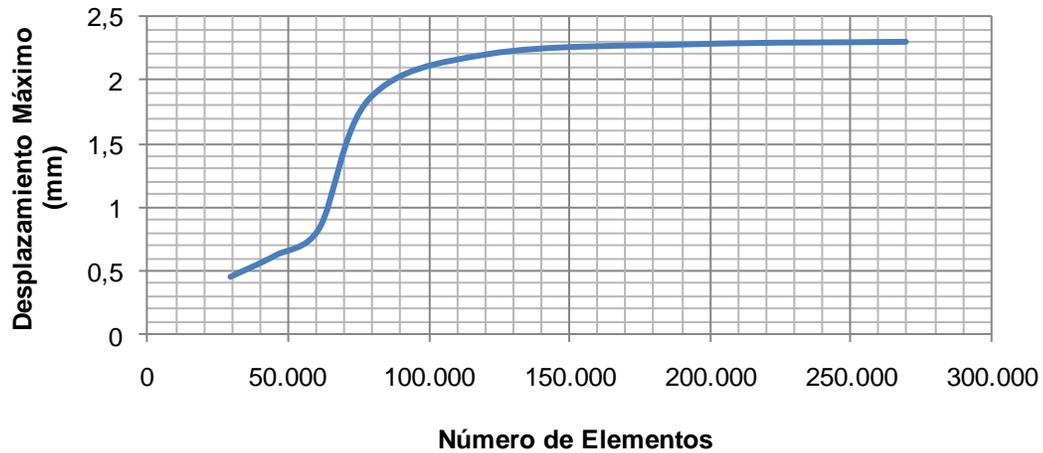
**Tabla 4.14.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “A” según norma *ANSI-NFPA 52*.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
29.213	305,705	--	0,450	--
45.327	178,989	-41,450	0,620	37,777
60.790	119,047	-33,489	0,831	34,032
78.901	115,725	-2,790	1,862	124,067
121.110	149,120	28,857	2,211	18,743
195.082	150,873	1,175	2,289	3,527
269.900	153,736	1,897	2,308	0,830

En las Figuras 4.31 y 4.32 se muestra la convergencia del modelo según los esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos obtenidos.

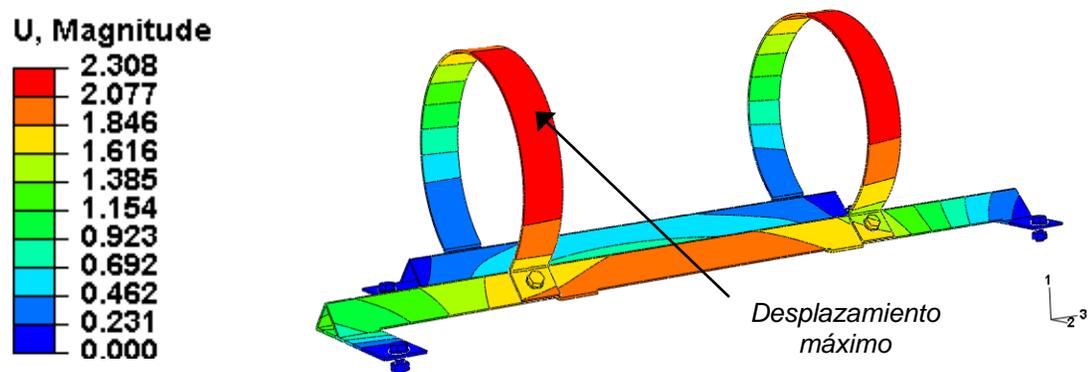


**Figura 4.31.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga ascendente según norma *ANSI-NFPA 52*.



**Figura 4.32.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga ascendente según norma *ANSI-NFPA 52*.

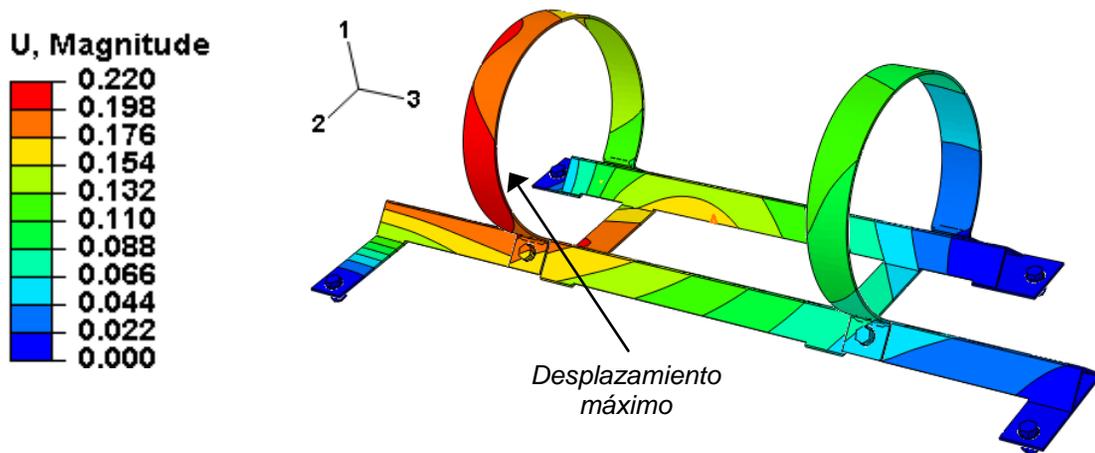
Para este caso, el resultado numérico converge para una malla de 269.900 elementos, donde se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 153,736$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 2,308$  mm, presentando un error de 1,897% y 9,435% respectivamente. En el análisis del MEF esto constituye una buena aproximación. La zona donde se registra el máximo desplazamiento se muestra en la Figura 4.33.



**Figura 4.33.** Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “A” según la norma *ANSI-NFPA 52* (Valores en mm).

4.2.1.8. *Aplicación de carga lateral según norma ANSI-NFPA 52, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3.*

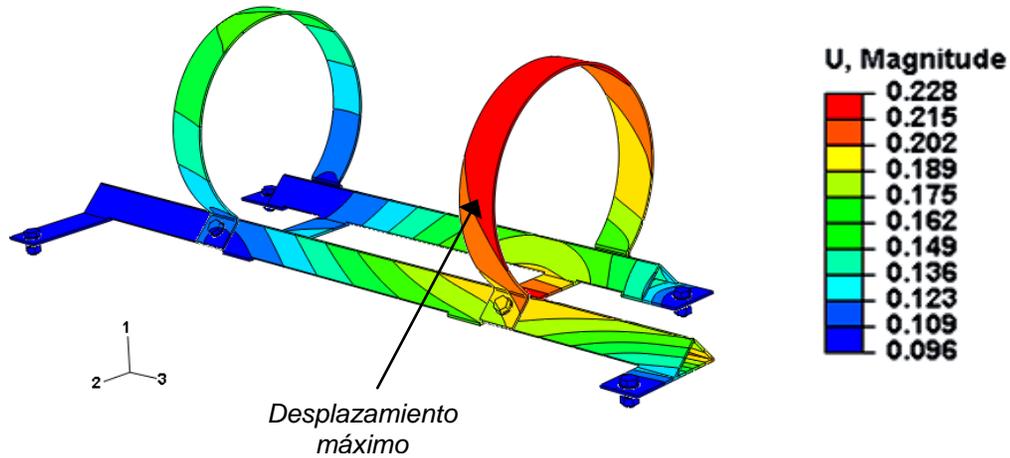
Como se mencionó en el punto 4.2.1.4, los resultados numéricos correspondientes a este estado de carga son los mismos que se encuentran en la Tabla 4.11. La zona donde se registra el máximo desplazamiento se observa en la Figura 4.34.



**Figura 4.34.** Distribución de desplazamientos en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según la norma *ANSI-NFPA 52*, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3 (Valores en mm).

4.2.1.9. *Aplicación de carga lateral según norma ANSI-NFPA 52, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3.*

De acuerdo a lo establecido en el apartado 4.2.1.3, los resultados numéricos correspondientes a este estado de carga son los mismos de la Tabla 4.10. La zona donde se registra el máximo desplazamiento se observa en la Figura 4.35.



**Figura 4.35.** Distribución de desplazamientos en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga lateral según la norma *ANSI-NFPA 52*, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3 (Valores en mm).

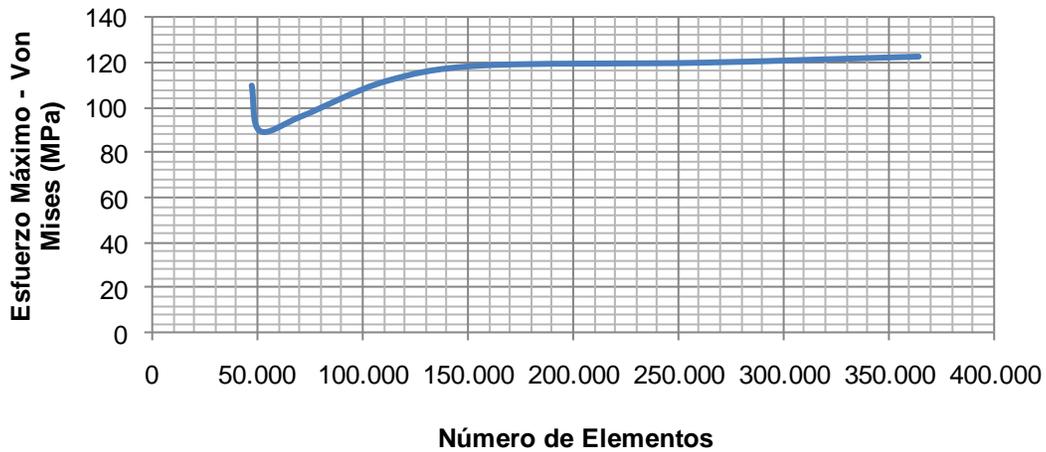
4.2.1.10. *Aplicación de carga delantera según norma ANSI-NFPA 52.*

El análisis de sensibilidad del modelo para la aplicación de la carga en estudio se presenta en la Tabla 4.15.

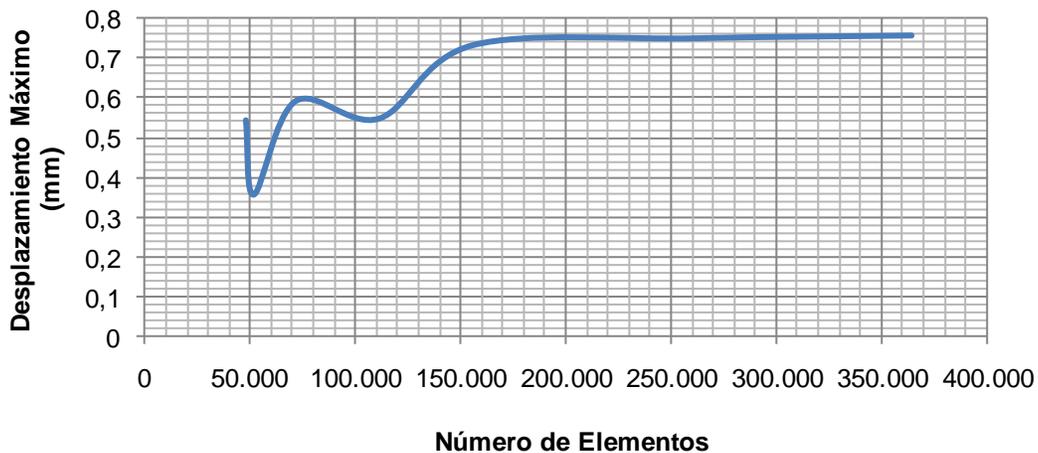
**Tabla 4.15.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga delantera en la estructura de sujeción “A” según norma *ANSI-NFPA 52*.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
47.505	109,479	--	0,544	--
51.344	89,209	-18,514	0,358	-34,191
71.214	95,757	7,340	0,592	65,363
110.843	111,328	16,260	0,548	-7,432
155.709	118,378	6,332	0,732	33,576
261.312	119,722	1,135	0,749	2,322
364.236	122,445	2,274	0,756	0,934

Para la condición evaluada, la convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos se presenta en las Figuras 4.36 y 4.37.

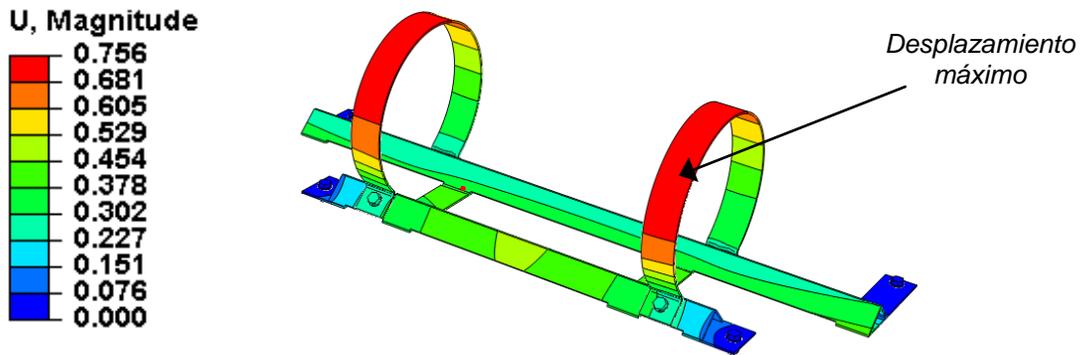


**Figura 4.36.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según norma *ANSI-NFPA 52*.



**Figura 4.37.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según norma *ANSI-NFPA 52*.

Como se observó anteriormente, el resultado numérico converge para una malla de 364.236 elementos, con un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 122,445$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 0,756$  mm, obteniéndose un error de 2,274% y 0,934% respectivamente. Esto representa una muy buena aproximación en el análisis de MEF. La zona donde se registra el máximo desplazamiento se muestra en la Figura 4.38.



**Figura 4.38.** Distribución de desplazamientos en la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga delantera según la norma *ANSI-NFPA 52* (Valores en mm).

#### 4.2.1.11. Aplicación de carga posterior según norma ANSI-NFPA 52.

Para esta carga, el análisis de sensibilidad se muestra en la Tabla 4.16.

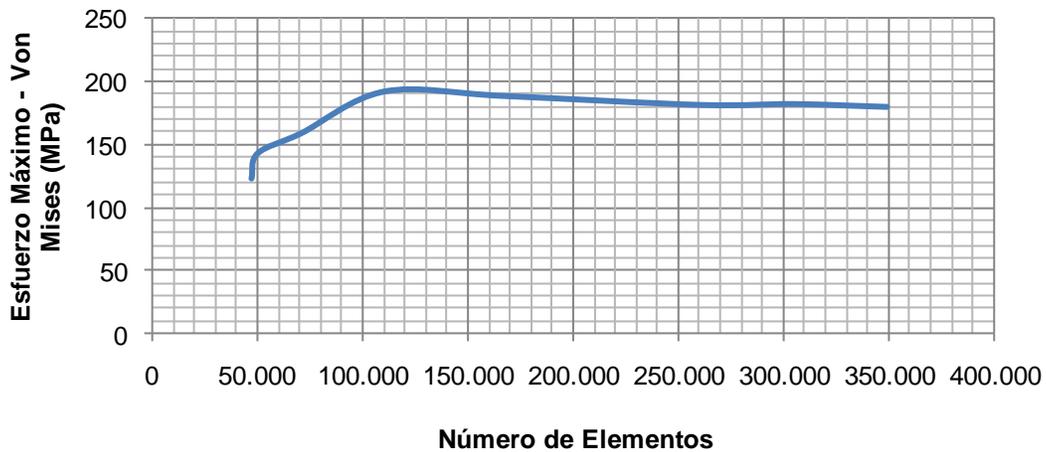
**Tabla 4.16.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga posterior en la estructura de sujeción “A” según norma *ANSI-NFPA 52*.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
47.505	123,387	--	0,927	--
50.525	143,149	16,016	0,859	-7,335
71.214	158,770	10,912	1,368	59,255
110.843	191,394	20,548	1,640	19,883

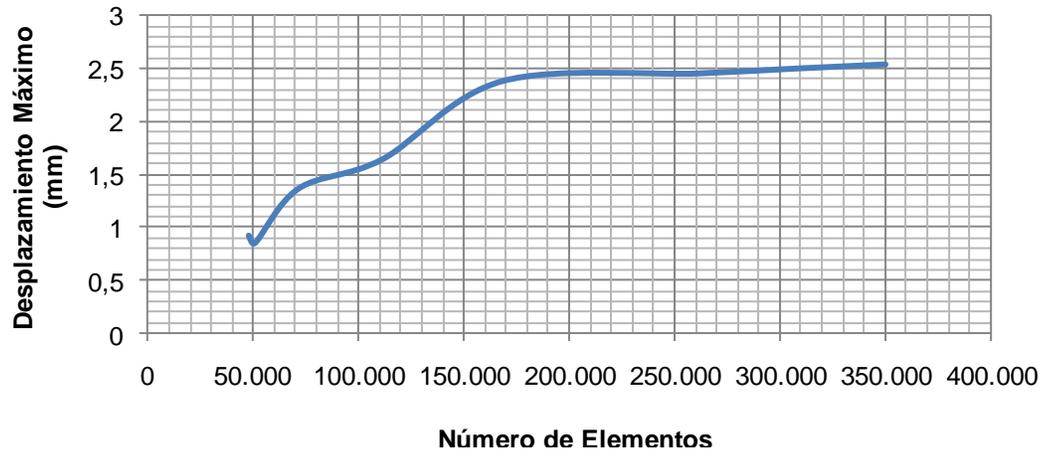
Continuación Tabla 4.16.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
167.894	187,840	-1,857	2,373	44,695
261.312	180,860	-3,716	2,445	3,034
305.489	181,548	0,380	2,489	1,800
349.725	179,340	-1,216	2,529	1,607

La convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos presentes en la estructura se expone en las Figuras 4.39 y 4.40.

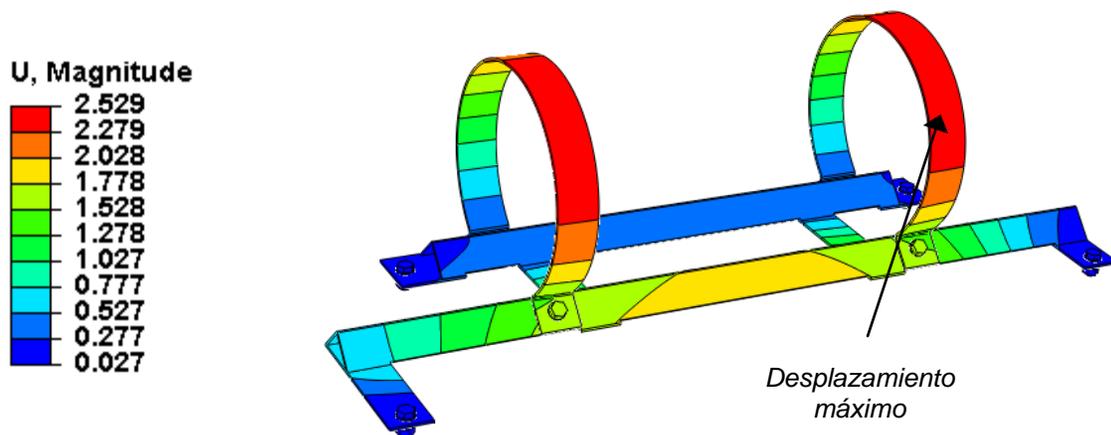


**Figura 4.39.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción "A" durante la aplicación de la carga posterior según norma ANSI-NFPA 52.



**Figura 4.40.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” durante la aplicación de la carga posterior según norma *ANSI-NFPA 52*.

En este caso, el resultado numérico converge para una malla de 349.725 elementos, con el que se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 179,340$  MPa y  $D_{\text{Máx}} =$  de 2,529 mm, con un error de 1,216% y 1,607% respectivamente, lo cual se considera una muy buena aproximación en el análisis de MEF. La zona donde se registra el máximo desplazamiento se muestra en la Figura 4.41.



**Figura 4.41.** Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga posterior en la estructura de sujeción “A” según la norma *ANSI-NFPA 52* (Valores en mm).

## 4.2.2. Estructura de Sujeción “B”

### 4.2.2.1. Aplicación de carga longitudinal según norma ISO 15501.

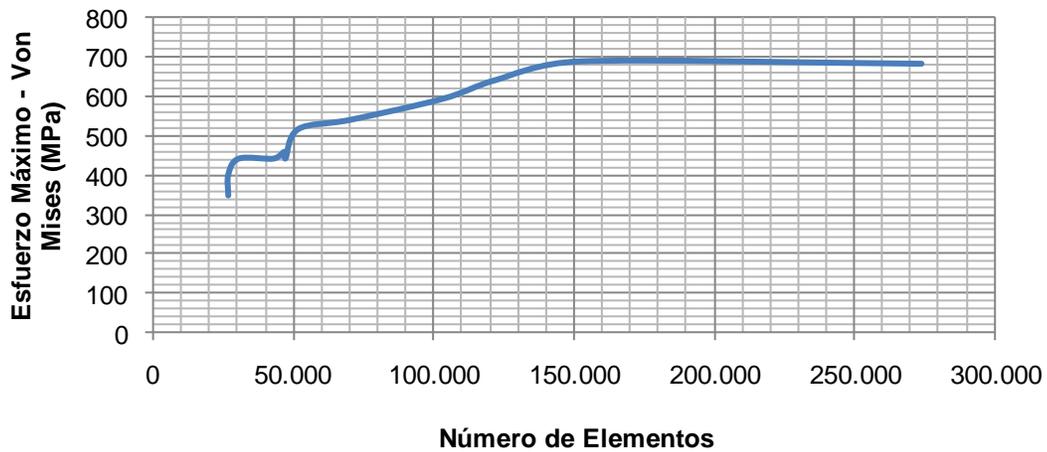
En este caso, la carga fue aplicada en una sola dirección (Negativa respecto al eje de coordenadas 3) (Ver Figura 4.44), ya que el modelo es simétrico, por lo que no es necesario aplicar una carga delantera y luego una posterior.

En la Tabla 4.17 se muestra el análisis de sensibilidad del modelo para la presente condición de estudio.

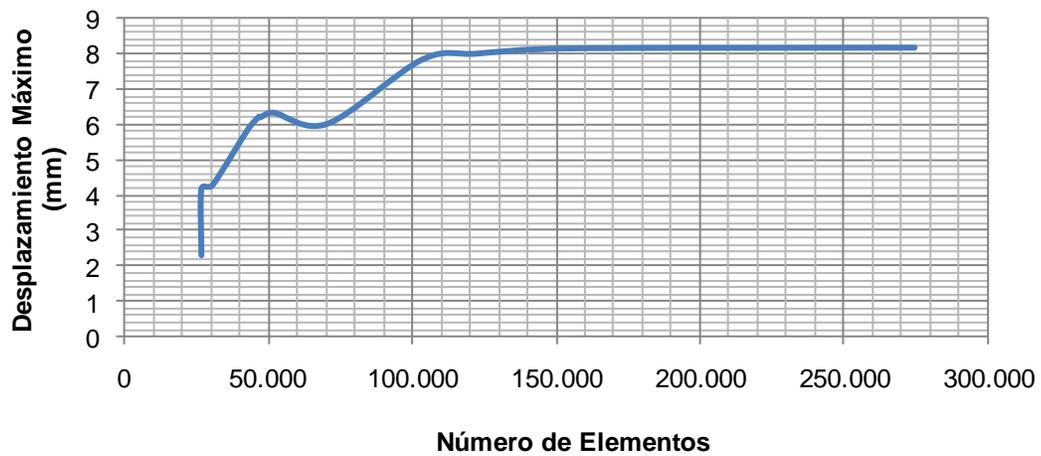
**Tabla 4.17.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción “B” según norma ISO 15501.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
26.630	347,000	--	2,310	--
26.657	400,970	15,553	4,190	81,542
30.484	440,850	9,945	4,290	2,410
42.802	440,640	-0,047	5,871	36,797
46.657	457,925	3,92 1	6,230	6,132
47.120	441,824	-3,51 5	6,210	-0,321
51.631	515,596	16,69 6	6,340	2,093
70.486	539,513	4,639	6,030	-4,842
103.271	592,604	9,840	7,841	29,869
122.439	640,803	8,133	8,012	2,259
152.152	687,685	7,316	8,156	1,797
274.311	681,679	-0,873	8,181	0,306

En las Figuras 4.42 y 4.43 se muestra la convergencia del modelo según los esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos obtenidos.

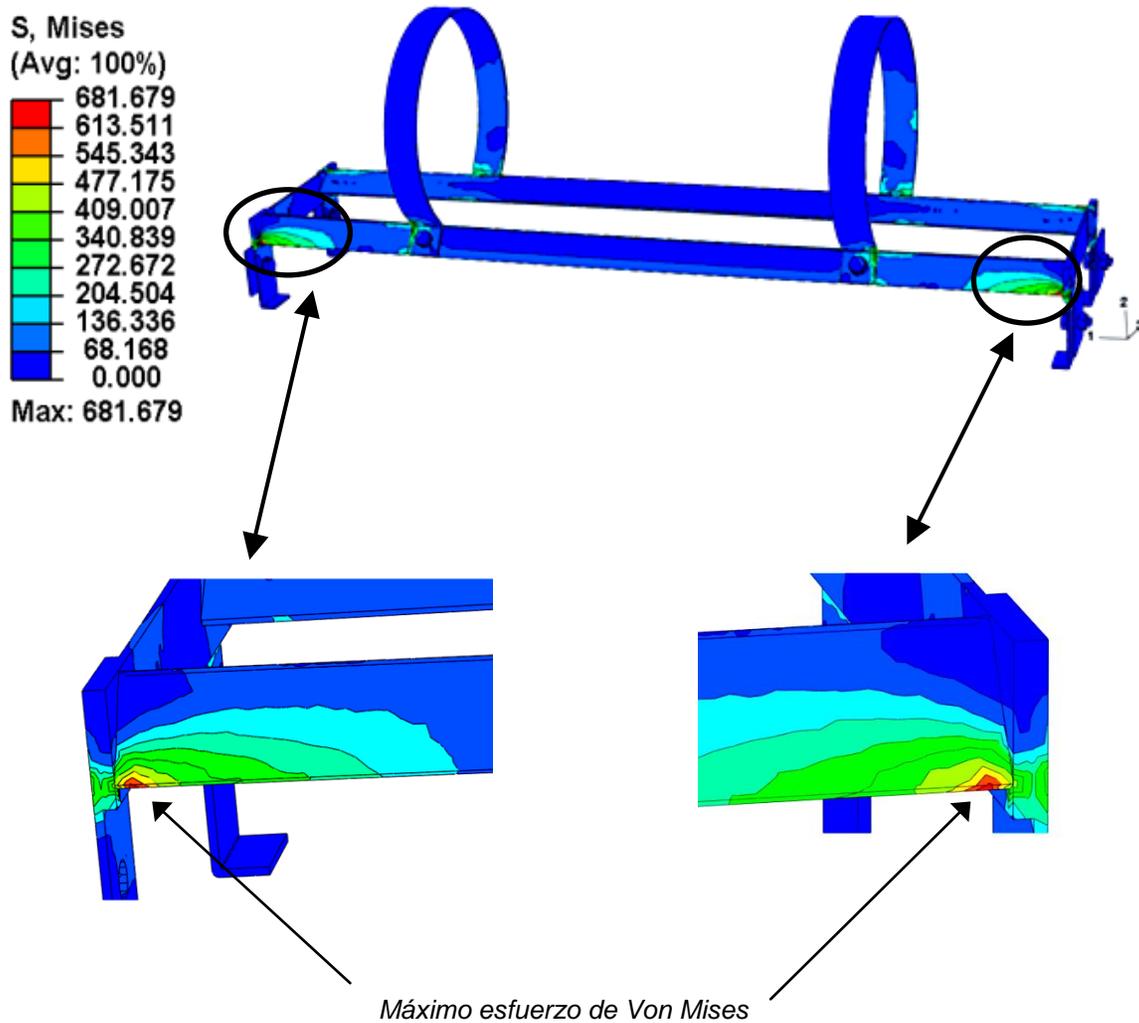


**Figura 4.42.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga longitudinal según norma *ISO 15501*.



**Figura 4.43.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga longitudinal según norma *ISO 15501*.

Para este caso, el resultado numérico converge para una malla de 274.311 elementos, donde se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 681,679$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 8,181$  mm, con un error de 0,873% y 0,306% respectivamente, lo cual se considera una muy buena aproximación en el análisis de MEF. La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se presenta en la Figura 4.44.



**Figura 4.44.** Distribución de esfuerzos de Von Mises durante la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción "B" según la norma ISO 15501 (Valores en MPa).

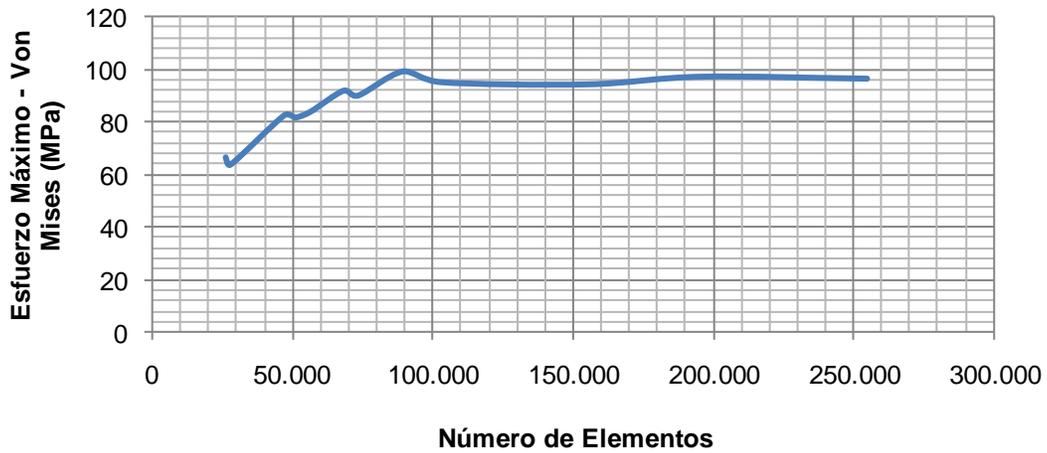
#### 4.2.2.2. Aplicación de carga ascendente según norma ISO 15501.

El análisis de sensibilidad del modelo para la aplicación de la carga en estudio se presenta en la Tabla 4.18.

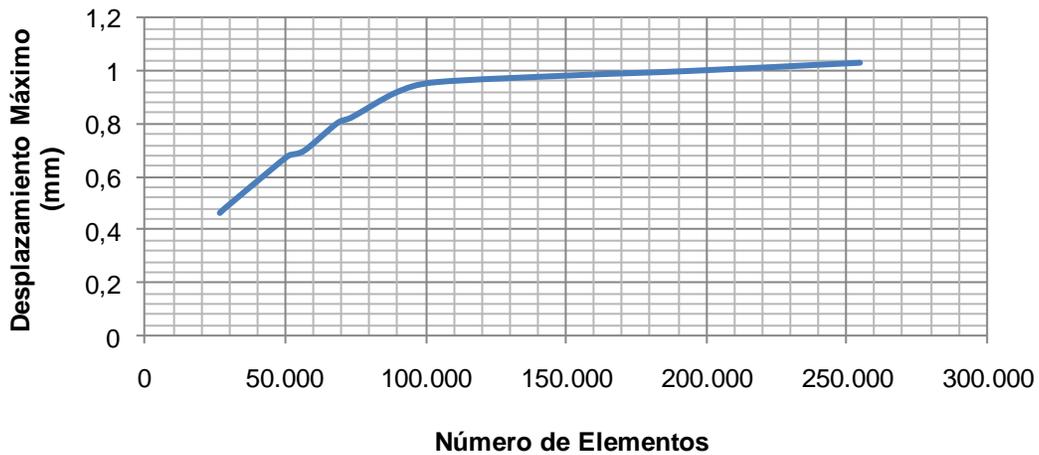
**Tabla 4.18.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “B” según norma ISO 15501.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
26.478	66,300	--	0,466	--
28.223	63,491	-4,237	0,483	3,648
47.343	82,562	30,037	0,651	34,783
51.243	81,683	-1,065	0,682	4,762
56.664	83,932	2,753	0,700	2,639
68.400	92,043	9,664	0,803	14,714
73.631	90,199	-2,003	0,825	2,740
89.642	99,534	10,349	0,919	11,394
103.271	95,325	-4,229	0,956	4,026
155.329	94,511	-0,854	0,983	2,824
195.587	97,487	3,149	0,999	1,628
254.783	96,722	-0,785	1,029	3,003

Para la condición evaluada, la convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos se presenta en las Figuras 4.45 y 4.46.



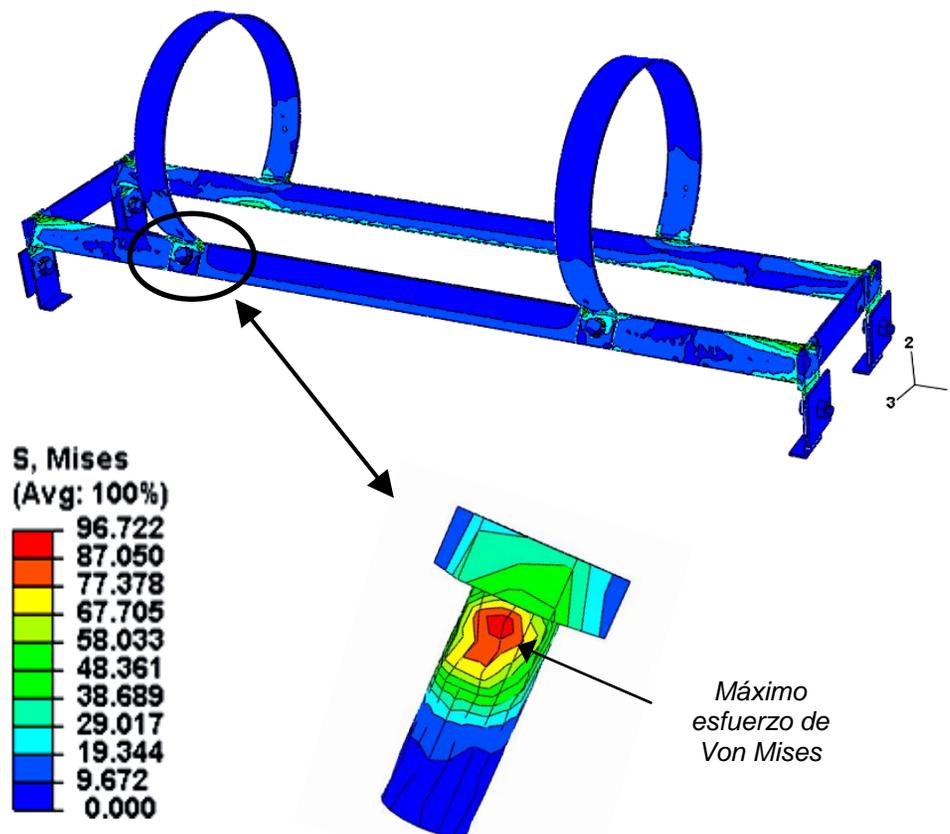
**Figura 4.45.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga ascendente según norma *ISO 15501*.



**Figura 4.46.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga ascendente según norma *ISO 15501*.

Como se observó anteriormente, el resultado numérico converge para una malla de 254.783 elementos, con un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 96,722$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 1,029$  mm, obteniéndose un error de 0,785% y 3,003% respectivamente. Esto representa una muy buena aproximación en el análisis de MEF.

La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se presenta en la Figura 4.47.



**Figura 4.47.** Distribución de esfuerzos de Von Mises durante la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “B” según la norma *ISO 15501* (Valores en MPa).

#### 4.2.2.3. Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501.

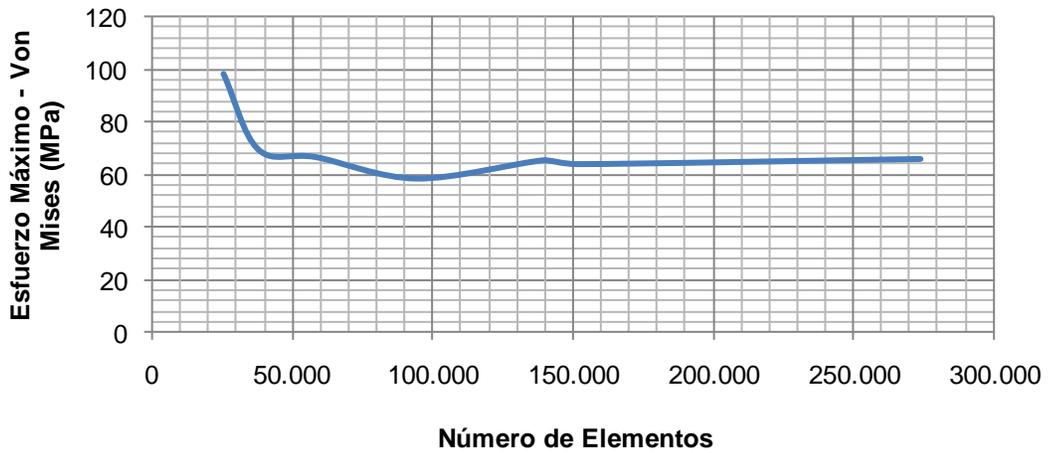
En este caso, la carga fue aplicada en una sola dirección (Negativa respecto al eje coordenado 1) (Ver Figura 4.50), ya que el modelo es simétrico, por lo que no es necesario aplicar la carga lateral en los dos sentidos respecto al eje coordenado.

Para esta carga, el análisis de sensibilidad se muestra en la Tabla 4.19.

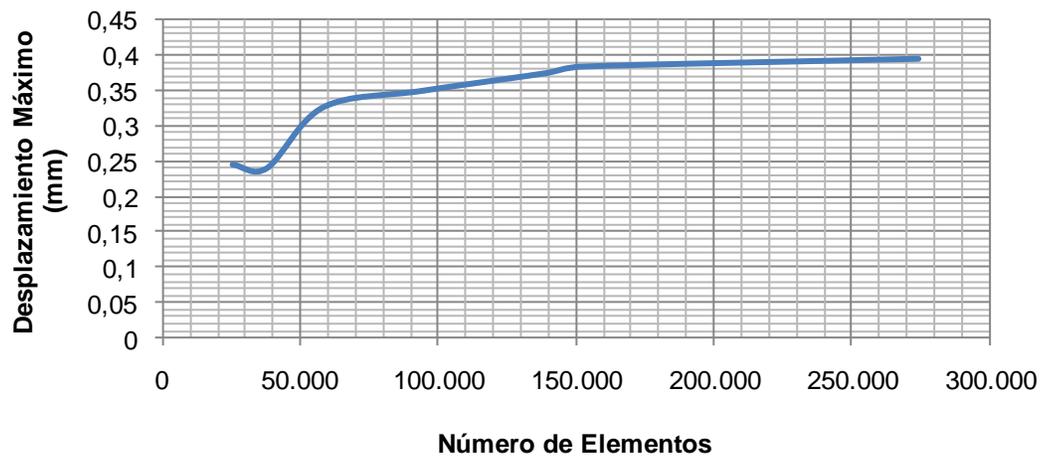
**Tabla 4.19.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción “B” según la norma ISO 15501.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
25.165	98,091	--	0,245	--
37.662	69,151	-29,503	0,240	-2,040
58.234	66,314	-4,102	0,326	35,833
94.241	58,146	-12,317	0,349	7,055
139.448	65,103	11,964	0,374	7,163
152.152	63,644	-2,241	0,383	2,406
274.311	65,615	3,096	0,394	2,872

La convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos presentes en la estructura se expone en las Figuras 4.48 y 4.49.



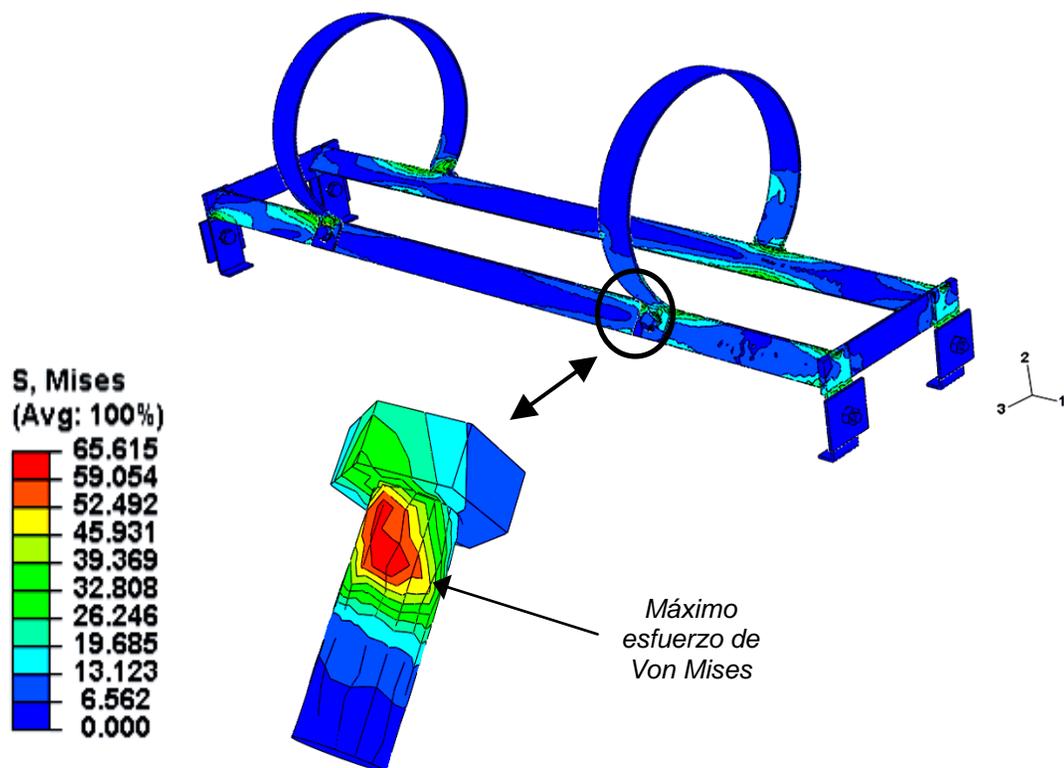
**Figura 4.48.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga lateral según norma *ISO 15501*.



**Figura 4.49.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga lateral según norma *ISO 15501*.

En este caso, el resultado numérico converge para una malla de 274.311 elementos, con el que se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 65,615 \text{ MPa}$  y  $D_{\text{Máx}} = 0,394 \text{ mm}$ , con un error de 3,096% con y 2,872% respectivamente, lo cual se considera una muy buena aproximación en el análisis de MEF. Estos mismos resultados corresponden a la norma *ANSI-NFPA 52*, ya que las condiciones de la prueba y la magnitud de la fuerza aplicada son iguales.

La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se presenta en la Figura 4.50.



**Figura 4.50.** Distribución de esfuerzos de Von Mises durante la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción “B” según la norma *ISO 15501* (Valores en MPa).

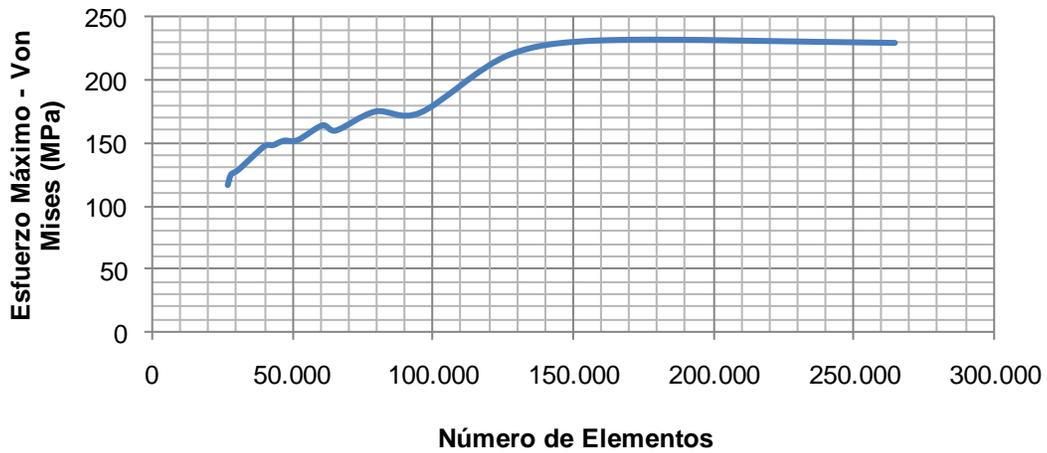
#### 4.2.2.4. Aplicación de carga ascendente según norma ANSI-NFPA 52.

En la Tabla 4.20 se muestra el análisis de sensibilidad del modelo para la condición de estudio.

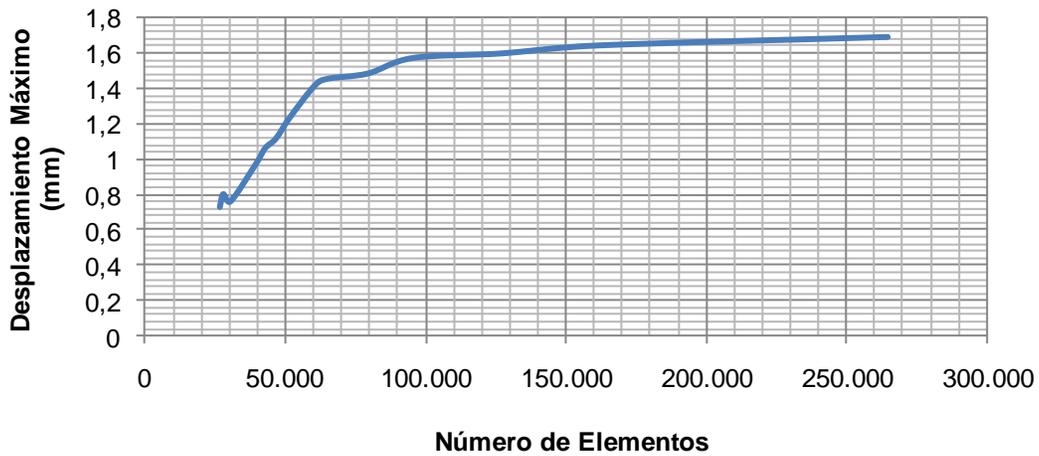
**Tabla 4.20.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción “B” según norma ANSI-NFPA 52.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
26.630	116,368	--	0,733	--
27.886	124,927	7,356	0,806	9,439
30.484	128,544	2,897	0,765	-5,000
39.803	147,429	14,688	0,983	28,945
42.802	148,158	0,495	1,064	8,163
46.657	151,717	2,402	1,118	4,716
51.631	152,256	0,355	1,237	10,810
60.514	163,984	7,704	1,416	14,634
65.245	159,812	-2,542	1,454	2,836
79.425	175,000	9,505	1,483	2,068
95.411	174,086	-0,525	1,570	6,351
127.244	220,324	26,564	1,596	1,417
162.102	231,874	5,242	1,641	2,799
264.728	229,728	-0,925	1,688	2,864

En las Figuras 4.51 y 4.52 se muestra la convergencia del modelo según los esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos obtenidos.



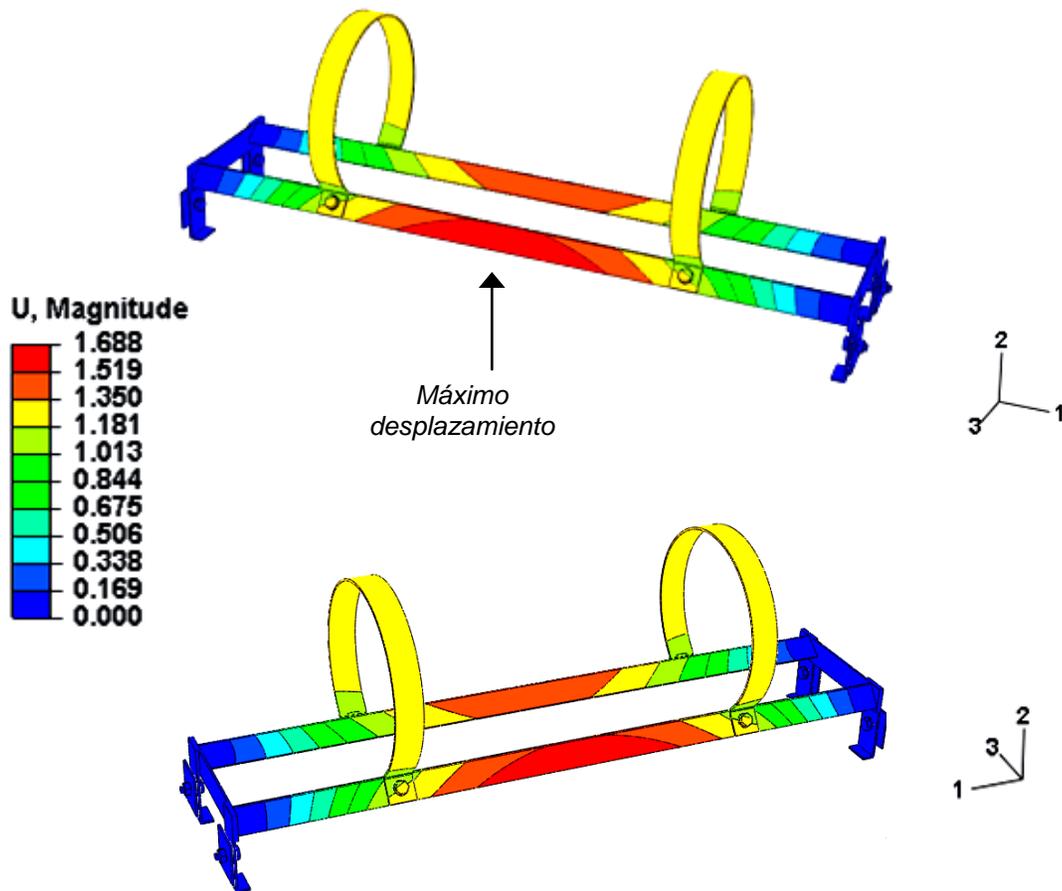
**Figura 4.51.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga ascendente según norma *ANSI-NFPA 52*.



**Figura 4.52.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga ascendente según norma *ANSI-NFPA 52*.

Para este caso, el resultado numérico converge para una malla de 264.728 elementos, donde se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 229,728$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 1,688$  mm, presentando un error de 0,925% y 2,864% respectivamente. En el análisis del MEF esto constituye una buena aproximación.

La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se observa en la Figura 4.53.



**Figura 4.53.** Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga ascendente en la estructura de sujeción "B" según la norma ANSI-NFPA 52 (Valores en mm).

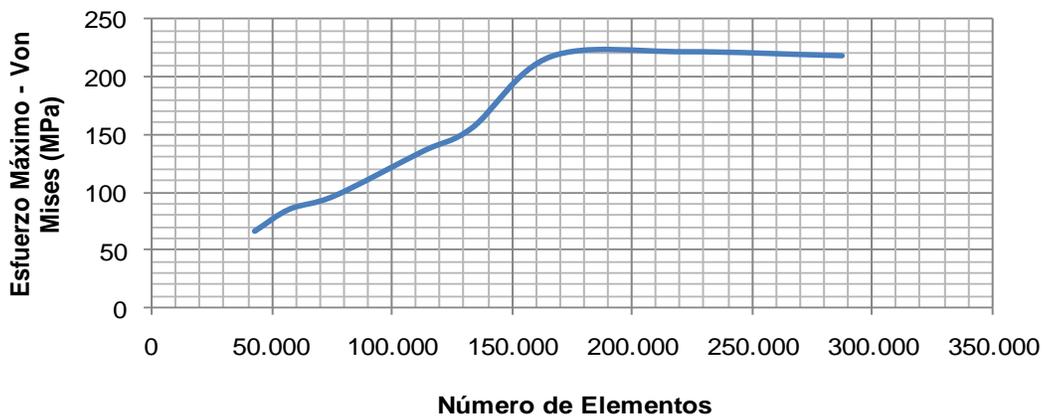
4.2.2.5. *Aplicación de carga descendente según norma ANSI-NFPA 52.*

El análisis de sensibilidad del modelo para la aplicación de la carga en estudio se presenta en la Tabla 4.21.

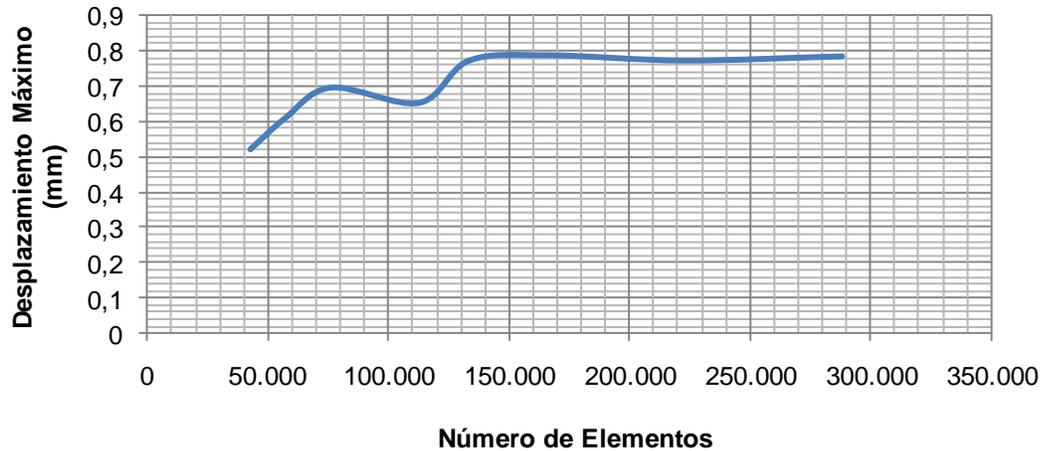
**Tabla 4.21.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga descendente según norma ANSI-NFPA 52.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
42.530	67,031	--	0,518	--
56.950	85,934	28,200	0,608	17,374
75.934	97,589	13,562	0,696	14,473
112.505	135,741	39,094	0,652	-6,321
133.299	156,191	15,065	0,774	18,711
166.288	217,755	39,415	0,789	1,937
222.056	221,950	1,926	0,774	-1,901
287.816	218,513	-1,548	0,786	1,550

Para la condición evaluada, la convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos se presenta en las Figuras 4.54 y 4.55.

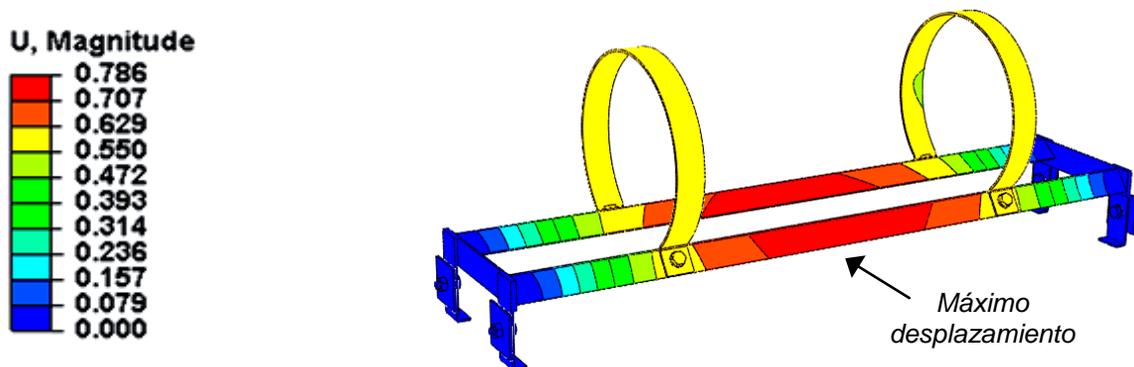


**Figura 4.54.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción "B" durante la aplicación de la carga descendente según norma ANSI-NFPA 52.



**Figura 4.55.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga descendente según norma *ANSI-NFPA 52*.

Como se observó anteriormente, el resultado numérico converge para una malla de 287.816 elementos, con un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 218,513$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 0,786$  mm, obteniéndose un error de 1,548% y 1,550% respectivamente. Esto representa una muy buena aproximación en el análisis de MEF. La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se muestra en la Figura 4.56.

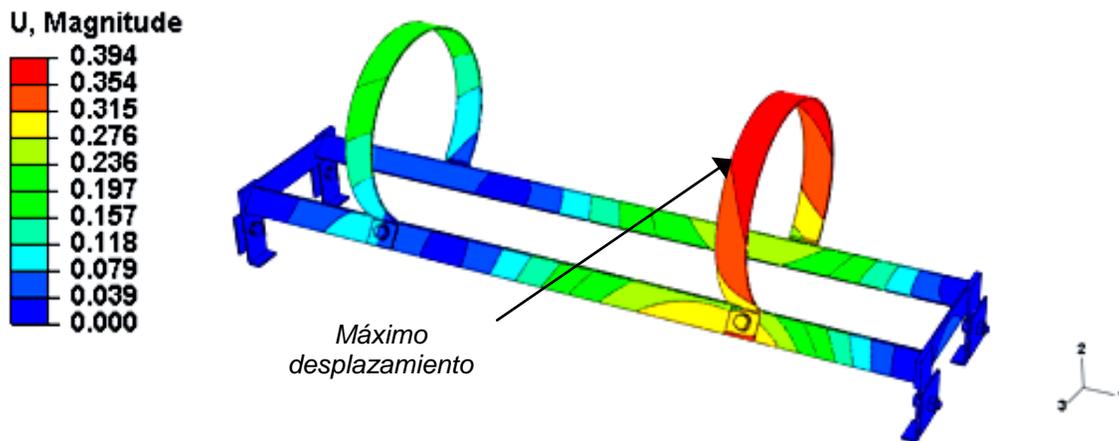


**Figura 4.56.** Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga descendente en la estructura de sujeción “B” según la norma *ANSI-NFPA 52* (Valores en mm).

#### 4.2.2.6. Aplicación de carga lateral según norma ANSI-NFPA 52.

Como se indicó en el punto 4.2.2.3, los resultados numéricos correspondientes a este estado de carga son los mismos de la Tabla 4.19.

La zona donde se registra el máximo desplazamiento se observa en la Figura 4.57



**Figura 4.57.** Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga lateral en la estructura de sujeción "B" según la norma ANSI-NFPA 52 (Valores en mm).

#### 4.2.2.7. Aplicación de carga longitudinal según norma ANSI-NFPA 52.

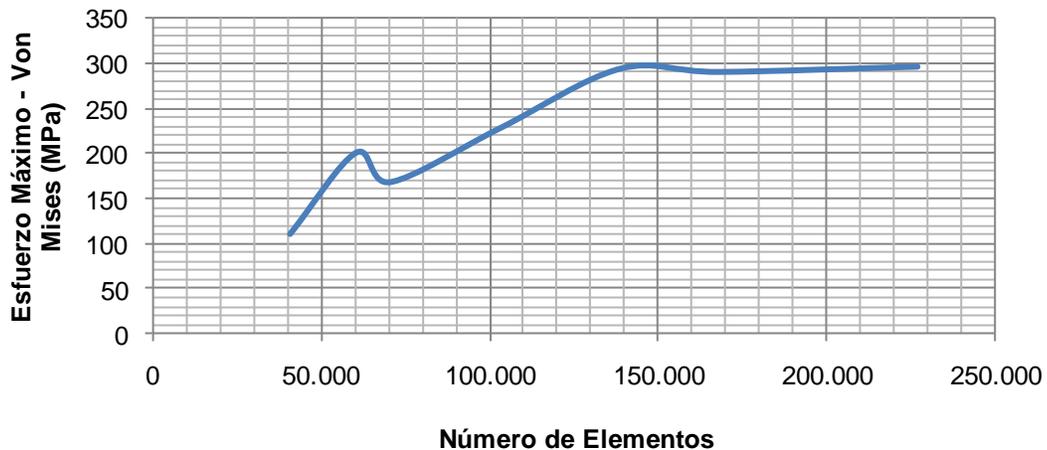
En este caso, la carga fue aplicada en un solo sentido, ya que el modelo es simétrico, por lo que no es necesario aplicar la carga delantera y luego la posterior.

Para esta carga, el análisis de sensibilidad se muestra en la Tabla 4.22.

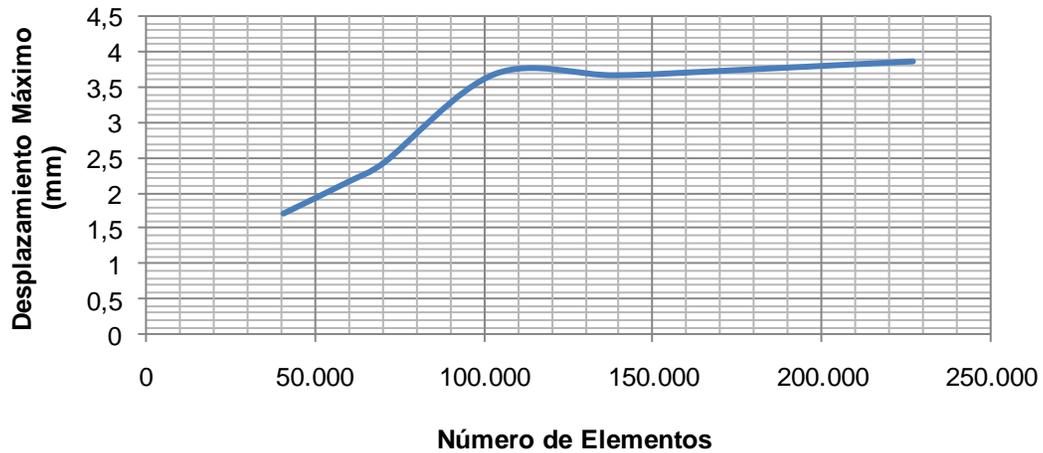
**Tabla 4.22.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción “B” según norma *ANSI-NFPA 52*.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
40.664	111,470	--	1,700	--
60.371	201,345	80,627	2,163	26,525
70.486	168,736	-16,195	2,425	12,059
103.271	228,674	35,521	3,683	52,276
138.803	293,918	28,531	3,665	-0,380
168.216	290,356	-1,211	3,724	1,609
227.156	296,124	1,986	3,863	3,732

La convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos presentes en la estructura se expone en las Figuras 4.58 y 4.59.



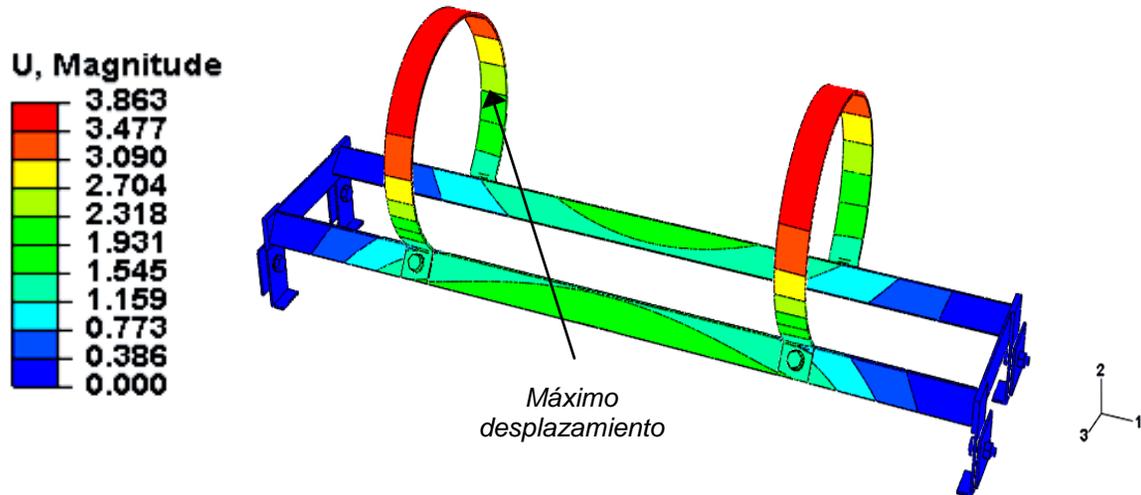
**Figura 4.58.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga longitudinal según norma *ANSI-NFPA 52*.



**Figura 4.59.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” durante la aplicación de la carga longitudinal según norma *ANSI-NFPA 52*.

En este caso, el resultado numérico converge para una malla de 227.156 elementos, con el que se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 296,124$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 3,863$  mm, con un error de 1,986% y 3,732% respectivamente, lo cual se considera una muy buena aproximación en el análisis de MEF.

La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se presenta en la Figura 4.60.



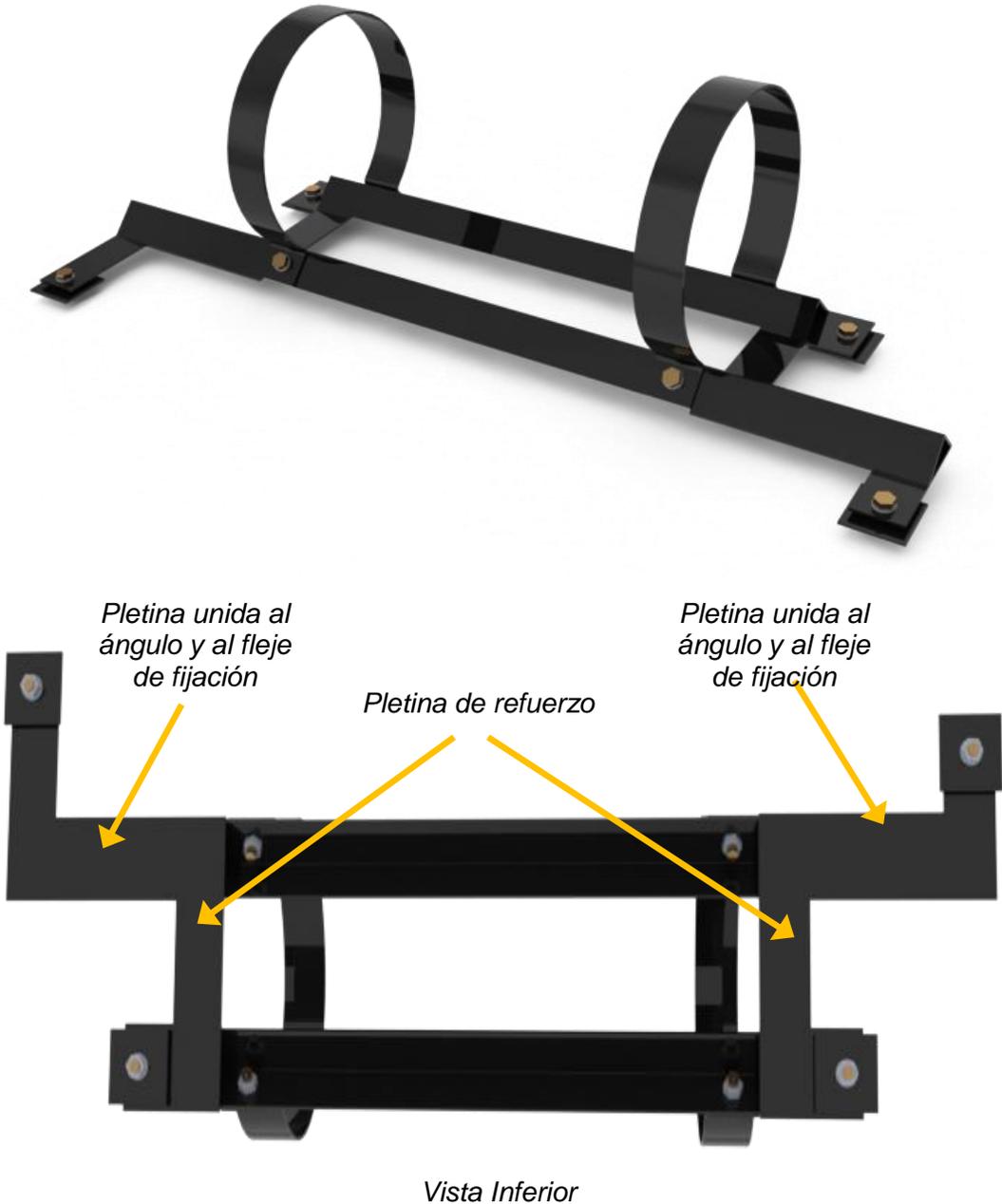
**Figura 4.60.** Distribución de desplazamientos durante la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción “B” según la norma *ANSI-NFPA 52* (Valores en mm).

#### **4.2.3. Modificaciones propuestas para la estructura de sujeción “A”**

Como se observa en los resultados obtenidos, para la carga longitudinal posterior correspondiente a la norma *ISO 15501*, el máximo esfuerzo de Von Mises generado en la estructura supera el esfuerzo de fluencia del material, más no la tensión máxima. Por esta razón, se ha propuesto una modificación del diseño original, que permita optimizar el comportamiento de la estructura.

Dicha modificación se fundamenta en la instalación de 2 pletinas rectangulares, las cuales deben unirse a los ángulos estructurales en su parte inferior. Estas pletinas se colocarán en los extremos de cada ángulo y también deben unirse a los flejes de fijación de la estructura (Ver Figura 4.61). Un detalle importante es que las pletinas de refuerzo que posee originalmente la estructura, en este nuevo diseño deben situarse entre el borde de los ángulos estructurales y los agujeros de fijación de los aros, uniéndose con las pletinas antes mencionadas y los flejes de fijación más cortos de la estructura. De esta manera

se dará mayor rigidez al modelo en esas zonas de unión. En el APÉNDICE B se muestra de manera detallada las especificaciones de este diseño.



**Figura 4.61.** Representación en CAD de la estructura de sujeción “A” modificada.

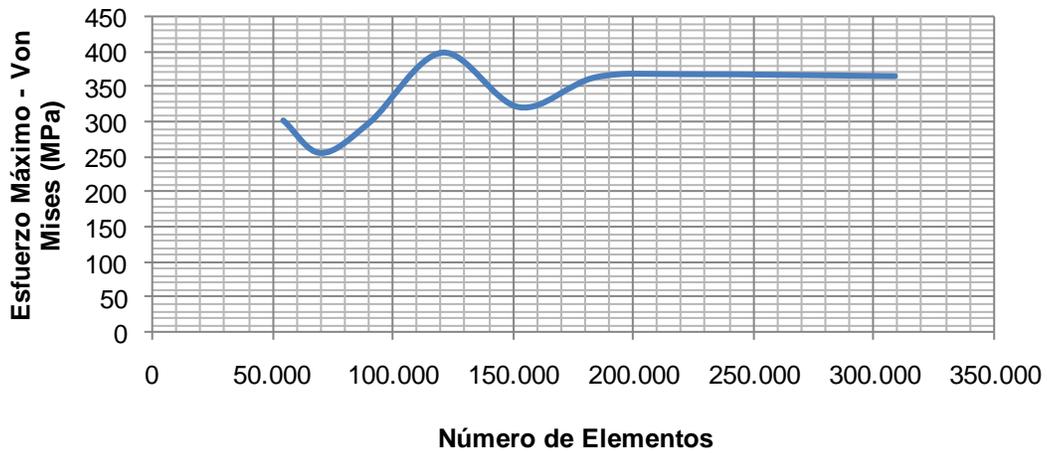
En este caso solo se simuló la aplicación de la carga posterior establecida en la norma ISO 15501, ya que es la condición más crítica.

El análisis de sensibilidad del modelo se presenta en la Tabla 4.23.

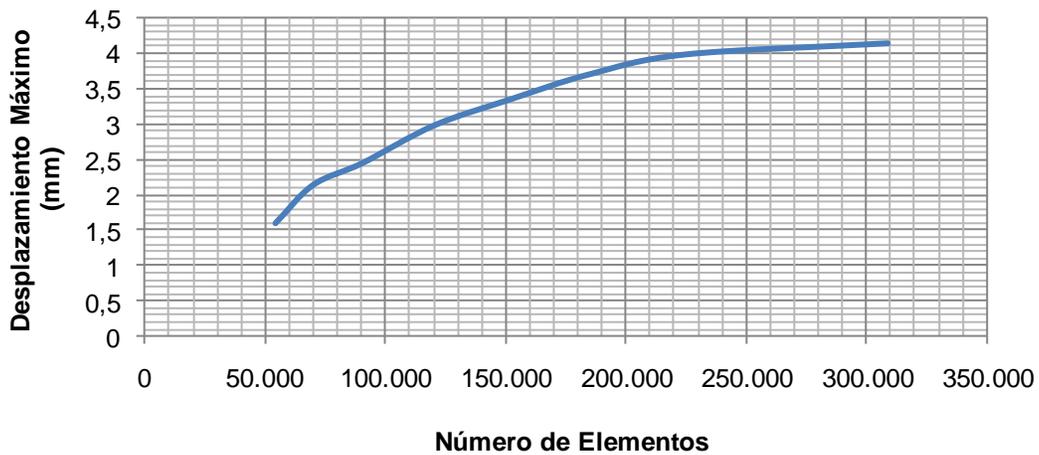
**Tabla 4.23.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga posterior en la estructura de sujeción “A” modificada, según norma *ISO 15501*.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
54.455	301,154	--	1,594	--
70.116	254,462	-15,504	2,137	34,065
90.478	298,745	17,403	2,445	14,413
120.567	398,471	33,382	2,983	22,004
152.486	320,176	-19,649	3,355	12,471
184.783	363,451	13,516	3,704	10,402
224.732	367,489	1,111	3,986	7,613
308.678	364,741	-0,748	4,143	3,939

Para este modelo, la convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos se presenta en las Figuras 4.62 y 4.63.



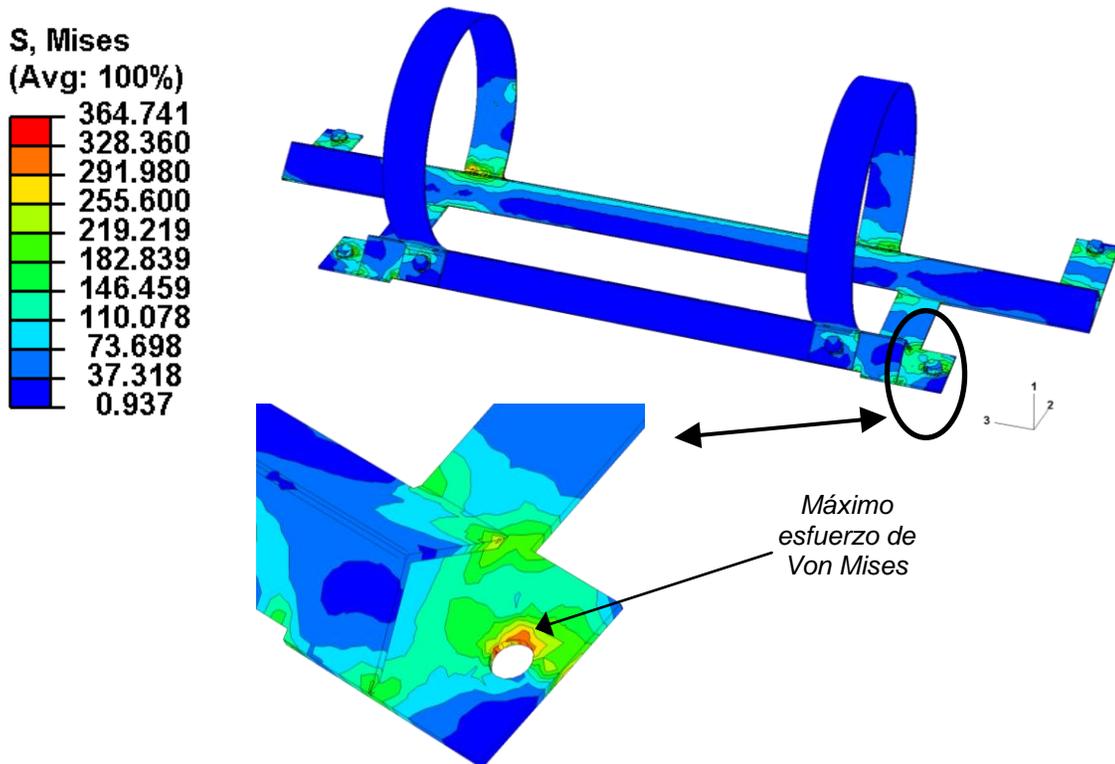
**Figura 4.62.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” modificada, durante la aplicación de la carga posterior según norma *ISO 15501*.



**Figura 4.63.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “A” modificada, durante la aplicación de la carga posterior según norma *ISO 15501*.

Como se evidencia en los datos antes mostrados, el resultado numérico converge para una malla de 308.678 elementos, específicamente para un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 364,741$  MPa y  $D_{\text{Máx}} = 4,143$  mm, con un error de 0,748% y 3,939% respectivamente. Esto representa una muy buena aproximación en el análisis de MEF.

La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se presenta en la Figura 4.64.



**Figura 4.64.** Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “A” modificada, durante la aplicación de la carga posterior según la norma ISO 15501 (Valores en MPa).

#### **4.2.4. Modificaciones propuestas para la estructura de sujeción “B”**

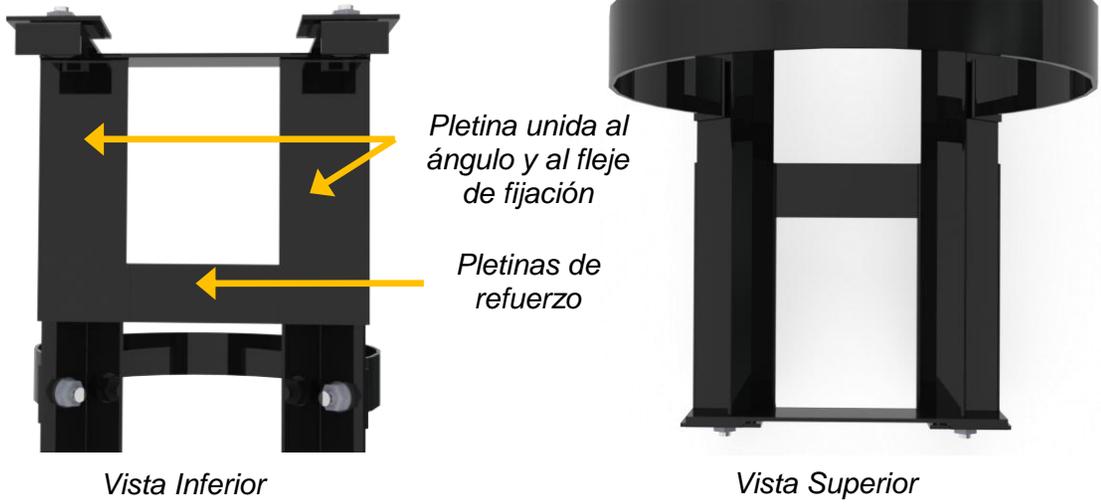
De acuerdo a los resultados obtenidos, para la carga longitudinal correspondiente a la norma *ISO 15501*, el máximo esfuerzo de Von Mises generado en la estructura supera la tensión máxima del material, lo que representa un desprendimiento de los elementos en la zona esforzada.

Debido a las irregularidades que presenta el diseño original, se ha propuesto una modificación, que garantizará el buen funcionamiento de la estructura cuando esta se encuentre sometida a la condición crítica.

La modificación se fundamenta en la instalación de 4 pletinas rectangulares encargadas de reforzar los ángulos estructurales en sus puntos de unión con los flejes de fijación. Además, otras 2 pletinas (Pletina de refuerzo) se encargaran de unir los ángulos estructurales y las pletinas antes mencionadas, con el objetivo de aportar mayor rigidez en la estructura.

Es importante resaltar que las pletinas deben ir soldadas a la estructura de la misma manera en que se encuentra el resto de las piezas metálicas. En el APÉNDICE B se muestra de manera detallada las especificaciones de este diseño.

El diseño propuesto para la estructura de sujeción “B” se muestra en la Figura 4.65.



**Figura 4.65.** Representación en CAD de la estructura de sujeción “B” modificada.

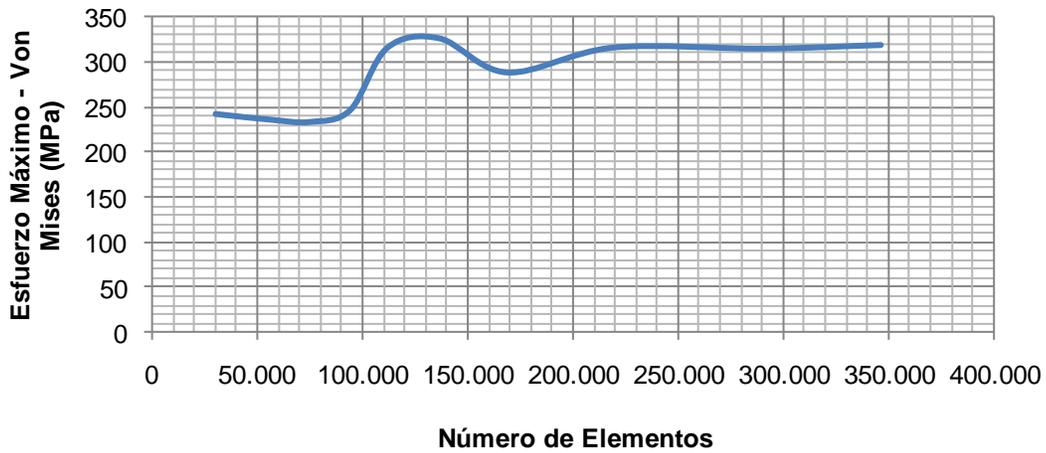
En este caso solo se simuló la aplicación de la carga longitudinal establecida en la norma *ISO 15501*, ya que esta representa la condición más crítica a la que puede estar sometida la estructura.

Para dicha condición, el análisis de sensibilidad se muestra en la Tabla 4.24.

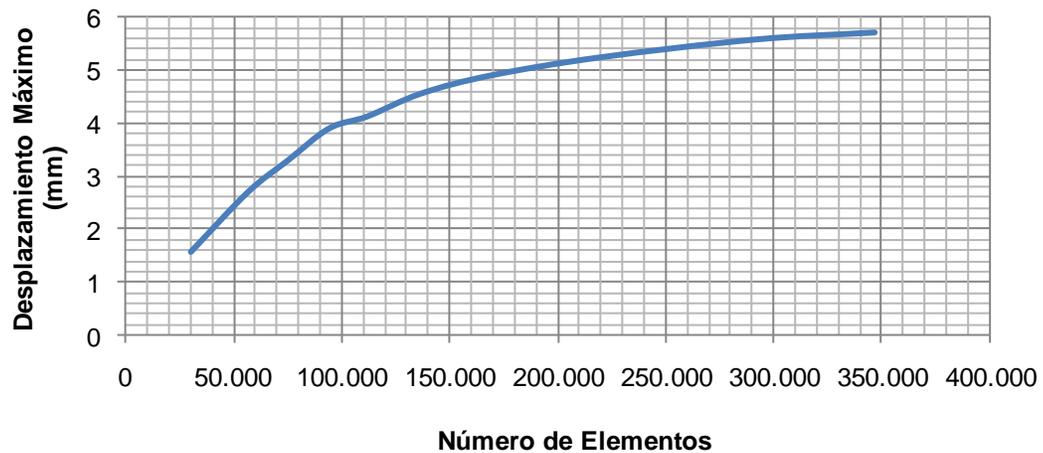
**Tabla 4.24.** Resultados numéricos para la aplicación de la carga longitudinal en la estructura de sujeción “B” modificada, según norma *ISO 15501*.

Número de elementos	Esfuerzo Máximo de Von Mises (MPa)	Error Esfuerzo Máximo de Von Mises (%)	Desplazamiento Máximo (mm)	Error Desplazamiento Máximo (%)
29.915	241,078	--	1,582	--
56.401	234,688	-2,651	2,710	71,302
74.996	232,270	-1,030	3,310	22,140
93.956	245,328	5,622	3,908	18,066
111.689	314,716	28,284	4,134	5,783
136.443	324,965	3,257	4,563	10,377
168.719	287,145	-11,638	4,904	7,473
219.377	314,879	9,659	5,245	6,954
290.832	313,617	-0,401	5,579	6,368
346.391	317,589	1,267	5,713	2,402

La convergencia de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos máximos presentes en la estructura se expone en las Figuras 4.66 y 4.67.



**Figura 4.66.** Diagrama de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” modificada, durante la aplicación de la carga longitudinal según norma *ISO 15501*.

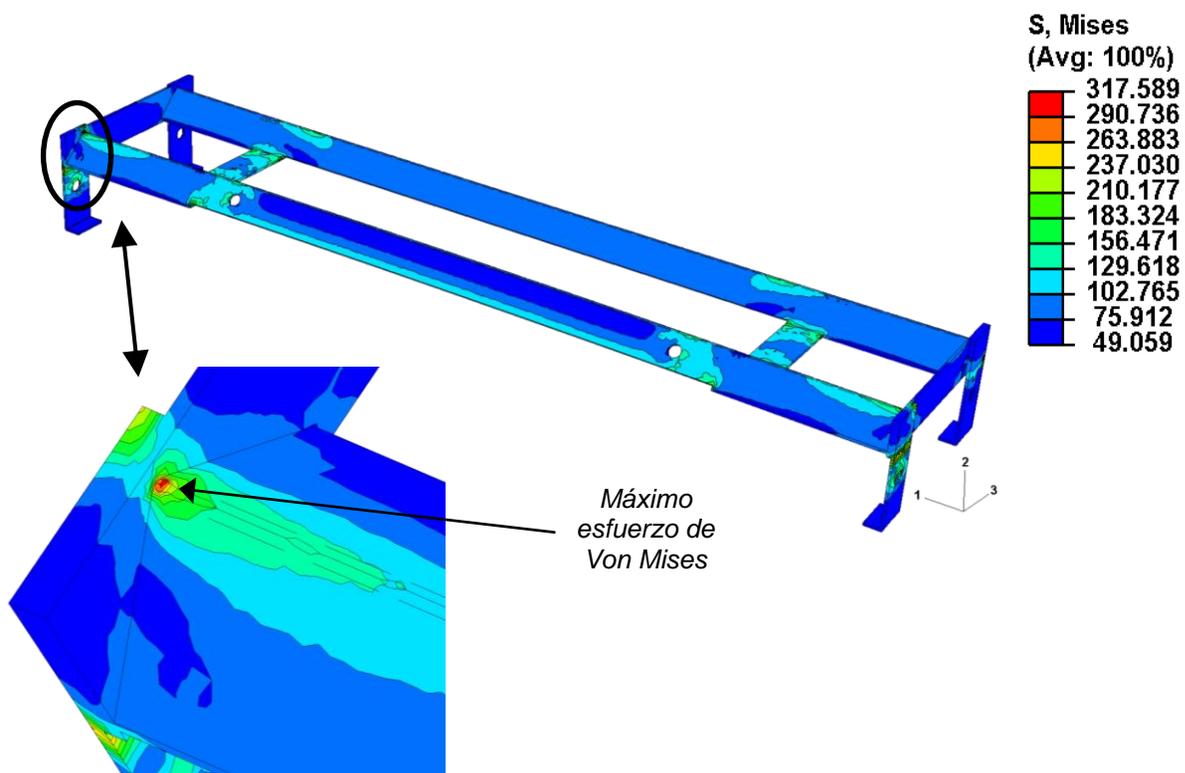


**Figura 4.67.** Diagrama de convergencia del desplazamiento máximo respecto al número de elementos de la estructura de sujeción “B” modificada, durante la aplicación de la carga longitudinal según norma *ISO 15501*.

En este caso, el resultado numérico converge para una malla de 346.391 elementos, con el que se obtiene un valor de  $\sigma_{\text{Máx.V.M.}} = 317,589$  MPa y

$D_{M\acute{a}x} = 5,713 \text{ mm}$ , con un error de 1,267% y 2,402% respectivamente, lo cual se considera una muy buena aproximación en el análisis de MEF.

La zona donde se registra el máximo esfuerzo de Von Mises se presenta en la Figura 4.68.



**Figura 4.68.** Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura de sujeción “B” modificada, durante la aplicación de la carga longitudinal según la norma ISO 15501 (Valores en MPa).

# **CAPÍTULO 5**

## *Análisis de Resultados*

---

En este capítulo se presentan las comparaciones entre los resultados numéricos y los experimentales, con el propósito de validar el programa computacional; además, se muestra el análisis de las simulaciones de cada una de las estructuras de sujeción para los distintos parámetros evaluados.

### **5.1. Validación del Programa Computacional**

#### **5.1.1. Simulación de Ensayo Físico**

- *Puntos de estudio en los aros:*

Para entender el comportamiento de los aros se dividirá el análisis de la siguiente manera: dos puntos que se encuentran frente al punto de aplicación de la carga y dos que se encuentran en la parte posterior (Esto tomando como referencia el sentido de aplicación de la carga). Para los dos primeros puntos se tienen zonas sometidas a tracción enmarcadas en el dobléz del aro; esto se debe a que la carga trata de abatir el dobléz generando así el estiramiento de las fibras (Ver Figura 4.5); también se observan zonas sometidas a compresión a lo largo de la cara externa del aro, debido a que la aplicación de la carga trata de

regresar el aro a su posición original (lámina recta). Hay que resaltar que para el punto de estudio 3, la zona sometida a tracción es un poco más extensa respecto al punto 2 ya que este aro se desplaza mucho más que el otro, debido a que el fleje de fijación más cercano es el más largo de la estructura (Punto de estudio 4), por ende experimenta un momento flector mayor que en el fleje corto (Punto de estudio 1). Los rangos de esfuerzos correspondientes a la ubicación de la galga están definidos de forma tal que para los que se encuentren cerca de la zona apernada estarán presentando esfuerzos a tracción, el que se encuentre más alejado del perno comprenderá valores de compresión y los que se encuentren en la parte media de las zonas antes mencionadas comprenderán valores de tracción y compresión.

Para el análisis de los puntos que se encuentran posteriores a la carga, los principios básicos de su comportamiento son similares a lo antes descrito; sin embargo, hay que resaltar que en estos casos las zonas de compresión son mayores.

De acuerdo a lo antes mencionado se obtuvo:

Para carga de 1.170 N:

- Punto de estudio 2: la galga se encuentra entre valores de compresión y tracción de acuerdo a su ubicación geométrica (-0,374; 2,435) MPa (Ver Figura 4.5).
- Punto de estudio 3: está comprendido en un rango de esfuerzos a tracción y compresión (-2,232; 2,968) MPa; en este caso el punto tiende hacia la tracción ya que limita con una zona de tracción pura (Ver Figura 4.6).
- Punto de estudio 5: Comprende un rango de compresión y tracción, debido a la ubicación geométrica de la galga (-0,374; 2,435) MPa (Ver Figura 4.5).

- Punto de estudio 6: se encuentra comprendido entre valores de compresión y tracción (-2,232; 0,368) MPa. A pesar de que se aproxima a una zona de tracción, se establece una tendencia hacia la compresión, ya que el valor de tensión en la línea que divide las regiones es pequeño (Ver Figura 4.6).

Para carga de 2.340 N:

- Punto de estudio 2: está comprendido en un rango de compresión y tracción (-1,108; 3,207) MPa, sin embargo, presenta una tendencia a valores de tracción ya que se encuentra cerca a zonas que poseen tracción pura (Ver Figura 4.11).
- Punto de estudio 3: en este caso se obtuvo valores comprendidos entre compresión y tracción (-0,264; 3,859) MPa, no obstante, se observa que la tracción predomina ya que el valor de compresión es mínimo y el punto de estudio se encuentra alejado de las regiones sometidas a compresión pura (Ver Figura 4.12).
- Punto de estudio 5: Comprende un rango de compresión y tracción, debido a la ubicación geométrica de la galga (-1,108; 3,207) MPa (Ver Figura 4.11).
- Punto de estudio 6: se encuentra en una zona con valores de compresión y tracción, presentando una tendencia hacia los valores de compresión (-4,388; 3,859) MPa. Esto se debe al incremento de la carga, lo cual contribuyó a crear zonas de compresión más extensa y de mayor magnitud, encontrándose muy cerca de la ubicación de la galga (Ver Figura 4.12).

- *Puntos de estudio en las pletinas:*

Para comprender mejor los resultados numéricos obtenidos para cada punto de estudio, primeramente se debe mencionar que las pletinas de sujeción son sometidas a flexión en el momento en que el ángulo de la estructura les transmite la carga, esto debido a que el tornillo restringe el movimiento de las

pletinas en las cercanías del agujero. Por tanto, en la dirección del eje coordenado 3 y del eje 2, las pletinas presentan esfuerzos de compresión en los alrededores del agujero, y tracción a medida que se aleja de esta zona.

De acuerdo a lo antes mencionado se obtuvo:

Para carga de 1.170 N:

- Punto de estudio 1: en la dirección del eje coordenado 2, el punto de estudio se encuentra en una zona sometida a tracción pura (4,450; 15,226) MPa (Ver Figura 4.4); por otro lado, en la dirección del eje coordenado 3, el punto se encuentra en una zona sometida tanto a tracción como a compresión (-5,384; 5,814) MPa, pero en este caso el punto tiende más hacia la compresión ya que se aproxima a las regiones sometidas a compresión pura (Ver Figura 4.3).
- Punto de estudio 4: se encuentra en una zona sometida tanto a tracción como a compresión en la dirección del eje coordenado 2 (-6,325; 4,450) MPa. Dentro de este rango se puede decir que el punto de estudio tiende hacia la compresión ya que se aproxima más a las zonas que están sometidas a compresión pura (Ver Figura 4.4). En la dirección del eje coordenado 3, el punto de estudio también se encuentra en una zona sometida tanto a tracción como a compresión, donde el comportamiento del punto tiende más hacia la compresión ya que se aproxima hacia las regiones de compresión (Ver Figura 4.3).

Para carga de 2.340 N:

- Punto de estudio 1: en la dirección del eje coordenado 2, el efecto de tracción aumenta (4,240; 21,336) MPa, cubriendo completamente la zona en donde se encuentra el punto de estudio (Ver Figura 4.10). En cuanto a los esfuerzos generados en la dirección del eje coordenado 3, el punto se

encuentra en una zona sometida tanto a tracción como a compresión (-5,741; 11,735) MPa, presentando una tendencia hacia la compresión; de hecho, en comparación a la carga anterior, se evidencia un incremento de las zonas sometidas a compresión pura y que son cercanas al punto (Ver Figura 4.9).

- Punto de estudio 4: de igual manera se encuentra en una zona sometida tanto a tracción como a compresión en la dirección del eje coordenado 2 (-12,856; 4,240) MPa, acercándose más hacia las regiones de compresión (Ver Figura 4.10). En la dirección del eje coordenado 3 también se ubica en un rango de compresión y tracción (-23,217; 11,735) MPa, tendiendo más hacia la compresión por su cercanía a las zonas comprimidas (Ver Figura 4.9).

### **5.1.2. Ensayo Físico**

En las Tablas 5.1 y 5.2 se observa que los valores obtenidos por las galgas se encuentran muy cercanos a los rangos de esfuerzos establecidos por el simulador, destacando que de los dieciséis datos comparados, solo dos se alejan notoriamente de los límites establecidos. Estas diferencias se esperaban desde un principio ya que en este tipo de evaluaciones siempre influyen diversas variables, como por ejemplo las pequeñas discrepancias geométricas que existen entre el modelo virtual y la estructura real, las consideraciones ideales que toma el simulador de un material Isotrópico, la no consideración de concentración de esfuerzos en las uniones durante la simulación; entre otros. Por lo tanto se puede asegurar que los resultados obtenidos con el simulador son muy cercanos a la realidad, ya que el análisis por elementos finitos es un método aproximado.

**Tabla 5.1.** Comparación de resultados numéricos y experimentales obtenidos durante la aplicación de la carga de 1.170 N.

Punto de estudio	Resultados numéricos (MPa)		Resultados experimentales (MPa)	
	Eje coordenado 2	Eje coordenado 3	Eje coordenado 2	Eje coordenado 3
1	[4,450; 15,226]	[-5,834;5,814]	3,826	-0,905
2	--	[-0,374; 2,435]	--	0,400
3	--	[-2,232; 0,368]	--	0,992
4	[-6,325; 4,450]	[-5,384; 5,814]	-5,680	-10,334
5	--	[-0,374; 2,435]	--	-1,079
6	--	[-2,232; 0,368]	--	-2,071

**Tabla 5.2.** Comparación de resultados numéricos y experimentales obtenidos durante la aplicación de la carga de 2.340 N.

Punto de estudio	Resultados numéricos (MPa)		Resultados experimentales (MPa)	
	Eje coordenado 2	Eje coordenado 3	Eje coordenado 2	Eje coordenado 3
1	[4,240; 21,336]	[-5,714; 11,735]	7,133	-3,072
2	--	[-1,108; 3,207]	--	2,251
3	--	[-0,264; 3,859]	--	2,825
4	[-12,856; 4,240]	[-23,217; 11,735]	-14,530	-24,033
5	--	[-1,108; 3,207]	--	-2,170
6	--	[-4,388; 3,859]	--	-3,512

## 5.2. Simulaciones

El análisis numérico muestra la distribución de esfuerzos de Von Mises generados sobre los nodos a partir de la simulación de los distintos estados de carga establecidos en las normas *ISO 15501* y *ANSI-NFPA 52*. De acuerdo con este criterio el modelo falla cuando en alguno de sus puntos la energía de

distorsión por unidad de volumen supera el límite de fluencia del material usado (Norton, 2001). También se muestran los desplazamientos nodales obtenidos para cada condición evaluada.

A continuación se presenta el análisis de cada uno de los resultados obtenidos.

### **5.2.1. Estructura de Sujeción “A”**

#### *5.2.1.1. Aplicación de carga posterior según norma ISO 15501.*

En la Figura 4.15 se observa que el esfuerzo máximo de Von Mises (358,920 MPa) ocurre en la zona donde se une el ángulo y el fleje de fijación más corto. Esto se debe a que los aros tratan de hacer girar el ángulo justo cuando la carga es aplicada, trayendo como consecuencia que el esfuerzo se concentre justo en la zona antes mencionada. Es importante resaltar el esfuerzo máximo en esta región se encuentra en la zona plástica del material; sin embargo, la estructura no falla para el criterio establecido por la norma ya que no ocurre un desprendimiento del cilindro.

#### *5.2.1.2. Aplicación de carga delantera según norma ISO 15501.*

En la Figura 4.18 se observa que el esfuerzo máximo de Von Mises (287,853 MPa) se ubica en los tornillos que fijan las pletinas de sujeción más cortas de la estructura. Dicho esfuerzo no supera el esfuerzo máximo a la tensión de los tornillos, por lo tanto, para esta carga la estructura cumple con el criterio de aceptación.

*5.2.1.3. Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501, en dirección negativa respecto al eje coordenado 3.*

En la Figura 4.21 se observa que el esfuerzo máximo de Von Mises (84,291 MPa) se ubica en uno de los tornillos que sujeta el aro a la estructura. Dicho esfuerzo no supera el esfuerzo máximo a la tensión de los tornillos, por lo tanto, para esta carga la estructura cumple con el criterio de aceptación.

*5.2.1.4. Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501, en dirección positiva respecto al eje coordenado 3.*

En la Figura 4.24 se observa que de igual manera el esfuerzo máximo de Von Mises (71,922 MPa) se ubica en uno de los tornillos que sujeta el aro a la estructura, y no supera el esfuerzo máximo a la tensión de los tornillos, por lo tanto, para esta carga la estructura cumple con el criterio de aceptación.

*5.2.1.5. Aplicación de carga ascendente según norma ISO 15501.*

En este caso el esfuerzo máximo de Von Mises (83,487 MPa) se ubica en el tornillo que fija al fleje más largo de la estructura al vehículo (Ver Figura 4.27). Este efecto se debe a que dicho fleje experimenta un mayor desplazamiento, lo que se traduce en que el tornillo sea el componente más esforzado de la estructura. Como el esfuerzo no supera el esfuerzo máximo a la tensión de los tornillos, la estructura cumple con el criterio de aceptación.

*5.2.1.6. Aplicación de cargas según norma ANSI-NFPA 52.*

Para cada una de las condiciones evaluadas, se obtuvieron desplazamientos máximos menores a 13 mm, es decir, se encuentran por debajo

del límite establecido en la norma; por lo tanto, la estructura de sujeción “A” cumple con el criterio de aceptación.

Es importante resaltar que en todos los casos evaluados los desplazamientos máximos se ubicaron en los aros, ya que estos elementos poseen menor restricción al movimiento en comparación a los demás componentes de la estructura.

### **5.2.2. Estructura de Sujeción “B”**

#### *5.2.2.1. Aplicación de carga longitudinal según norma ISO 15501.*

En la Figura 4.44 se observa que el esfuerzo máximo de Von Mises (681,679 MPa) se ubica en la unión entre del ángulo y la pletina que es usada para colocar los tornillos de anclaje al vehículo. Sucede en dicho lugar ya que durante la aplicación de la carga sobre el cilindro, los aros giran y producen la flexión de los ángulos; en consecuencia, la zona en donde se encuentra restringido el movimiento es la más esforzada. Como el esfuerzo máximo de Von Mises se encuentra por encima del valor de tensión máxima del material, se determina que en dicha zona los elementos de la estructura presentan fractura, lo cual indica un desprendimiento del cilindro; por lo tanto, bajo criterio de esta norma, falla.

#### *5.2.2.2. Aplicación de carga ascendente según norma ISO 15501.*

Al aplicar la carga se obtuvo el máximo esfuerzo de Von Mises (96,722 MPa) en uno de los tornillos que sujeta a los aros (Ver Figura 4.47). Este no supera el esfuerzo de fluencia del material, por lo tanto se cumple con el criterio de aprobación establecido por la norma.

#### *5.2.2.3. Aplicación de carga lateral según norma ISO 15501.*

Al aplicar la carga lateral, el máximo esfuerzo de Von Mises (65,615 MPa) se situó en uno de los tornillos que sujeta a los aros (Ver Figura 4.50). Esto se debe a que el tornillo experimenta un efecto de corte debido a la manera en que el aro transmite la carga. A pesar de que el tornillo posee el máximo esfuerzo, este no supera el esfuerzo de fluencia del material, por lo tanto esto conlleva a que se cumpla con el criterio establecido.

#### *5.2.2.4. Aplicación de cargas según norma ANSI-NFPA 52.*

Los desplazamientos obtenidos por el simulador para cada una de las condiciones establecidas en la norma no superan los 13 mm, por lo que la estructura de sujeción “B” satisface el criterio de aceptación.

En este caso, solo en la aplicación de carga lateral y longitudinal el desplazamiento máximo se registró en los aros; en cambio, para las cargas ascendente y descendente el desplazamiento se produjo en los ángulos estructurales. Este último efecto se debe a que los ángulos actúan como una viga empotrada en ambos extremos, que al ser sometida a cargas verticales tiende a flexionarse.

### **5.2.3. Modificaciones propuestas**

#### *5.2.3.1. Modelo propuesto para la estructura de sujeción “A”.*

La estructura de sujeción “A” al ser sometida a la carga posterior estipulada en la norma *ISO 15501* no presenta un esfuerzo de Von Mises máximo (358,920 MPa) mayor que la resistencia a la tracción del material, más sin embargo, supera el esfuerzo de fluencia. Esto genera cierta incertidumbre en cuanto a la

confiabilidad de la estructura. Por esta razón se propuso una pequeña modificación al modelo original, en base al hecho de que el esfuerzo máximo tiene lugar en uno de sus flejes de fijación y se encuentra precisamente en la unión del fleje y el ángulo.

Para contrarrestar el efecto producido en la zona antes mencionada, se propone unir los flejes de fijación por medio de una serie de pletinas. Para ello, se deben soldar pletinas por debajo del ángulo más largo, estas también tienen que estar unidas a los dos flejes de fijación más largos de la estructura. Adicionalmente, las pletinas que actúan como placa de refuerzo deben instalarse de tal manera que se unan en sus extremos con las pletinas antes mencionadas (Ver Figura 4.61). Esta modificación pretende hacer mucho más rígida la estructura en sus extremos, para así contrarrestar la flexión que se produce en los ángulos cuando es aplicada la carga posterior.

Al realizar esta modificación se obtuvo que el esfuerzo máximo de Von Mises en la estructura (364,741 MPa) se ubica en los alrededores de uno de los agujeros utilizado para colocar un tornillo de fijación (Ver Figura 4.64). Este nuevo diseño ofrece mayor seguridad, a pesar de que el esfuerzo máximo supera la fluencia del material, esto debido a que dicho esfuerzo se produce por la restricción que existe entre el tornillo y la pletina de fijación.

#### 5.2.3.2. *Modelo propuesto para la estructura de sujeción "B".*

El modelo original de esta estructura arrojó como resultado un esfuerzo máximo de Von Mises (681,679 MPa) superior al esfuerzo máximo de tensión del material, lo cual indicaba un desprendimiento de algunos de sus elementos, por lo tanto se asume una falla de la estructura de acuerdo a los criterios de aceptación. Debido a lo antes mencionado, se propuso el mismo modelo inicial

con una serie de variaciones geométricas, las cuales fueron: 4 pletinas colocadas en cada uno de los extremos de los ángulos para ofrecer un mayor soporte y rigidez en el punto de unión con la pletina que engancha a los flejes de fijación; a estas pletinas también se agregan otros 2 flejes en cada extremo para darle mayor rigidez a la estructura justo cuando los ángulos traten de flectar por el momento producido por la carga (Ver Figura 4.65).

Con las reformas antes mencionadas se logró disminuir de manera considerable el esfuerzo máximo de Von Mises generado en la estructura (317,589 MPa), de hecho se encuentra por debajo del esfuerzo de fluencia del material, por lo que se garantiza la confiabilidad de este modelo (Ver Figura 4.68).

# CONCLUSIONES

---

Se estableció que los métodos de evaluación que permiten avalar el diseño de las estructuras de sujeción fabricadas por Autogas son los descritos en la norma *ISO 15501* y *ANSI-NFPA 52*, ya que las condiciones que allí se describen incluyen cargas de gran magnitud que solo pueden ser alcanzadas en caso de que el vehículo experimente una colisión, lo que permite representar de manera controlada el comportamiento más crítico al que pueda estar sometida la estructura de sujeción.

Se determinó que las zonas más propensas a fallas de las estructuras de sujeción se encuentran en los puntos de unión de los ángulos estructurales y los flejes de fijación cuando éstas son sometidas a las cargas longitudinales establecidas en la norma *ISO 15501*. Esto debido a que dichas uniones actúan como restricciones dentro de la estructura, por lo que al generarse la flexión de los ángulos, se produce la concentración de esfuerzos en esa zona.

Se verificó que para los métodos de evaluación estudiados, la estructura de sujeción "A" está diseñada de tal forma que su esfuerzo máximo de Von mises no supera el esfuerzo de fluencia del material, exceptuando la condición de carga

longitudinal delantera descrita en la norma ISO 15501, donde se registró un esfuerzo máximo de Von Mises superior al de fluencia pero no mayor a la tensión máxima. Esto indica que no existe desprendimiento de ningún elemento de la estructura, por lo cual el diseño cumple con el criterio de aceptación establecido en la norma.

Se constató que la estructura de sujeción “B” falla solo para uno de los métodos de evaluación establecidos en la norma ISO 15501, específicamente en la aplicación de la carga longitudinal, donde su valor de esfuerzo máximo de Von Mises supera a la tensión máxima del material, generando desprendimiento de los elementos en la zona esforzada. Esto no satisface el criterio de aceptación establecido en la norma, por lo que la estructura no está apta para su comercialización.

Se comprobó que tanto la estructura de sujeción “A” como la estructura de sujeción “B” cumplen con el criterio de aceptación establecido en la norma *ANSI-NFPA 52*, ya que el máximo desplazamiento generado en ambas estructuras durante la aplicación de las distintas cargas, no supera el desplazamiento máximo establecido en la norma.

Se determinó que los resultados numéricos obtenidos con la herramienta computacional ABAQUS™, arrojaron una respuesta satisfactoria durante el análisis de los distintos métodos de evaluación exigidos por las normas, ya que el comportamiento del sistema de interacción *estructura de sujeción–cilindro de almacenamiento–parte del cuerpo del vehículo*, cuando éste es sometido a una carga de 1.170 N y 2.340 N en sentido longitudinal posterior, se asemeja al obtenido por medio del simulador, independientemente de algunas pequeñas variaciones que se adjudican a la diferencia del comportamiento del material y

por las discrepancias que existen en el modelo digitalizado al ensayado, debido a las irregularidades geométricas presentes en la realidad.

Se determinó que al hacer mucho más rígido el diseño de las estructuras de sujeción en las zonas cercanas a los puntos de unión de los ángulos y flejes de fijación, el comportamiento mecánico mejora considerablemente. De esta forma, la estructura de sujeción “A” al ser sometida a la carga longitudinal posterior establecida en la norma ISO 15501 percibe un esfuerzo máximo de Von Mises menor al límite de fluencia del material. De igual manera sucede con la estructura de sujeción “B”, donde además el esfuerzo máximo disminuye casi un 50% respecto a esfuerzo generado en el diseño original.

Se comprobó que para las estructuras evaluadas no es necesario seleccionar otro material, es decir, basta con solo modificar su geometría; ya que de esta manera se estaría aprovechando la fácil comercialización a nivel nacional y el costo accesible que posee el material que se utiliza actualmente.



# **RECOMENDACIONES**

---

Para investigaciones futuras se recomienda considerar las fallas que pueden ocurrir por el efecto de cargas que varían en el tiempo.

Adicionalmente se propone que en próximos trabajos se desarrollen modificaciones más complejas que incluso puedan llevar a un rediseño total de las estructuras de sujeción, con el objetivo de mejorar aún más el comportamiento de los modelos ya propuestos.

También se propone la incorporación de métodos de evaluación que tomen en cuenta el comportamiento de los usuarios del sistema de GNV y que no son considerados en las normas internacionales, como por ejemplo elementos adicionales que son colocados sobre los cilindros, factor que contribuye al incrementando de las variables establecidas en las pruebas.

Debido a que los resultados obtenidos en este trabajo de investigación no son extrapolables a otras estructuras, aun siendo similares, se recomienda evaluar el resto de las estructuras de sujeción presentes en el mercado, para así verificar la confiabilidad de cada uno de los modelos.

Al momento de aplicar el método de elementos finitos, se recomienda tomar en cuenta la fuerza de apriete que ejercen los tornillos sobre en el sistema de interacción *estructura de sujeción–cilindro de almacenamiento-parte del cuerpo del vehículo*, ya que de esta forma el efecto de apriete en los distintos elementos que conforman el modelo se asemejaría mucho más a la realidad.

Finalmente, se recomienda tomar en consideración las propiedades y características geométricas del cuerpo del vehículo de una manera más detallada en la simulación, ya que puede darse el caso de que la estructura se desprenda del lugar de fijación por una falla en el cuerpo del vehículo y no por la estructura de sujeción como tal.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. Damaso, Ó. (2004). *Análisis de la estructura y elementos del Sand Car Project para su adaptación y compatibilidad en un programa de elementos finitos para el análisis de esfuerzo y deformación generadas por cargas estáticas*. [On line]. Disponible en:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/damaso\\_p\\_o/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/damaso_p_o/)
2. Liu, G. R. y Quek, S. S. (2003). *The Finite Element Method. A Practical Course*. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore.
3. López, J. A. (2005). *Análisis de la estructura y elementos del Auto Deportivo "MXT" de Tecnoidea SA de CV para el análisis de esfuerzo y deformación generadas por cargas estáticas, así como su optimización mediante su simulación, empleando el Método de Elementos Finitos en ALGOR FEA*. [On line]. Disponible en:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/lopez\\_sa\\_ja/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/lopez_sa_ja/)
4. Moisés, L. F. (2007). *Análisis del diseño en elemento finito del amortiguador para el tren principal de una aeronave de radio control para la competencia SAE Aero Design 2007*. [On line]. Disponible en:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/moisés\\_g\\_lf/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/moisés_g_lf/)
5. Norton, R., (2001). *Diseño de Máquinas*. México: Prentice Hall.

6. Sánchez, T. M. (2003). *Análisis de esfuerzos y deformaciones en contenedores a presión mediante el método de elemento finito*. [On line]. Disponible en:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/sanchez\\_t\\_tm/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/sanchez_t_tm/)
7. Segerlind, L. J. (1984). *Applied Finite Element Analysis*. Agricultural Engineering Department, Michigan State University.
8. Summerscales, J., Hall, W., Virk, A., Grove, S. y Miles, M. (2009). *Design, manufacture, mechanical testing and numerical modelling of an asymmetric composite crossbow limb*. [On line]. Disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/>
9. Rockey, K. C. (1983). *The Finite Element Method: A Basic Introduction*. Wiley.

# ***APÉNDICE A***



# ***Instalación de Galgas Extensométricas***

---

## ➤ **Preparación de Estructura de Sujeción**

Para realizar las mediciones con los sensores de deformación se debe preparar previamente la superficie de la estructura de sujeción en los puntos de medición establecidos.

- ✓ Realizar desbaste grueso de la superficie de la estructura donde se van a colocar las galgas extensométricas con papel esmeril grano 120 hasta lograr eliminar la pintura o suciedad.
- ✓ Desbastar con cuatro lijas de diferentes granos comenzando con la de grano 240, continuando con una de grano 320, una de grano 400 y por último una de grano 600. Entre cambio de granos se debe cambiar la orientación del desbastado en 90° de forma que se eliminen los surcos dejados por el desbaste anterior. Se recomienda utilizar agua para asistir el proceso de lijado.
- ✓ Enjuagar con abundante agua.
- ✓ Secar con chorro de aire caliente a 50 °C.
- ✓ Aplicar con gasa limpia acetona o tricloroetano hasta que la misma salga blanca de una sola pasada.

- ✓ Aplicar alcohol isopropílico con gasa limpia sobre la superficie hasta que la gasa salga blanca de una sola pasada.

➤ **Instalación de las Galgas Extensométricas**

Para evitar la contaminación de la zona preparada con anterioridad, en esta etapa se debe trabajar con el uso de guantes de látex.

- ✓ Trazar los ejes de colocación de los extensómetros.
- ✓ Probar los extensómetros, para esto, sacarlos de su estuche y medirlos con un multímetro digital de precisión.
- ✓ Presentar los extensómetros en su posición final con ayuda de cinta adhesiva.
- ✓ Despegar la cinta adhesiva parcialmente.
- ✓ Colocar una gota de pegamento de base cianoacrilato en el punto de fijación de la galga.
- ✓ Volver a adherir la cinta adhesiva y hacer presión sobre la galga durante al menos 1 minuto.
- ✓ Inspeccionar ocularmente con una lupa de gran aumento. Se mira si ha quedado alguna bolsa de aire o zonas sin adherir bajo el soporte de la galga. En caso de que esto ocurra, se recomienda desprender el extensómetro con mucho cuidado, y luego verificar su resistencia nominal de tal manera de chequear si sufrió algún daño; si se encuentra en buen estado puede realizar el proceso de instalación nuevamente.

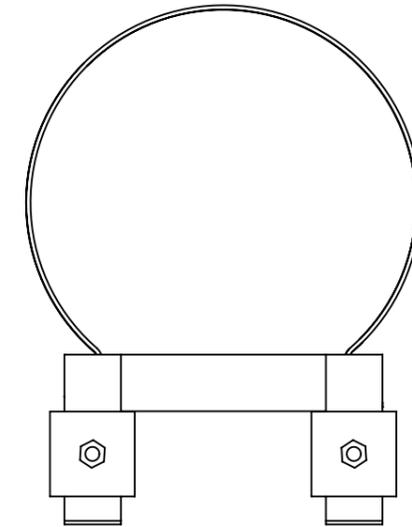
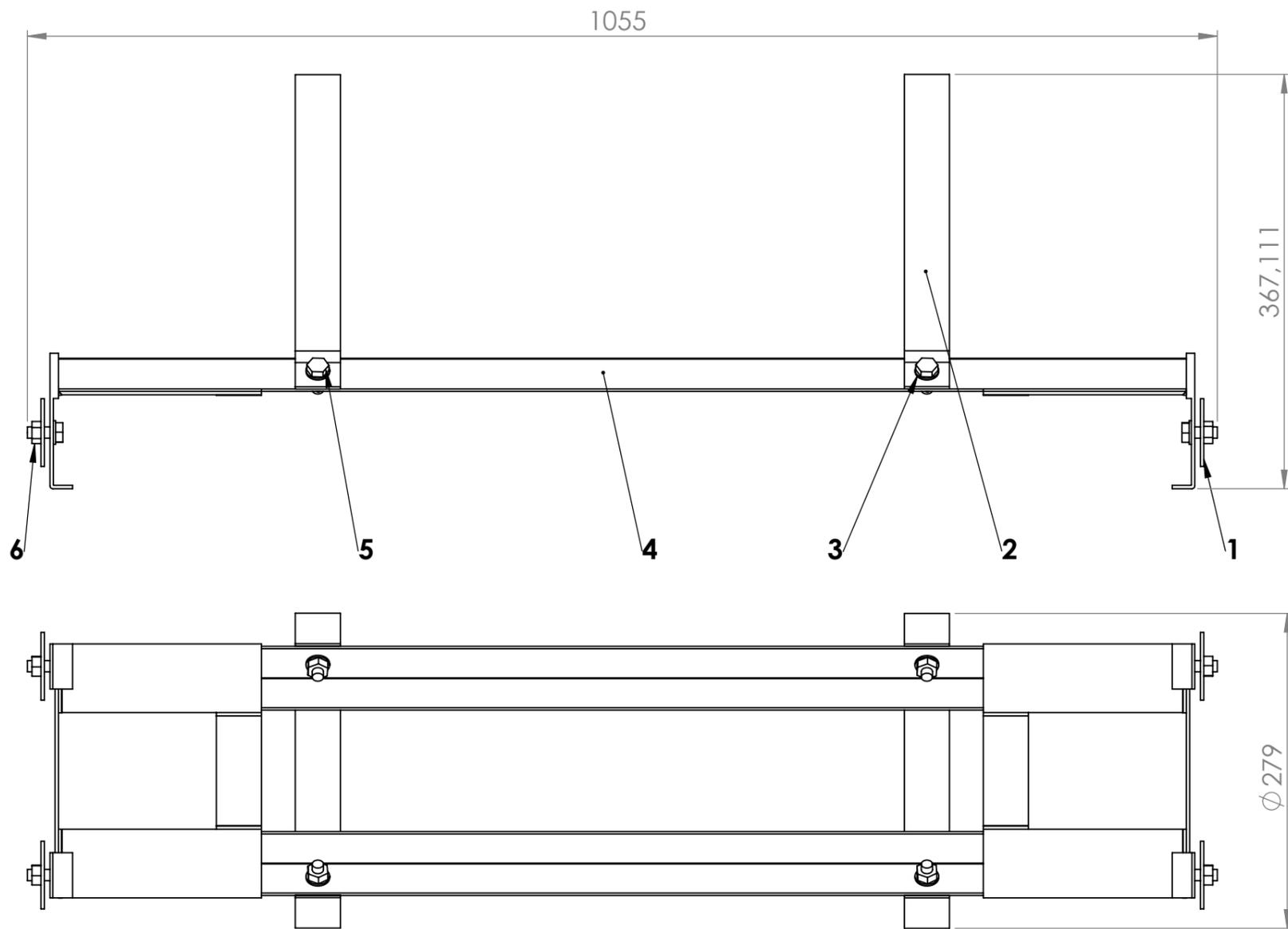
➤ **Conexión de las Galgas**

- ✓ Cubrir con barniz de aislamiento eléctrico los alrededores de las galgas para evitar el contacto entre los cables y la probeta.

- ✓ Establecer una ruta de los terminales de las galgas que serán conectados a los cables de tal forma que no interfieran con otras galgas.
- ✓ Fijar los terminales de las galgas a la probeta con ayuda de silicón termoplástico.
- ✓ Soldar con ayuda de un soldador de estaño los terminales de las galgas con los cables de transmisión de información.
- ✓ Medición del aislamiento eléctrico del extensómetro con respecto a la pieza. Se considera que aislamientos eléctricos inferiores a 100 megaohmios pueden producir errores.
- ✓ Medida de la resistencia de los extensómetros.



# ***APÉNDICE B***

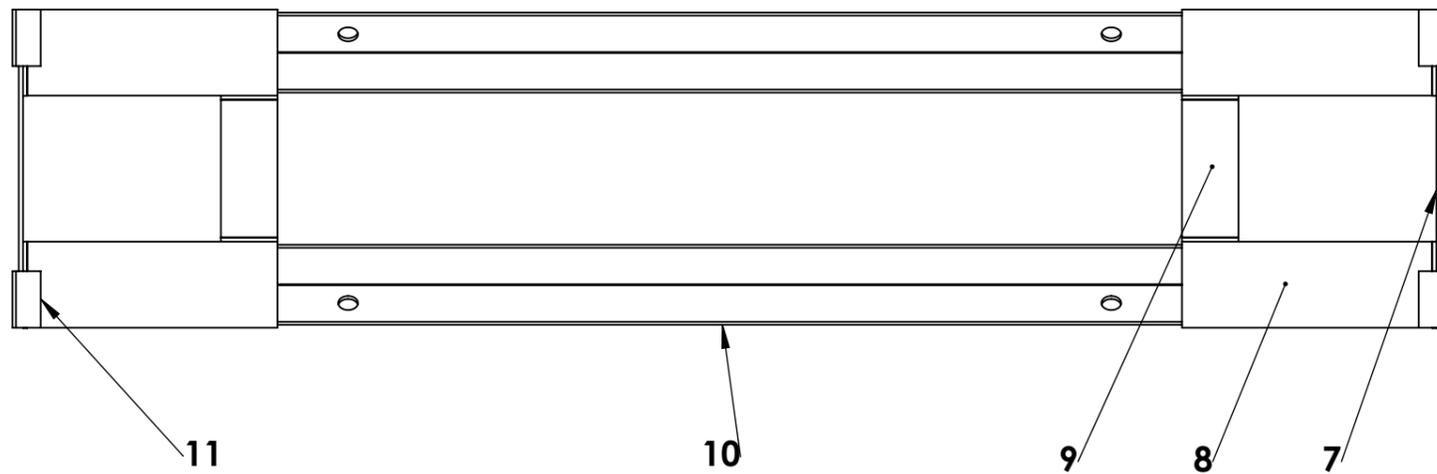
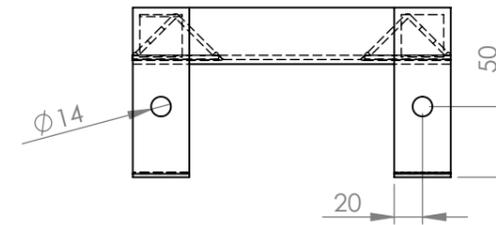
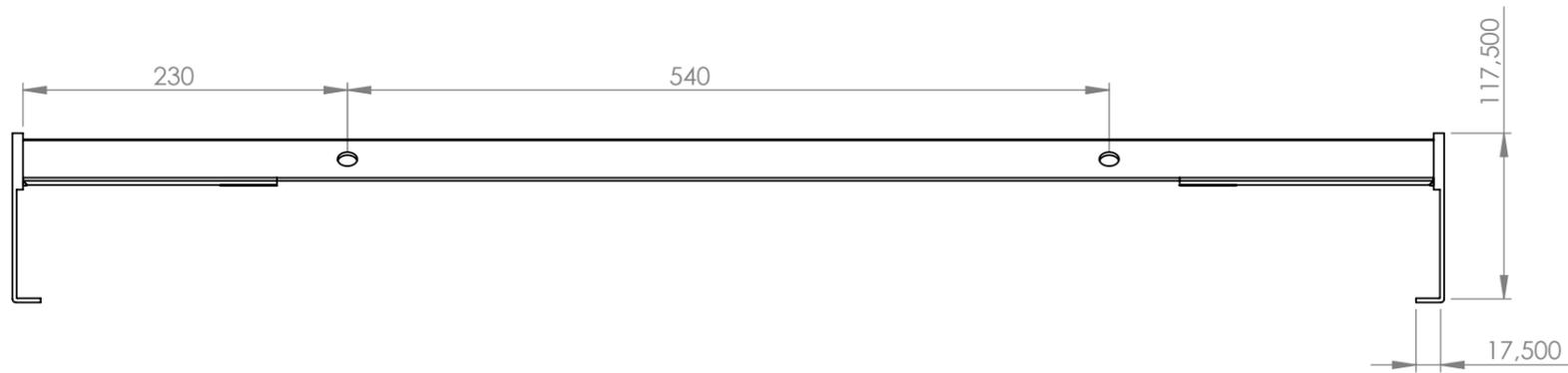
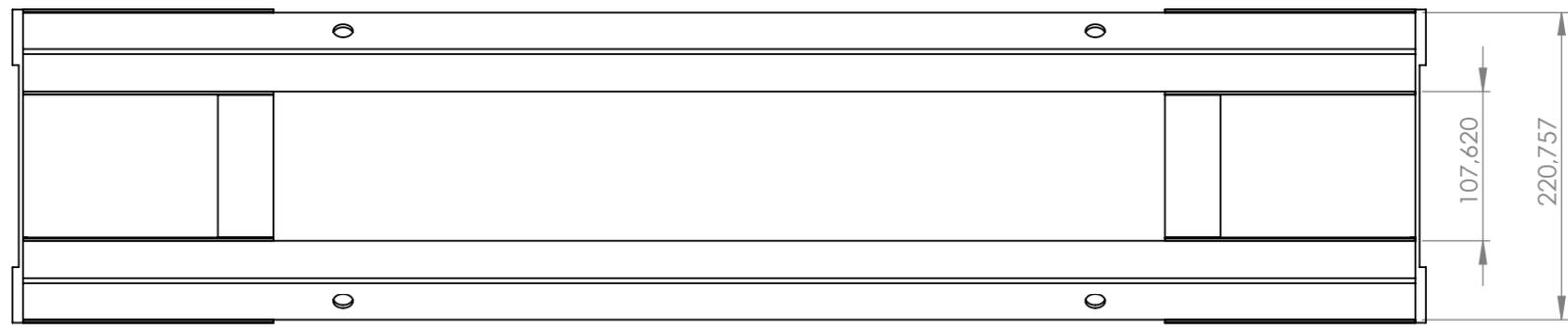


8	TUERCA HEX. M10 DIN 985	6	ACERO GRADO 8	
8	TORNILLO HEX. M10 X 45 DIN 933	5	ACERO GRADO 8.8	
1	BASE	4		
12	ARANDELA PLANA A 10,5 DIN 125	3	ALEACIÓN ZINC	
2	PLETINA 740X40X3mm (ARO)	2	AISI-SAE 1020	LAMINADO
4	PLETINA 60X60X3mm (ARANDELA ESPECIAL)	1	AISI-SAE 1020	LAMINADO
CANTIDAD	DENOMINACIÓN	NÚMERO	MATERIAL	OBS.

	ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS	AJUSTES Y TOLERANCIAS	OTRAS NORMAS
--	---------------------	-------------------------	-----------------------	--------------

UNIVERSIDAD DE CARABOBO ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		FECHA	NOMBRE	FIRMA
		Dibuja	24/05/11	Pérez J., Markos A.
	Revisa			

ESCALA 1:5	Estructura de sujeción "B" modificada	LÁMINA: 1/3
---------------	---------------------------------------	-------------

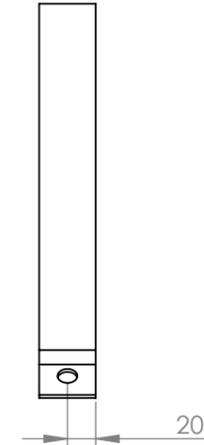
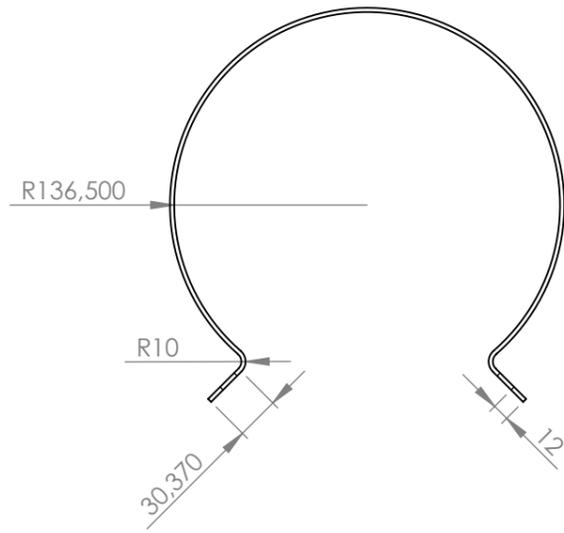


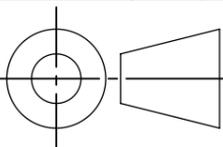
4	PLETINA 139x40X3	11	AISI-SAE 1020	LAMINADO
2	ÁNGULO ESTRUCTURAL 1000X40X3	10	AISI-SAE 1020	LAMINADO
2	PLETINA 104x40X3	9	AISI-SAE 1020	LAMINADO
4	PLETINA 180x60X3	8	AISI-SAE 1020	LAMINADO
2	PLETINA 225X40X3	7	AISI-SAE 1020	LAMINADO
CANTIDAD	DENOMINACIÓN	NÚMERO	MATERIAL	OBS.

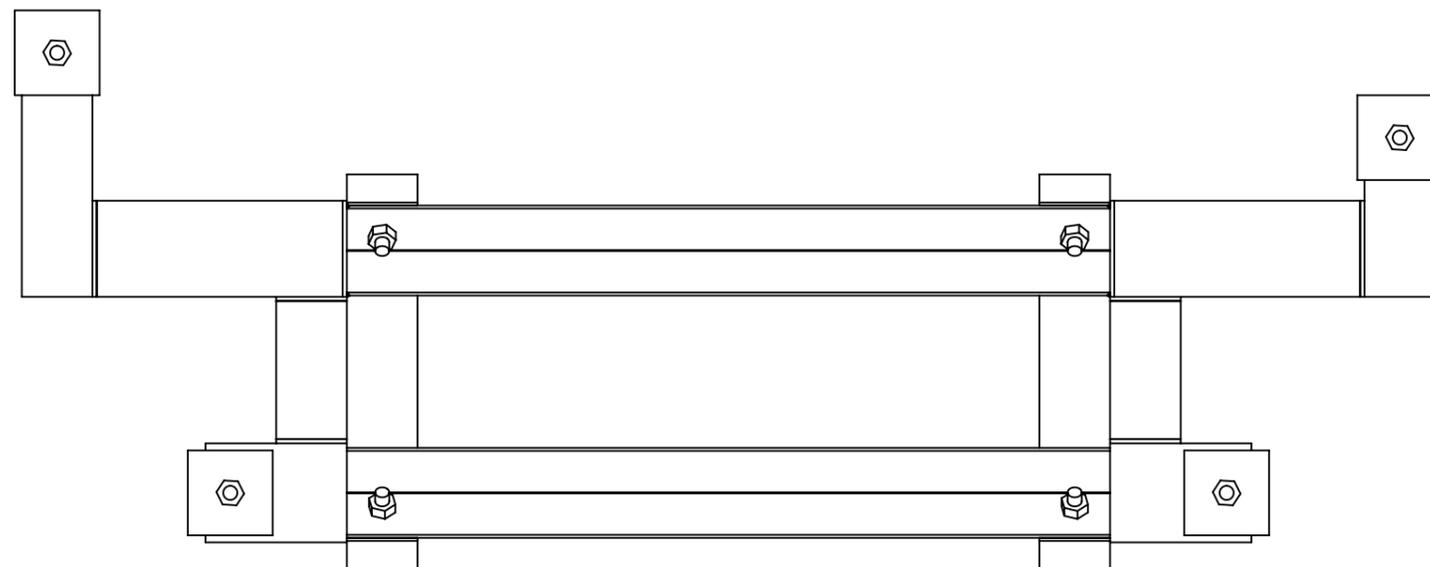
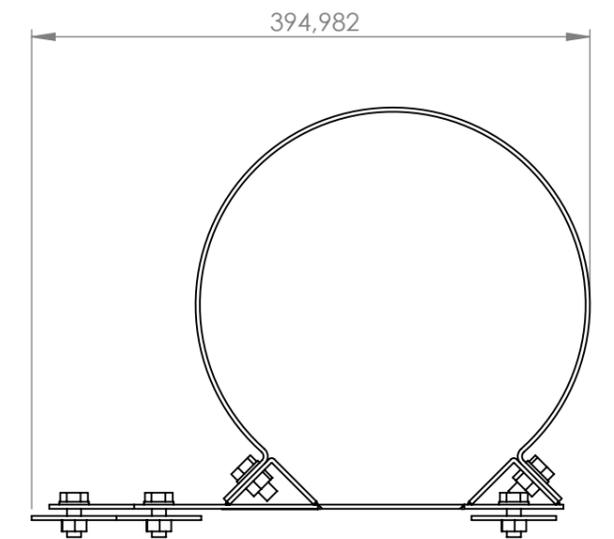
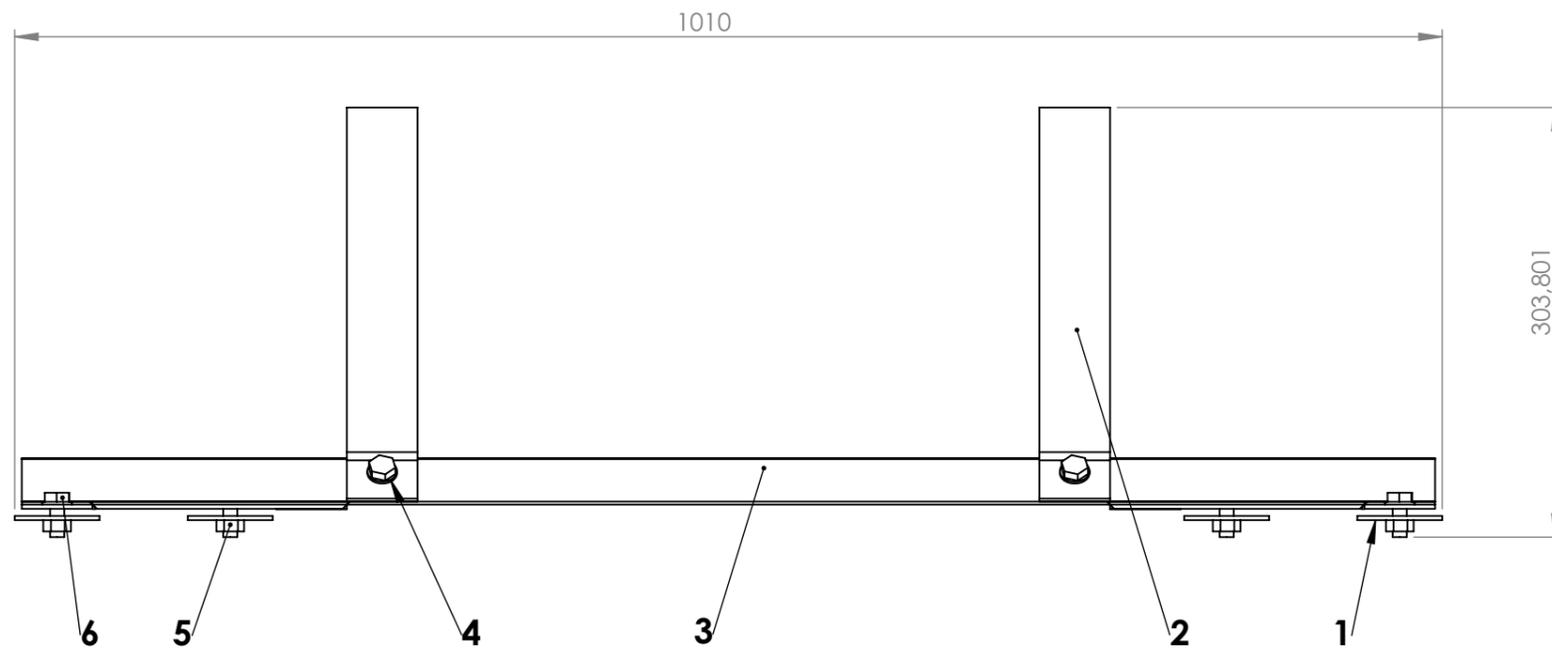
	ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS	AJUSTES Y TOLERANCIAS	OTRAS NORMAS
--	---------------------	-------------------------	-----------------------	--------------

UNIVERSIDAD DE CARABOBO ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		FECHA	NOMBRE	FIRMA
		Dibuja	24/05/11	Pérez J., Markos A.
		Revisa		

ESCALA 1:5	Dibujo de subconjunto de la base N° 4	LÁMINA: 2/3
---------------	---------------------------------------	-------------



2	PLETINA 740X40X3mm (ARO)	2	ASI-SAE 1020	LAMINADO
CANTIDAD	DENOMINACIÓN	NÚMERO	MATERIAL	OBS.
	ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS	AJUSTES Y TOLERANCIAS	OTRAS NORMAS
UNIVERSIDAD DE CARABOBO ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		FECHA	NOMBRE	FIRMA
		Dibuja	24/05/11	Pérez J., Markos A.
ESCALA	Dibujo de detalle Aro N° 2			LÁMINA: 3/3
1:5				

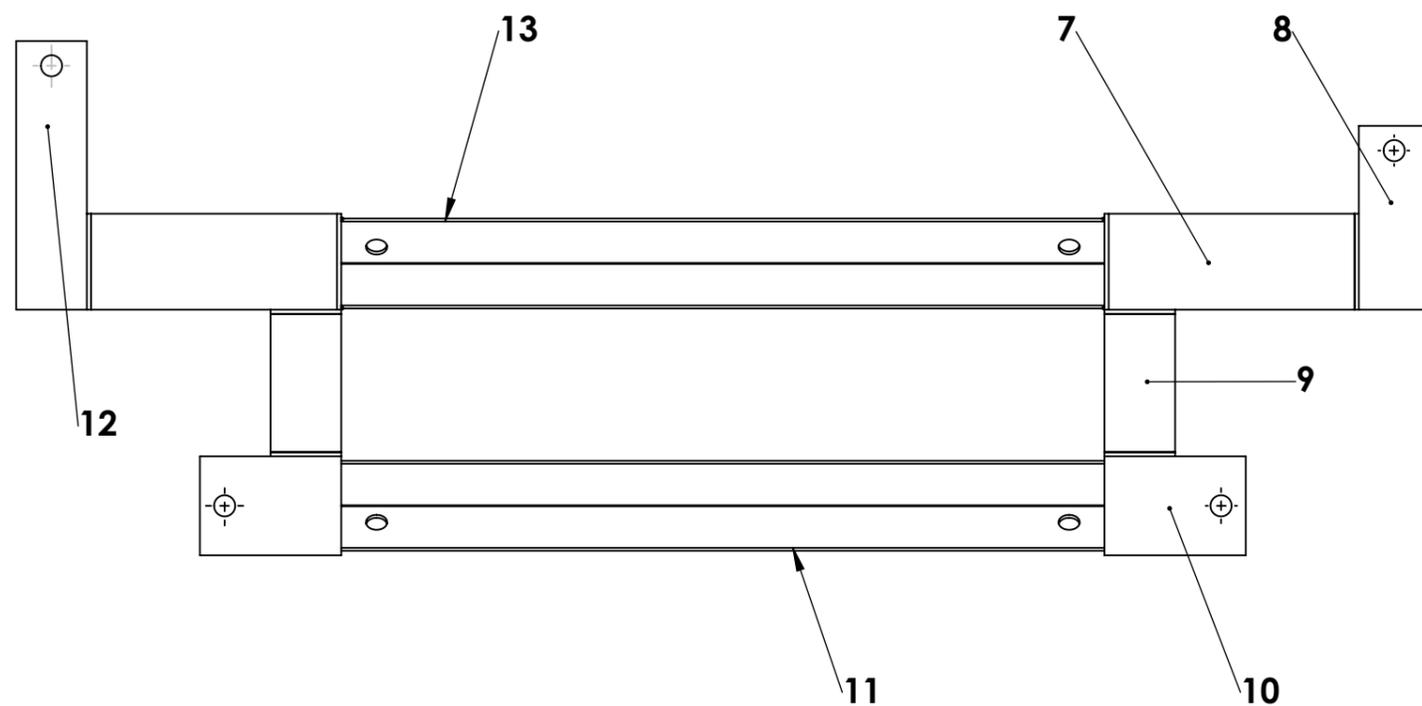
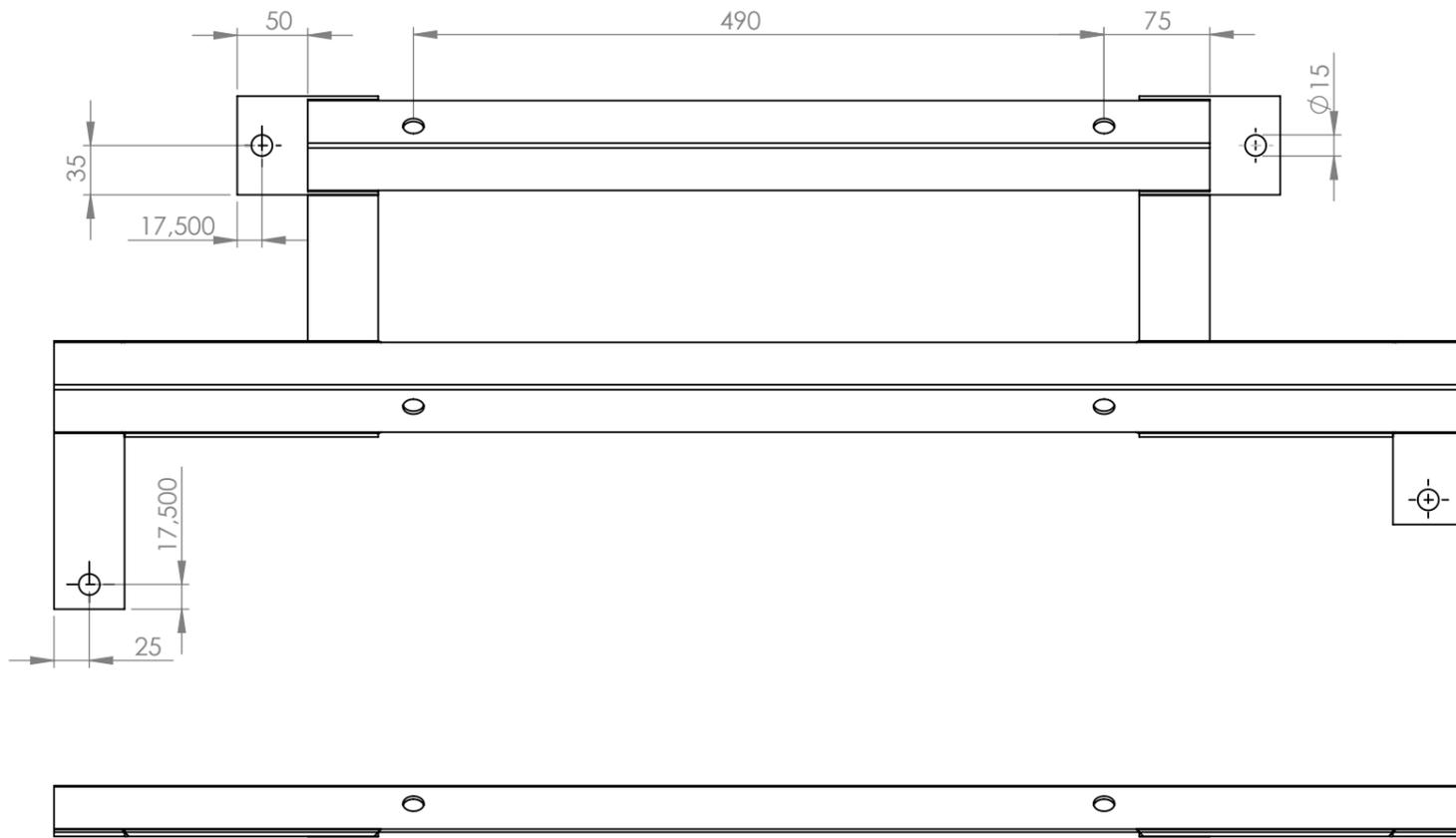


8	TORNILLO HEX. M10 X 45 DIN 933	6	ACERO GRADO 8.8	
8	TUERCA HEX. M10 DIN 985	5	ACERO GRADO 8	
8	ARANDELA PLANA A 10,5 DIN 125	4	ALEACIÓN ZINC	
1	BASE	3		
2	PLETINA 72x50x3 (ARO)	2	AISI-SAE 1020	LAMINADO
4	PLETINA 60x60x3 (ARANDELA ESPECIAL)	1	AISI-SAE 1020	LAMINADO
CANTIDAD	DENOMINACIÓN	NÚMERO	MATERIAL	OBS.

	ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS	AJUSTES Y TOLERANCIAS	OTRAS NORMAS
--	---------------------	-------------------------	-----------------------	--------------

UNIVERSIDAD DE CARABOBO ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		FECHA	NOMBRE	FIRMA
		Dibuja	24/05/11	Pérez J., Markos A.
		Revisa		

ESCALA 1:5	Dibujo de conjunto de la estructura de sujeción "A" modificada	LÁMINA: 1/3
---------------	--	-------------



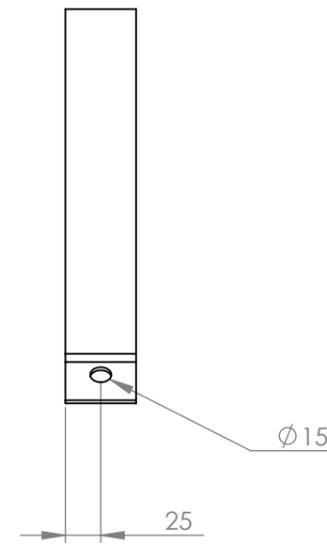
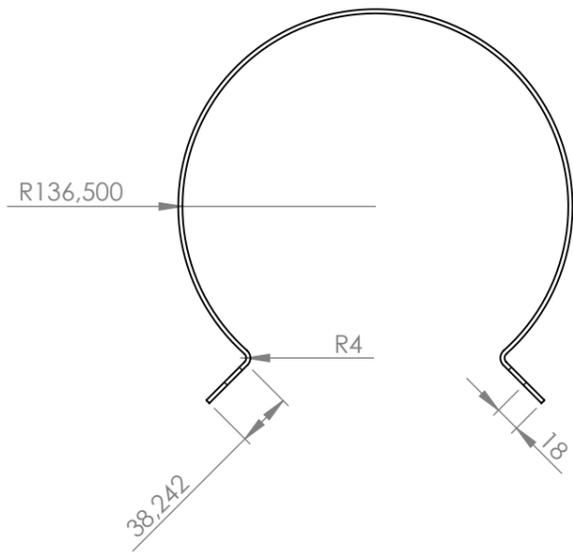
1	ÁNGULO ESTRUCTURAL 1000X45X3	13	AISI-SAE 1020	LAMINADO
1	PLETINA 190x50X3	12	AISI-SAE 1020	LAMINADO
1	ÁNGULO ESTRUCTURAL 640X45X3	11	AISI-SAE 1020	LAMINADO
2	PLETINA 100x70X3	10	AISI-SAE 1020	LAMINADO
2	PLETINA 104x50X3	9	AISI-SAE 1020	LAMINADO
1	PLETINA 130x50X3	8	AISI-SAE 1020	LAMINADO
2	PLETINA 180X65X3	7	AISI-SAE 1020	LAMINADO

CANTIDAD	DENOMINACIÓN	NÚMERO	MATERIAL	OBS.
----------	--------------	--------	----------	------

	ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS	AJUSTES Y TOLERANCIAS	OTRAS NORMAS

UNIVERSIDAD DE CARABOBO ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		FECHA	NOMBRE	FIRMA
		Dibuja	24/05/11	Pérez J., Markos A.
		Revisa		

ESCALA 1:5	Dibujo de subconjunto de la base N° 3	LÁMINA: 2/3
---------------	---------------------------------------	-------------



2	PLETINA 720x50X3 (ARO)	2	AISI-SAE 1020	LAMINADO
CANTIDAD	DENOMINACIÓN	NÚMERO	MATERIAL	OBS.
	ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS	AJUSTES Y TOLERANCIAS	OTRAS NORMAS
UNIVERSIDAD DE CARABOBO ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		FECHA	NOMBRE	FIRMA
		Dibuja	24/05/11	Pérez J., Markos A.
ESCALA	Dibujo de detalle Aro N° 2			LÁMINA: 3/3
1:5				