



**B**enemérita **U**niversidad **A**utónoma de **P**uebla

Facultad de Ingeniería

**Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

***“Simulación CAE por medio de entornos de Nx Nastran, Autodesk Inventor y Abaqus/CAE en cuadro estructural de vehículo a propulsión humana fabricado en Aluminio 6063 T6 para competencia HPVC”***

**Tesis**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**Ingeniero Mecánico y Eléctrico**

Presenta:

**Luis Manuel López Berra**

Matricula:

**201512608**

Asesor:

**Dr. José Isrrael Rodríguez Mora**

Co-Asesor:

**Dr. Víctor Vázquez Báez**

AUTORIZADA PARA IMPRESIÓN

Puebla, Pue.

Primavera 2022



**BUAP**

Oficio No. SAC/0182/2022

**C. Luis Manuel López Berra -201512608-  
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería  
Mecánica y Eléctrica  
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“SIMULACIÓN CAE POR MEDIO DE ENTORNOS DE NX NASTRAN, AUTODESK INVENTOR Y ABAQUS/CAE EN CUADRO ESTRUCTURAL DE VEHÍCULO A PROPULSIÓN HUMANA FABRICADO EN ALUMINIO 6063 T6 PARA COMPETENCIA HPVC”**

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesor Interno de tema al Dr. José Israel Rodríguez Mora y como Co Asesor al Dr. Víctor Manuel Vázquez Báez.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

**Atentamente**

**“Pensar bien, para vivir mejor”**

**H. Puebla de Z. a 01 de febrero de 2022**

**M. C. Víctor Galindo López  
Secretario Académico**



**M'VGL/barv  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo**

Facultad  
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
222 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora  
Director de la Facultad de Ingeniería Benemérita Universidad Au-  
tónoma de Puebla  
P r e s e n t e.


El que suscribe: Dr. José Isrrael Rodríguez Mora, asesor del tema de tesis:

“SIMULACIÓN CAE POR MEDIO DE ENTORNOS DE NX NASTRAN, AUTODESK INVENTOR Y ABAQUS/CAE EN CUADRO ESTRUCTURAL DE VEHÍCULO A PROPULSIÓN HUMANA FABRICADO EN ALUMINIO 6063 T6 PARA COMPETENCIA HPVC”

Presentada por el C. Luis Manuel López Berra -201512608-, pasante del Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y en atención al oficio No. SAC/0182/2022 con fecha de emisión 01 de febrero de 2022, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e  
“Pensar bien, para vivir mejor”  
H. Puebla de Z. a 02 de febrero de 2022



Dr. José Isrrael Rodríguez Mora  
Asesor de Tema

D'JIRM/BARV  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo

## **Agradecimientos**

Agradezco a:

A la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

A mi familia quienes siempre han estado para apoyarme y que son un ejemplo para mí, en especial a mis padres Alejandro e Irma.

Al Dr. José Isrrael Rodríguez Mora por su valiosa guía y aplomo para enseñarme que debo esforzarme más por lo que hago para generar mejores resultados.

Al Dr. Víctor Vázquez Báez por su colaboración y asesoramiento.

Al M.C. Josué Alberto Tamayo Islas por su apoyo y asesoría.

Al Dr. Juan Antonio López Cuautle y al Mtro. Arturo Mendoza Zamora por transmitirme conocimiento.

Al M.C. Mauricio Herreman y al Ing. Gabriel Medel por transmitirme las bases del CAE y su apoyo externo para este trabajo.

Al Ing. Fabian Leonov Santoyo López por su asesoramiento en el uso de entornos CAE.

# Tabla de contenido

Resumen.....	1
Capítulo I .....	2
1.1 Introducción general.....	3
1.2 Antecedentes.....	5
1.2.1 ASME .....	6
1.2.2 HPVC .....	8
1.2.3 Método de los Elementos Finitos MEF.....	9
1.2.4 Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE) .....	15
1.2.5 Programas.....	18
I. NX Nastran.....	19
II. Abaqus/CAE.....	20
III. Autodesk Inventor.....	21
1.3 Hipótesis.....	22
1.4 Justificación.....	22
1.5 Planteamiento del problema.....	23
1.5.1 Fundamentos del Método .....	24
1.5.2 Elemento .....	24
1.5.3 Campo de desplazamiento.....	24
1.5.4 Campo de esfuerzos del elemento.....	26
1.5.5 Equilibrio del elemento.....	26
1.5.6 Integración del sistema de ecuaciones para el método continuo .....	28
1.6 Objetivos.....	29
1.6.1 Objetivo general.....	29
1.6.2 Objetivos específicos.....	29
Capítulo II.....	30
2. Diseño de vehículo HPVC.....	30
2.1 Lineamientos Generales de la competencia.....	30

2.3.1 Descripción del modelo .....	34
Capítulo III.....	35
3.1 Material .....	35
3.1.1 Características del material.....	35
3.1.2 Al 6063 T6 .....	44
3.1.2 Asignación del material a la pieza de trabajo .....	47
3.2.1 Características del prototipo .....	49
Capítulo IV.....	51
4. Análisis CAE.....	51
4.1 Uso del CAE.....	51
4.1.1 Elemento Tipo Placa (Shell).....	51
4.1.2 Elemento Solido.....	56
4.2 Análisis a la pieza de trabajo.....	62
4.2.1 Análisis de Fatiga .....	62
4.2.2 Calculo de la fatiga generada en el cuadro con Aluminio 6063 T6 ....	63
4.2.3 Análisis Estático No Lineal .....	66
4.2.4 Análisis Modal .....	69
4.3 Condiciones del Elemento.....	72
4.3.1 Malla 2D .....	72
4.3.2 Malla 3D.....	74
4.3.3 Cargas .....	76
4.3.4 Restricciones .....	78
4.4 Discusión de resultados.....	79
4.4.1 Simulación de cargas a jaula de seguridad con mallado CTETRA(3) .	80
4.4.2 Simulación de cargas a jaula de seguridad con mallado Tetraédrico	81
4.4.3 Simulación de Frecuencias SOL 103 en Nx.....	85
4.4.4 Análisis Modal en Abaqus/CAE.....	86
4.4.5 Análisis Modal en Inventor .....	86
4.4.6 Simulación No Lineal con SOL. 106 en Nx.....	87
Discusión de resultados.....	87

**Observaciones .....95**  
**Conclusión.....98**  
**Referencias.....99**

## Índice de figuras.

<b>Fig. Número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
1	Marco Estructural (2017).	17
2	HPV desarrollado para E-FEST 2018.	20
3	Diagrama de Proceso de análisis por MEF.	24
4	Análisis CAE aplicado a una pieza.	28
5	Análisis CAE en una viga.	29
6	Simulación de prototipo de vehículo en desarrollo.	29
7	Desplazamientos en un elemento.	33
8	Fuerzas que intervienen en un elemento.	33
9	Requerimientos de seguridad.	35
10	Modelo CAD en NX del vehículo manufacturado.	38
11	Clasificación de las aleaciones de Aluminio según su tratamiento de endurecimiento.	41
12	Grafica de temperatura de Templado por precipitado.	42
13	Asignación de Material Aluminio 6063 al modelo.	44
14	Cálculo de propiedades del cuerpo.	47
15	Asignación de Modulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson.	47
16	Resistencia a la Fatiga.	47
17	Unión por soldadura del cuadro.	48
18	Proceso de ensamble	50
19	Prueba de funcionamiento.	53
20	Desplazamientos, giros, fuerzas y momentos de un elemento.	53
21	Forma explícita de la submatriz de rigidez para elemento tetraédrico de 3 nodos.	54
22	Desplazamientos, giros, fuerzas y momentos de un elemento.	57
23	Forma explícita de la submatriz de rigidez para elemento tetraédrico de 4 nodos.	58
24	Gráfico de representación de Esfuerzo-Deformación.	60
25	Representación del campo de desplazamientos del cuerpo.	60
26	Elementos Shell.	63
27	Asignación de espesor 2.77mm	64
28	Asignación de espesor 3.38mm	64
29	Asignación de espesor 5.1mm	64
30	Obtención de la cara superficial de la pieza.	65
31	Pieza ya tratada para estudio tipo Shell.	65
32	Tratamiento superficie.	66
33	Selección de malla.	66
34	Aplicación de malla.	66
35	Tratamiento a pieza.	67
36	Selección de malla.	68
37	Aplicación de malla	68

38	Modelo CAD importado a Abaqus	68
39	Detección de geometría compleja por el software.	69
40	Selección de tipo de malla.	69
41	Designación de tamaño de malla.	69
42	Malla tetraédrica tamaño 10.	70
43	Aplicación de mallado	70
44	Aplicación de 2670N según especificaciones del reglamento.	70
45	Aplicación de 1330N a un costado.	72
46	Carga del peso del piloto.	72
47	Restricción en soporte de llanta de cuadro	73
48	Restricción en soporte de llanta trasera	73
49	Restricciones en soportes delanteros del cuadro.	73
50	Aplicación de restricción en soportes delanteros	74
51	Pieza lista de simulación(2670N).	75
52	Esfuerzo Von Mises de 720MPa.	75
53	Pieza lista de simulación(1330N).	76
54	Esfuerzo Von Mises de 861.5MPa	76
55	Pieza lista de simulación(981N).	76
56	Esfuerzo Von Mises de 109.53MPa.	76
57	Carga de 2670N con restricciones.	76
48	Esfuerzo Von Mises de 518.5MPa.	77
59	Carga de 1330N con restricciones.	77
60	Esfuerzos Von Mises de 861.2MPa.	77
61	Carga de 981N con restricciones.	77
62	Esfuerzo Von Mises de 683.8MPa.	78
63	Esfuerzo Von Mises de 902MPa.	78
64	Esfuerzo Von Mises de 981MPa.	78
65	Esfuerzo Von Mises de 120MPa.	78
66	Coefficiente de Seguridad de 0.31.	79
67	Esfuerzo Von Mises de 885MPa.	80
68	Coefficiente de Seguridad de 0.33	83
69	Esfuerzo Von Mises de 831.1MPa.	83
70	Factor de Seguridad de 1.68.	83
71	Esfuerzo Von Mises de 163MPa.	85
72	Desplazamientos en el modo de frecuencia 1.	85
73	Von Mises de 8.11MPa.	86
74	Desplazamientos en el modo de frecuencia 1.	86
75	Esfuerzo Von Mises en el modo de frecuencia 1.	86
76	Obtención de 10 Modos de Frecuencia.	86
77	Von Mises con Valor de 109MPa.	87
78	Deformación (Strain) de 10mm.	87
79	Von Mises con Valor de 194MPa.	88
80	Deformación (Strain) de 14mm.	88
81	Zona de resonancia.	89
82	Gráfico de comportamiento de frecuencia modal a 70 rpm.	91

<b>83</b>	Gráfico de comportamiento de frecuencia modal a 80 rpm.	91
<b>84</b>	Gráfico de comportamiento de frecuencia modal a 90 rpm.	92

## Índice de tablas.

<b>Número de Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
<b>1</b>	Clasificación por elementos de aleaciones de Aluminios.	37
<b>2</b>	Aplicación de las distintas aleaciones de Aluminio.	39
<b>3</b>	Propiedades mecánicas y composición química del Al 6063 T6.	44
<b>4</b>	Combinación Metal base-Aporte.	45
<b>5</b>	Efecto de la soldadura en el esfuerzo de fluencia de algunas aleaciones de la serie 6XXX.	46
<b>6</b>	Valores de a y b, factor de acabado superficial.	61
<b>7</b>	Valores de confiabilidad.	62
<b>8</b>	Ejes de giro de los componentes en NX.	64
<b>9</b>	Eje de giro de los componentes en Nx.	70
<b>10</b>	Comparativa Análisis Lineal Carga 2670N.	80
<b>11</b>	Comparativa Análisis Lineal Carga 1330N.	81
<b>12</b>	Comparativa Análisis Lineal Carga 981N.	82
<b>13</b>	Comparativa Análisis Lineal con malla de tipo Shell.	83
<b>14</b>	Modos de frecuencia modal a 70rpm.	84
<b>15</b>	Modos de frecuencia modal a 80rpm.	84
<b>16</b>	Modos de frecuencia modal a 90rpm.	85
<b>17</b>	Comparativa de Frecuencias obtenidas de tres entornos.	87
<b>18</b>	Análisis No lineal comparativa Nx-Abaqus.	89

## Índice de ecuaciones.

Ecuación Núm.	Descripción	Pág.
1	Campo de desplazamientos	25
2	Coordenadas locales	25
3	Relación de campos de desplazamientos	26
4	Función escalonada de forma	26
5	Matriz operacional	26
6	Campo de esfuerzo	26
7	Desplazamiento virtual	27
8	Deformación virtual	27
9	Principio de desplazamiento virtual	27
10	Esfuerzo y deformación virtual	27
11	Verificación de desplazamientos	28
12	Matriz de rigidez de desplazamientos virtuales	28
13	Matriz de Rigidez	59
14	Desplazamiento en $u(x,y)$	60
15	Desplazamiento en $v(x,y)$	60
16	Desplazamiento en $w(x,y)$	60
17	Función de forma $N_{im}$	60
18	Función de forma para $j=1$	60
19	Función de forma para $j \neq 1$	60
20	Derivada respecto a «x» para $j=1$	60
21	Derivada respecto a «x» para $j \neq 1$	60
22	Derivada respecto a «y» para $j=1$	61
23	Derivada respecto a «y» para $j \neq 1$	61
24	Campo de deformación $\epsilon_x$	61
25	Campo de deformación $\epsilon_y$	61
26	Campo de deformación $\gamma_{xy}$	61
27	Deformación malla Shell (i,j,k)	61
28	Campo de esfuerzos	61
29	Equilibrio de elementos	62
30	Equilibrio de elementos	62
31	Reorganización de Elementos	63
32	Campo de desplazamiento en el interior del elemento	64
33	Desplazamiento interno nodo	64
34	Desplazamiento interno $a^e$	64
35	Desplazamiento en coordenadas $x,y,z$	64
36	$a_i$ igualada a valores nodales	64
37	Ecuación del sistema en $i$	64
38	Volumen del elemento $a_i$	64
39	Volumen del elemento $C_i$	64
40	Elemento genérico n nodos	65
41	Matriz de deformación B	65
42	Matriz nodo $i$	65

43	Matriz de deformación de elemento de estudio	65
44	Matriz de deformación elemento tetraédrico	65
45	Ecuación de equilibrio	65
46	Equilibrio de elementos	65
47	Matriz de Rigidez nodo tetraédrico	65
48	Submatriz nodos i y j	66
49	Forma explícita sencilla $k^e$	66
50	Fuerzas nodales equivalentes	66
51	Acabado Superficial	68
52	Factor Tamaño	69
53	Límite de Fatiga $S_e$	69
54	Ecuación matricial sistema no amortiguado	71
55	Frecuencia natural con Eigen valores	71
56	Respuesta a matriz de rigidez respecto matriz masa de un sistema modal	71
57	Ley de Hooke	72
58	Frecuencia de Excitación	72
59	Frecuencia Natural	72
60	Tiempo	72

## **Glosario**

**ASME.** Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers)

**CAD.** Diseño asistido por computadora por sus siglas en inglés.

**CAE.** Ingeniería Asistida por Computadora.

**Elemento.** Representación matemática matricial de la interacción entre los grados de libertad de un conjunto de nodos, pueden ser lineales, superficiales, volumétricos o puntuales y pueden estar en espacios bidimensionales o tridimensionales.

**FEA.** Análisis de Elementos Finitos

**FEM.** Método de los Elementos Finitos.

**Fluencia.** Propiedad donde el material se deforma.

**Función de forma.** De un elemento es una función matemática que permite que los valores de los grados de libertad de los nodos sean calculados para otros puntos del elemento. Por eso, la función de forma representa el comportamiento asumido de un determinado elemento. La exactitud de la solución está estrechamente vinculada con los valores que proporciona la función de la forma asumida en comparación con el comportamiento real.

**HPVC.** Competencia de Vehículos a Propulsión Humana (Human Powered Vehicle Challenge).

**Isotrópico.** Es un material del cual está constituido un elemento estructural que presenta propiedades invariantes.

**Malla.** Es el conjunto de nodos con relación de adyacencia.

**Matriz de Rigidez.** Es un método que relaciona los desplazamientos de una serie de puntos o nodos, con los esfuerzos puntuales efectivos en dichos puntos, está presente en análisis lineales ya que solo se ocupa en estudios realizados en la zona elástica del material.

**Nodo.** Punto localizado por sus coordenadas en el espacio donde se considera que existen grados de libertad y las acciones sobre el sistema físico.

**Shell.** Elemento laminar.

**Solver.** Es una pieza de software matemático, parte de un programa de computadora independiente o como una biblioteca de software, que resuelve un problema matemático, toma descripciones de problemas en algún tipo de forma genérica y calcula su solución.

**Vector.** Elemento matemático que permite representar magnitudes físicas, posee magnitud, dirección y sentido.

## Resumen

En este proyecto se analizó el comportamiento del cuadro de un prototipo de vehículo manufacturado en Aluminio 6063 T6, para comprobar su practicidad en un evento HPVC organizado por ASME, como parte del estudio fue necesario validar la estructura con los requerimientos de seguridad del reglamento del evento.

Con los valores obtenidos se obtuvo el comportamiento de la jaula de seguridad, así como del vehículo en condiciones extremas, la aplicación de fuerzas estuvo enfocada a dar los máximos esfuerzos que podrían presentarse todo esto con el motivo de dar mayor confianza y entendimiento de la estructura con el material aplicado.

Cabe señalar que se enfocó solo en el estudio del cuadro, sin embargo, habrá diversos factores externos que podrían afectar y comprometer su integridad estructural.

Para el estudio y análisis CAE fue necesario una exhaustiva investigación del mallado a aplicar sobre el modelo CAD, así como capacitación en el uso de los programas NX, Inventor y Abaqus.

Basándose en lo anterior sumado a la capacidad del equipo de cómputo fue que se aplicó un mallado tetraédrico para un caso de análisis con la pieza en 3D en los tres programas antes mencionados y un mallado CTRIA3 para uno 2D solo empleado en NX, al final comparando resultados para conseguir un estudio más completo del mismo.

***Palabras clave:*** análisis, CAD, CAE, FEA, elemento, mallado, método, esfuerzo

## **Abstract**

In this project, the behavior of the frame of a prototype of a vehicle manufactured in Aluminum 6063 T6 was analyzed, to verify its practicality in an HPVC event organized by ASME, as part of the study it was necessary to validate the structure with the security requirements of the event regulations.

With the obtained values, the behavior of the safety cage as well as the vehicle in extreme conditions was obtained, the application of forces was focused on giving the maximum efforts that all this could present in order to give greater confidence and understanding of the structure with the applied material.

It should be noted that it focused only on the study of the table, however there will be various external factors that could affect and compromise its structural integrity.

The CAE study and analysis required an exhaustive investigation of the meshing to be applied to the CAD model, as well as training in the use of the NX, Inventor and Abaqus programs.

Based on the above, added to the capacity of the computer equipment, a tetrahedral mesh was applied for an analysis case with the 3D part in the three programs mentioned above and a CTRIA3 mesh for a 2D only used in NX, in the end comparing results to get a more complete study of it.

***Keywords:*** *analysis, CAD, CAE, FEA, element, mesh, method, stress*

# Capítulo I

## 1.1 Introducción general.

Ante la actual tendencia de disminuir el uso de vehículos motorizados debido no solo a los gases contaminantes que expiden sino también al volumen que la mayoría de estos ocupan en las vías de comunicación ha generado la búsqueda de transportes alternos que se adapten al estilo de vida actual. Es este tema el que impulsa la creación de nuevos vehículos, apoyados por eventos como lo es el HPVC de la ASME, es que surge la idea por parte de un equipo formado por alumnos de la facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla de generar un prototipo para dicha competencia en el año 2018.

Cabe mencionar que los criterios para la creación de dicho proyecto se basaron en el manual de reglas proporcionado por la asociación, aunque adaptado al entorno.

El presente proyecto pretende simular de una manera práctica y funcional por CAE el comportamiento estructural de un vehículo bajo las normas de la competencia H.P.V. organizado y supervisado por la organización internacional ASME.

Actualmente el uso de softwares CAD/CAM/CAE brinda muchas oportunidades en el desarrollo de productos al grado de crear un objeto digital y poder simular las condiciones a las que podrá estar sometido, o incluso a condiciones de mayor rigor para las que fue planeado, para así comprobar y mejorar factores de seguridad o geometrías en el diseño final.

Por otro lado, existen programas cuya única finalidad es el estudio de componentes por medio de códigos que permiten aplicar el MEF en piezas trabajadas en otros entornos, estos en su mayoría poseen menos herramientas CAD y estas se enfocan para elementos sencillos.

Para la realización de esta tesis se utilizó información bibliográfica, así como paquetes computacionales; además de investigación sobre el uso y aplicación del método de los elementos finitos.

Espero el tema desarrollado sirva para dar una mayor difusión a nivel licenciatura de este tipo de técnicas y a su vez a la inserción y motivación en participar en este tipo de eventos estudiantiles.

## 1.2 Antecedentes.

El objeto de estudio de este proyecto surge a partir de su origen como ya se mencionó en una competencia estudiantil, durante el proceso de desarrollo del prototipo a analizar que consto de varias facetas debido a que el marco estructural original fue diseñado y manufacturado en su mayor parte en el 2017.

Posteriormente retomado y modificado por otro equipo de trabajo al siguiente año, pero en su etapa de diseño y manufactura se omitieron factores como es el caso de estudio de esta tesis que hubieran mejorado y facilitado varios aspectos de su construcción y seguridad, así como un mejor entendimiento del prototipo.

Las tendencias marcan el uso de validación de productos antes de su fabricación, respecto a validar productos por CAE tienen la finalidad de asegurar un óptimo funcionamiento tanto del diseño como del material en el cual se fabricará sumado a lo anterior la seguridad y fiabilidad que este dará al consumidor final.

Este estudio se centrará en el cuadro del prototipo, trabajado en un modelo CAD realizado en software NX de Siemens, El material a analizar fue tubo de aluminio 6063 T6 de 1" y  $\frac{3}{4}$ " distribuidas en todo el cuadro (Figura 1).



**Figura 1. Marco Estructural (2017).**

### 1.2.1 ASME

La Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME por sus siglas en inglés) fue fundada en 1880 por los ingenieros mecánicos Alexander Lyman Holley , Rossiter Worthington, John Edison Sweet y Matthias N. Forney el 7 de abril de 1880 se realizó una reunión para crear formalmente la organización en el Instituto Stevens de Tecnología de Hoboken, de Nueva Jersey.

Muchos grupos intentaban crear organizaciones de derecho profesionales especializadas. En los Estados Unidos, la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles había estado activa desde 1852, y había organizado el Instituto Americano de Ingenieros de Explotación Minera en 1871.

En 1880 había 85 universidades de ingeniería en los Estados Unidos. La energía del vapor impulsaba la tecnología de entonces: locomotoras, buques, la maquinaria de las fábricas, y los equipos de las minas. La máquina de vapor Corliss y la caldera de Babcock y de Wilcox se hallaban en su punto culminante.

ASME estableció sus actividades de investigación en 1909, en áreas tales como las tablas relativas al vapor, características de los gases y de los metales, el efecto de la temperatura en la resistencia de los materiales, medios fluidos o coeficientes de paso por orificios.

Desde su inicio, ASME ha liderado el desarrollo de reglamentos técnicos, desde la normalización de los pasos de rosca de tuercas y tornillos, hasta abarcar más de 600 estándares de todo tipo de elementos mecánicos.<sup>7</sup> Su principal logro, sin embargo, fue mejorar la seguridad de los equipos térmicos, especialmente las calderas.

Entre 1870 y 1910 se habían registrado al menos 10.000 explosiones de calderas en Norteamérica.

Hacia 1910, la tasa se situó entre 1300 y 1400 al año.

Algunas explosiones se convirtieron en graves accidentes, y su eco en la opinión pública impulsó la búsqueda de una solución. Se formó un comité en 1911, que redactó el código de calderas publicado en 1914-15, más adelante incorporado en las leyes de la mayoría de los Estados Unidos y en las provincias canadienses.

Antes de 1930, cincuenta años después de que la ASME fuera fundada, la sociedad había crecido hasta alcanzar los 20.000 miembros, y su influencia en el trabajo de los técnicos norteamericanos era considerable.

El ferrocarril fomentó el asentamiento de ciudades en el centro de Estados Unidos, y la coordinación de sus horarios condujo al establecimiento de franjas horarias.

Los líderes de la ASME en el siglo XX, tales como Henry Robinson Towne, Frederick W. Taylor, Frederick Halsey, Henry L. Gantt, James M. Dodge, iniciaron las prácticas de gerencia que produjeron las reformas y la innovación que llevó a la precisión con la que trabajaban las máquinas, la producción en masa y el transporte comercial que abrió la nación y después el mundo a las empresas americanas.

La ASME está formada por 36 divisiones técnicas y 3 institutos. La estructura actual tiene su origen en 1920, cuando se fundaron las ocho primeras: Espacio aéreo, Combustibles, Gerencia, Ingeniería de los Materiales, Producción de materiales, Energía, Ingeniería de producción, y Transporte por ferrocarril.

La diversificación de la ingeniería propició que se crearan otras dos al año siguiente: Industrias del motor de combustión interna e Industria textil. Las adiciones más recientes son la división de Sistemas de almacenaje y la de Procesos de información.

Hoy, ASME es una sociedad mundial al servicio de los ingenieros industriales y de los fabricantes.

### 1.2.2 HPVC

La American Society of Mechanical Engineers (ASME), promueve desde su fundación el desarrollo de habilidades en todas las disciplinas de la Ingeniería desde el ámbito estudiantil universitario; uno de los eventos con los cuales desarrolla esta labor es el Human Powered Vehicle Challenge (HPVC).

En el cual un grupo de estudiantes de diversas áreas de ingeniería deben generar el desarrollo de un vehículo de propulsión humana cubriendo las áreas de: diseño, fabricación, pruebas de operación y funcionalidad, este evento es realizado por distintas universidades al rededor del mundo. Prototipo HPV BUAP 2018 (Figura 2).



**Figura 2. H.P.V (Human Powered Vehicle) desarrollado para E-FEST 2018.**

El Human Powered Vehicle Challenge (HPVC) es una de las competencias de gran importancia en ASME.

La razón de la existencia de los vehículos propulsados por humanos es que a menudo son el único medio de transporte en zonas subdesarrolladas e inaccesibles en el mundo. Por lo cual en el HPVC se busca que estos vehículos sean diseñados de forma innovadora y eficiente ya que pueden ser una forma cada vez más viable de transporte sostenible.

El HPVC ofrece una oportunidad para que los estudiantes demuestren la aplicación de los principios de diseño de ingeniería en el desarrollo de una alternativa de transporte práctico y sostenible (ASME Itesco, 2013).

### **1.2.3 Método de los Elementos Finitos MEF**

El desarrollo de la metodología de elementos finitos como una herramienta de análisis fue esencialmente iniciado con el advenimiento de las computadoras electrónicas digitales. En la solución numérica de un problema continuo es básicamente necesario establecer y resolver un sistema de ecuaciones algebraicas.

Usando el método de elementos finitos en una computadora digital, es posible establecer y resolver las ecuaciones que gobiernan sistemas complejos de una manera muy efectiva.

El método de elementos finitos fue inicialmente desarrollado como una verificación básica para el análisis de problemas en estructuras mecánicas, sin embargo, se reconoció rápidamente como una técnica que podía ser aplicada igualmente para la solución de muchos otros tipos de problemas.

Como es frecuente, el desarrollo original no se puede atribuir a una sola persona, ni tampoco se puede establecer una fecha exacta de cuando se inventó el método, lo que si podemos afirmar es que este método desarrollado por tres grupos distintos: matemáticos, físicos e ingenieros.

Aunque el método obtiene su valor real gracias a los desarrollos independientes hechos por ingenieros. Algunos de los que contribuyeron originalmente al desarrollo de este método son Turner, Argyris y Kelsey.

El nombre "elemento finito" fue acuñado en papel por Clough, quien presentó esta técnica para el análisis de esfuerzos en un plano en 1960. Desde los primeros desarrollos del método, se han hecho muchas investigaciones basadas en él, dado que el potencial del procedimiento fue identificado rápidamente.

Resumiendo, el principio de la técnica o método tiene entre 30 y 40 años, al menos, y probablemente establecido por algunos pioneros en forma independiente.

Los elementos finitos se sugirieron por el matemático R. Courant en 1943, cuya idea de dividir un problema continuo en regiones triangulares, para después aproximar dicho problema por medio de estos triángulos, es de gran ayuda para los investigadores de los años subsecuentes.

Típicamente los problemas de ingeniería, ya sea mecánica de sólidos o fluidos, han sido atacados en el pasado por medio de la derivación de ecuaciones diferenciales, que relacionan las variables de interés, después del uso razonado de los principios que apelan la ingeniería y la física.

Estos principios utilizados para establecer ecuaciones válidas, describiendo el comportamiento del problema de ingeniería en cuestión incluyen: equilibrio, ley de Newton sobre la fuerza que actúa sobre una masa, energía potencial, energía de deformación, conservación de la energía total, trabajo, termodinámica, conservación de masa, ecuaciones de Maxwell, y muchos más.

El problema parecía ser que siempre que se había hecho el difícil trabajo de formulación, la solución de las ecuaciones matemáticas resultantes, generalmente ecuaciones diferenciales, era casi imposible. Sólo problemas muy simples, de geometría regular con las condiciones de frontera más simples podían ser solucionados.

La fundación de la técnica de elementos finitos sobre la mecánica estructural contribuyó a su rápido desarrollo llevado a cabo por los pioneros en la última parte del siglo XIX, gracias a la contribución de varios investigadores se llegó a establecer lo que es un elemento finito.

La idea de Courant tuvo que esperar hasta el desarrollo de la computadora digital para poder dar solución a problemas más complejos.

Una vez desarrollada la computadora digital, se vio la oportunidad para el desarrollo de métodos matriciales para la organización de grandes sistemas de ecuaciones algebraicas, lo cual venía intrínsecamente incluido en la teoría de elementos finitos; recordando que la palabra "matriz" fue

introducida en el título de una conferencia dada por la fuerza aérea de los Estados Unidos Americanos en 1965.

De aquí el importante papel de los matemáticos como apoyo para los ingenieros en el uso de los métodos de solución de ecuaciones matriciales del álgebra lineal.

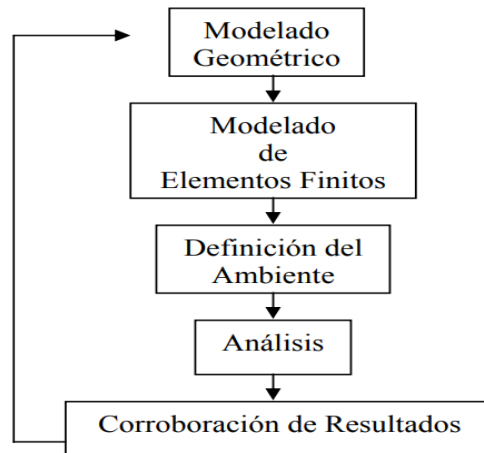
Recapitulando, el método de elementos finitos es uno en donde la dificultad de la solución matemática de los problemas con una gran geometría compleja es transformada de una ecuación diferencial aproximada, a un problema algebraico donde los bloques de construcción o elementos finitos tienen las ecuaciones complejas solucionadas para su forma elemental o simple.

La representación de la relación de las variables importantes para los pequeños, pero no infinitesimales elementos, es determinada a través de una aproximación de Rayleigh/Ritz, para cada uno de ellos.

Una vez hecho esto, una matriz de tamaño igual al número de variables desconocidas para el elemento puede ser construida para representarlo. Ahora, esto se convierte en una relación algebraica lineal y no una ecuación diferencial.

El problema completo puede ser de esta forma, como una ecuación algebraica muy larga, ensamblando las matrices de los elementos con ayuda de la computadora; de la misma forma como el problema real es construido por muchas, pero simples piezas de material.

La clave es la simplicidad y elegancia de la aproximación. Métodos especializados tales como hoy en día de Casticliano, pueden obtener la formulación correcta de elementos finitos, y programando la computadora para el ensamble y solución de los miles de ecuaciones que nos representan el problema, son una gran ventaja para la obtención de la solución correcta del mismo.



**Figura 3. Diagrama de Proceso de análisis por MEF. [4]**

El MEF es pues un método numérico para la resolución de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales, que aproxima la solución de problemas continuos, estableciendo las ecuaciones de contorno, condiciones iniciales, y se basa en la discretización del dominio del problema en subdominios llamados “Elementos”, estos están interconectados por una serie de puntos denominados nodos. Diagrama de Proceso de análisis por MEF (Figura 3)

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo también regirán al elemento. Así pasa de un sistema continuo (Infinitos grados de libertad), a un sistema con un número de grados de libertad finito, cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

## ***Tipos de elementos***

En los softwares de aplicación del MEF, así como en los análisis prácticos se debe optar por algún tipo de elemento, dependiendo de las restricciones de frontera, el tipo de carga y el elemento original a analizar. Para ello se describe a continuación los más usuales.

### ***I. Tipo Barra***

Las barras son elementos de dos nodos que se pueden colocar arbitrariamente en el plano  $x$ ,  $y$  o  $z$ . transmiten únicamente fuerzas axiales y en general tiene tres grados de libertad de traslación; por definición no tiene grados de libertad de rotación. Las barras se utilizan para diseñar estructuras como puentes, torres y edificios.

Las barras pueden ser empleadas en análisis de tipo no lineal, elástico y de grandes desplazamientos geométricos. El comportamiento elástico de tipo lineal está definido por el módulo de Young.

También pueden ser utilizados como condición de frontera si se les asigna un valor de rigidez muy elevado:

- La longitud del elemento es (entre 8 a 10 veces) mayor que su ancho.
- Está conectado al modelo con uniones que no transmiten momentos.
- Las fuerzas externas son aplicadas únicamente a los nodos o articulaciones.

### ***II. Tipo Viga***

Los elementos viga ofrecen resistencia tanto a las fuerzas como a los momentos; la diferencia entre las vigas y las barras es que las vigas soportan esfuerzos de torsión y flexión.

Son elementos tridimensionales con tres nodos, tienen un máximo de seis grados de libertad (traslación y rotación). Para aplicar correctamente un elemento viga se debe cumplir con lo siguiente:

- La longitud del elemento es mucho mayor que su ancho.
- Es constante en sus secciones y en sus propiedades.
- Puede transferir momentos.

- Y es capaz de manejar cargas distribuidas en su longitud.

### ***III. Tipo Membrana***

Son elementos formados por tres o cuatro nodos en tres dimensiones, se emplean para modelar objetos como redes o tejidos. Por definición no tienen grados de libertad de rotación, sin embargo, tiene infinitos grados de traslación.

Como únicamente se formula la rigidez del plano, solo se admiten cargas en el mismo plano que la membrana.

Las membranas se emplean cuando el grosor del elemento es muy pequeño comparado con su longitud o su ancho.

### ***IV. Tipo Bloque***

Los elementos tipo bloque tienen 6 o 8 nodos, aunque existen bloques reforzados con la habilidad de colocar nodos intermedios. Por definición no tienen grados de libertad de rotación, pero sí tres en traslación.

Existen varias versiones de bloques con 4, 5, 6, 7 u 8 nodos para facilitar el análisis de esfuerzos y vibraciones.

### ***V. Tipo Placa***

Estos elementos son utilizados para modelar partes automotrices o contenedores de paredes delgadas. Son elementos de 3 o 4 nodos en tres dimensiones. Contienen infinitos grados de libertad. Los elementos tipo placa se utilizan cuando:

- El ancho del elemento guarda una relación con el largo de aproximadamente 1/10.
- El desplazamiento es pequeño.
- El elemento permanece plano.

### **1.2.4 Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE)**

La ingeniería asistida por ordenador (CAE) es una disciplina que se encarga del conjunto de programas informáticos que permiten analizar y simular los diseños de ingeniería realizados con el ordenador, o creados de otro modo e introducidos en el ordenador.

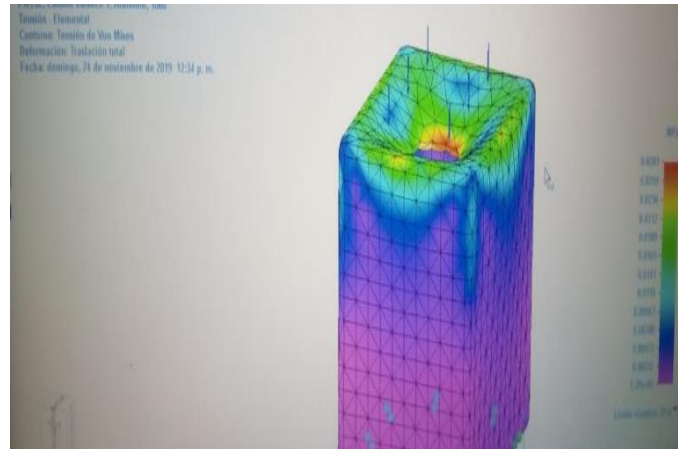
Para valorar sus características, propiedades, viabilidad, y rentabilidad. Su finalidad es optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación, y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado.

Consiste en el uso de software para simular el rendimiento con el objetivo de mejorar los diseños de los productos o de contribuir a la resolución de problemas de ingeniería para sectores muy diversos. Incluye la simulación, la validación y la optimización de productos, procesos y herramientas de fabricación.

El proceso típico de CAE consta de una serie de pasos de preprocesamiento: resolución y postprocesamiento.

En la fase de preprocesamiento, se modela la geometría o una representación del sistema y las propiedades físicas del diseño, así como el entorno en forma de cargas o limitaciones aplicadas, el modelo se resuelve aplicando una fórmula matemática adecuada de la física subyacente que se encuentra en el MEF.

En la fase de postprocesamiento, los resultados se presentan por medio de gráficos e imágenes para su revisión (Figura 4).



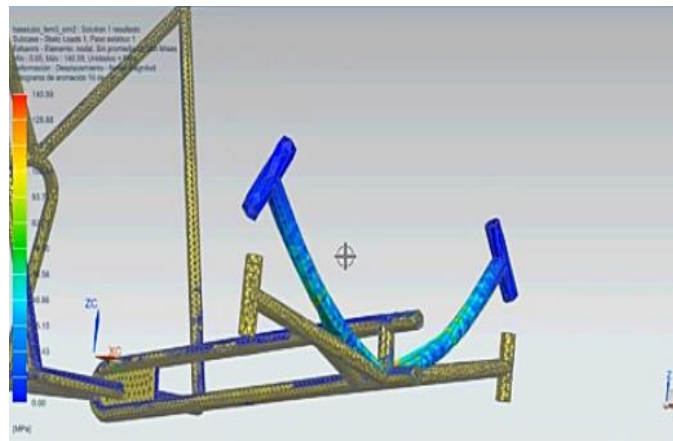
**Figura 4. Análisis CAE aplicado a una pieza.**

### *Aplicaciones de la CAE*

Las herramientas de ingeniería asistida por computadora pueden ser utilizadas por diferentes industrias como: construcción civil, metalmecánica, turbomáquinas, aeroespacial, automovilística, aeronáutica, petróleo y gas, naval, off shore, electrónica, entre otros

Las aplicaciones de la CAE son compatibles con disciplinas o fenómenos de ingeniería muy diversos.

- Análisis de tensión y de dinámicas en componentes y ensambles mediante el análisis de elementos finitos (FEA) (Figura 5).
- Análisis térmicos y de fluidos mediante la dinámica computacional de fluidos en 3D (CFD).
- Análisis de cinemática y dinámica de mecanismos (dinámica de cuerpos múltiples).
- Análisis acústicos mediante el FEA o un método de elementos límite.
- Simulación de eventos mecánicos (MES).
- Análisis de sistemas de control.
- Simulación de procesos de fabricación como la fundición, el moldeo o el troquelado por prensa.
- Optimización del producto o proceso.



**Figura 5. Análisis de esfuerzos a prototipo de cuadro estructural.**

### *Ventajas de la CAE*

Entre los beneficios de la CAE se encuentran:

- La reducción de los costes y del tiempo de desarrollo del producto, con una mejora de la calidad y de la durabilidad del producto.
- Las decisiones de diseño se pueden tomar sobre la base de su impacto en el rendimiento.
- Los diseños se pueden evaluar y perfeccionar gracias a las simulaciones por ordenador en lugar de realizar pruebas con prototipos físicos, lo cual permite un ahorro de tiempo y dinero.
- La CAE puede proporcionar información sobre el rendimiento en etapas más tempranas del proceso de desarrollo, cuando resulta más económico efectuar cambios en el diseño.
- La CAE ayuda a los equipos de ingeniería a gestionar el riesgo y a comprender las implicaciones en el rendimiento de sus diseños.

- La gestión integrada de datos y procesos de CAE amplía la capacidad de utilizar de forma efectiva la información sobre el rendimiento, así como de mejorar los diseños para una comunidad más amplia.
- Los problemas relativos a la garantía se reducen gracias a la identificación y a la eliminación de posibles problemas. Si se integra correctamente en el desarrollo de productos y de la fabricación, la CAE puede permitir una resolución más temprana de los problemas, lo que puede reducir significativamente los costos asociados con el ciclo de vida del producto.

### **1.2.5 Programas**

En la actualidad diversas compañías ofrecen al mercado muchas herramientas para el diseño, manufactura y simulación de productos, mucho de los cuales van enfocados a diversos sectores como son aeronáutico, automotriz, ferroviario, etc.

Cada uno de estos poseen igualdades y diferencias en sus módulos, para la creación de prototipos muchas veces un mismo programa sirve para determinar si soporta las diversas cargas a las que será sometido, pero en muchas ocasiones se requiere de programas especializados solo en los estudios de elemento finito.

Son muchas las empresas que ofrecen paquetes para el diseño e implementación de CAE, existen en el mercado programas como: SolidWorks, Catia, PTC Creo, Inventor, Nx, Solid Edge, etc., que integran el diseño junto con sus solvers de simulación. Por otro lado, como se mencionó anteriormente hay programas/solvers especializados en FEA de los cuales destacan: LS-DYNA, Hyperworks, Ansys, Abaqus/CAE, MSC Nastran, ANDINA, etc. que gozan de gran compatibilidad con los programas CAD más usados, lo que permite validar los productos desarrollados en cualquier entorno de los antes mencionados.

El dominio y capacitación en la mayoría de programas CAE requiere de mucha inversión y muchas veces el acceso es limitado debido al alto costo de licencias por parte de estas compañías, la ventaja de los programas que mezclan el entorno de diseño y simulación suele ser más atractivo para las empresas en cuestión económica ya que en muchas ocasiones el mismo ingeniero designado al área de diseño es el que simula las piezas, aunque el dominio en CAD no garantiza que este se tenga en CAE, por lo que capacitar a una persona suele ser una gran inversión justificada.(Santoyo, 2018)

Dos de los programas que se emplearon están basados en el código NASTRAN, que fue un programa (FEA) desarrollado originalmente para la NASA a finales de 1960 con financiación del gobierno de los Estados Unidos para la industria aeroespacial, MacNeal-Schwendler Corporation (MSC) fue uno de los desarrolladores del código, posteriormente fue adquirido por Autodesk y Siemens PLM e integrado en sus programas.

El otro código llamado Abaqus fue desarrollado originalmente por Hibbitt, Karlsson y Sorensen, Inc., (HKS) en 1978. y posteriormente adquirido por Dessault Systemes, el nombre y el logotipo de este software se basan en el ábaco herramienta de cálculo, y está basado en un el código abierto de lenguaje de script Python.

### ***I. NX Nastran***

El software NX de Siemens PLM es una solución integral, potente y flexible que le ayuda a ofrecer productos mejorados de forma más rápida y eficaz. Es un software CAD-CAM-CAE por lo que facilita a sus usuarios soluciones de diseño, simulación y fabricación.

NX ofrece un conjunto integrado de herramientas que coordina distintas disciplinas, preserva la integridad de los datos y la intención de diseño y busca optimizar el proceso completo, a la vez que da soporte a todos los aspectos del desarrollo de productos, desde el diseño de conceptos hasta la ingeniería y la fabricación.

Es un solver FEM que incluye soluciones para:

- Análisis estructurales lineales y no lineales
- Respuesta dinámica
- Acústica
- Dinámica de rotor
- Aeroelasticidad
- Análisis térmico

Cuenta con todas las soluciones antes mencionadas disponibles en un único solver y sus formatos de archivos de entrada y de salida son los mismos para todos los tipos de solución, lo cual simplifica considerablemente los procesos de modelado.

Es empleado en varios departamentos de ingeniería del sector aeroespacial, automovilístico, electrónico, de maquinaria pesada y dispositivos médicos, entre otros, por sus necesidades esenciales, de modo que puedan producir diseños seguros, fiables y optimizados en ciclos de diseño cada vez más cortos.

## ***II. Abaqus/CAE***

Es un software para análisis por elementos finitos que sirve para simular y resolver eventos dinámicos o de conducta no lineal como los que pueden aplicarse a productos electrónicos, automotrices o balísticos, donde se involucre caída libre, choques e impactos. Es un programa de producción en ingeniería con pre y post análisis.

A diferencia de los otros dos es un software enfocado a FEA.

Abaqus se utiliza en la automoción , aeroespacial , industrias y productos industriales. El producto es muy popular con las instituciones no académicas y de investigación en ingeniería debido a la gran capacidad de modelado de materiales, y la capacidad del programa para su personalización,

por ejemplo, los usuarios pueden definir sus propios modelos de materiales para que los nuevos materiales también podrían ser simuladas en Abaqus, también proporciona una buena colección de multifísicos capacidades, tales como acoplado acústico-estructural, piezoeléctrico, y las capacidades estructural de poros, lo que es atractivo para las simulaciones a nivel de producción donde múltiples campos necesitan ser acoplado.

Abaqus fue diseñado inicialmente para tratar el comportamiento físico no lineal; como resultado, el paquete tiene una amplia gama de modelos de materiales tales como elastómero e hiperelástica

### ***III. Autodesk Inventor***

Inventor es un software para diseño mecánico 3D, con el cual se puede crear documentación y simulación de productos. el uso de este programa facilita el análisis estático lineal de estructuras, siendo una buena herramienta de apoyo y comparación para este trabajo.

Al ser un software CAD/CAM/CAE, posee características muy similares a las de Nx, con diferencias en herramientas para el preprocesamiento y postprocesamiento de piezas en simulación CAE, siendo que en el caso de Nx estos módulos ya vienen integrados en el programa, por el contrario, en Inventor es necesario vincular este con Autodesk Nastran cuando se hacen simulaciones que no sean estático lineales con esfuerzos.

### **1.3 Hipótesis.**

La obtención de resultados del estudio por distintos programas presentados en esta tesis ayudara a corroborar y mejorar el entendimiento del comportamiento que tuvo el vehículo durante su fase de desarrollo con lo cual se podrá plantear que su elaboración se realizó de una manera adecuada, así como también se generaran datos suficientes para mejorar aspectos tanto estéticos como funcionales en el vehículo.

### **1.4 Justificación.**

Hoy en día la era de la digitalización permite aplicar nuevas técnicas que facilitan el diseño y manufactura a la mayoría de los productos que ocupamos dando un entendimiento de su comportamiento por medio de la simulación de entornos que podrían afectar su funcionamiento e incluso presentar un riesgo para el consumidor, es por ello que la presente tesis pretende aplicar los conocimientos adquiridos en el transcurso de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Eléctrica en la realización y estudio de un vehículo desarrollado para la competencia ASME E-FEST 2018 realizada en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Toluca, lo cual llevo un proceso y fases como lo fueron: diseño, manufactura, pruebas, correcciones y elaboración de un reporte técnico con normas establecidas por lineamientos ASME. Lo que implicó una pequeña inserción de los participantes en la aplicación de ciertos conocimientos de ingeniería y da pauta a la adquisición de conocimientos prácticos y teóricos aplicables en el campo laboral.

La finalidad de realizar esta tesis es complementar la investigación y el desarrollo de este proyecto dándole un enfoque más amplio y completo respecto a lo que se presentó en ese entonces, siendo así un complemento de la formación académica del autor.

## **1.5 Planteamiento del problema.**

Uno de los grandes retos que conlleva la fabricación de vehículos y componentes es lograr el óptimo funcionamiento de la estructura fabricada con respecto a la geometría de referencia (CAD) y que esta se mantenga dentro de los límites fijados. Este objetivo se debe conseguir en el marco de un proceso de fabricación que ha de estar definido de forma segura con gran antelación, en concordancia con su desarrollo. En el caso concreto de la creación de un vehículo, los equipos de fabricación deben ser diseñados y ejecutados según vaya avanzando el proceso en cuestión. Pero, en esta etapa, el proceso de fabricación no se encuentra, ni mucho menos, definido con seguridad, tanto en lo que respecta a los límites de tolerancia deseada como, en términos generales, a su viabilidad. Es cierto que a estas alturas ya se han fijado el número y las tareas de las zonas de fabricación específica. No obstante, si en una fase posterior de desarrollo surgen problemas relacionados con la tolerancia dimensional del producto, las posibilidades de resolver estos problemas son, por norma general, muy limitadas, debido, precisamente, a las condiciones generadas.

La dificultad descrita se puede superar mediante el uso de un instrumento de simulación altamente eficaz, con este se puede lograr:

- Asegurar el proceso de fabricación previsto.
- Determinar las causas que originan los diversos tipos de deformación del material.

Si se considera que no tuvo una sola fase de desarrollo sino varias por el contexto en el que se trabajó sobre aquel objeto se podría decir que todo esto generó un problema de estudio más complejo, ya que, aunque no fue totalmente diseñado por una persona u equipo en particular cada integrante que tuvo la oportunidad de trabajar en el aporte uno o más elementos en la estructura.

### **1.5.1 Fundamentos del Método**

Se aplicará un análisis FEA al modelo CAD con la finalidad de obtener resultados que den un entendimiento más detallado del comportamiento estructural del prototipo comparando dos vertientes, uno con mallado Shell de tipo triangular solo en el entorno de Nx Nastran y otro a un cuerpo solido con mallado tetraédrico en los tres programas proporcionará un punto de comparación que servirá para entender y aproximarse al comportamiento de lo realizado para el evento HPV.

Para lo cual se requerirá la desratización del problema en el caso de un medio continuo que se lleva a cabo mediante un proceso de modelado para convertirlo en un numero finito de elementos ensamblados entre sí en puntos llamados nodos, el planteamiento de las ecuaciones de desplazamientos para dichos nodos y la imposición de las condiciones de contorno apropiadas en términos de compatibilidad de desplazamiento nodal.

De la resolución de este como un todo, se obtendrá el campo de desplazamientos para cada uno de los nodos y, a partir de eso y si fuese necesario, el campo de tensiones.

Siguiendo este planteamiento, los errores se deberán principalmente a la aproximación del dominio, del comportamiento en el interior de cada elemento y la precisión aritmética usada en la resolución del sistema de ecuaciones mediante métodos numéricos.

### **1.5.2 Elemento**

El subsiguiente desarrollo matemático considera un elemento genérico  $e$  de nodos  $i, j, \dots, k$ , de superficies  $S^e$  y volumen  $V^e$ . (Naranjo, 2015)

### **1.5.3 Campo de desplazamiento**

El campo este dictado por:

$$= \begin{pmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ \vdots \\ \{a_n\} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde  $\{a^e\}$  es el vector columna de desplazamientos, de cada nodo en coordenadas locales, que serían de la forma (Figura 6):

$$= \begin{pmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

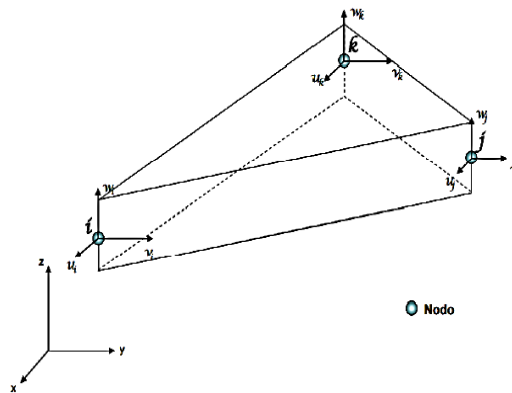


Figura 6. Desplazamientos en un ele-

El campo de desplazamiento queda definido por la relación:

$$u(x y z) = [N(x y z)] \cdot \{a^e\} = \left[ [N_i(x y z)], [N_j(x y z)], \dots, [N_k(x y z)] \right] \cdot \begin{pmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ \vdots \\ \{a_k\} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Donde  $[N_i(x_i \ y_i \ z_i)] = [I]$ ,  $[N_i(x_i \ y_i \ z_i)] = [0]$  sí  $i \neq j$ , puesto que las funciones de interpolación toman los valores de los desplazamientos nodales.

Se considerarán las mismas funciones de forma en todas las componentes de  $u(x, y, z)$  se deduce que  $[N_i(x_i, y_i, z_i)] = [N_i(x_i, y_i, z_i)] \cdot [I]$  en donde  $[N_i(x, y, z)]$  es la función escalar de forma:

$$\{y\} = [S] \cdot [u] \cdot \{a^e\} = [B] \cdot \{a^e\} \text{ con } [B] = [S] \cdot [N] \quad (4)$$

Donde  $[S]$  es una matriz de operacional que incluye las derivaciones parciales adecuadas.

Teniendo en cuenta que  $[N] = [[N_i], [N_j], \dots, [N_k]]$  se tendrá:

$$[B] = [S][N] = [[S][N_i], [S][N_j], \dots, [S][N_k]] = [[B_i], [B_j], \dots, [B_k]] \quad (5)$$

Dónde:  $[B_i] = [S][N_i]$

### 1.5.4 Campo de esfuerzos del elemento

El campo de esfuerzos  $\{\sigma\}$  que contendrá el mismo número de elementos que el campo de deformaciones  $\{\gamma\}$ , vendrá dado por:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} = [D] \cdot \{\gamma\} - [D]\{\eta\} \quad (6)$$

Donde  $[D]$  es la matriz de rigidez del material y  $\{\eta\}$  son las deformaciones iniciales.

### 1.5.5 Equilibrio del elemento

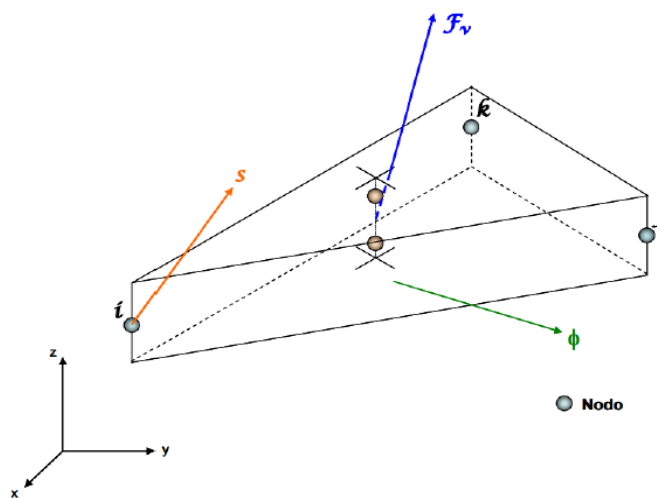


Figura 7. Fuerzas que intervienen en un elemento.

Suponiendo que existe una distribución de fuerzas volumétricas por unidad de volumen  $\{F_v\}$  y que tuviera bordes libres, sumado a fuerzas superficiales  $\{\phi\}$ , se puede calcular el conjunto de fuerzas nodales  $\{s\}$  que permiten el equilibrio del elemento.

Si se aplica el principio de desplazamientos virtuales en correspondencia a un desplazamiento de un elemento arbitrario denominado  $\{\delta a^e\}$ , el campo de desplazamiento de dicho elemento vendrá dado por:

$$\{\delta u\} = [N] \cdot \{\delta a^e\} \quad (7)$$

Mientras que el campo de deformaciones virtuales cinemáticamente consiste con  $\{\delta a^e\}$  será:

$$\{\delta \gamma\} = [B] \cdot \{\delta a^e\} \quad (8)$$

De acuerdo con este principio los desplazamientos virtuales resultaran en:

$$\{\delta a^e\} \cdot \{s\} + \int_v \{\delta u\}^T \cdot \{F_v\} \cdot dV + \int_s \{\delta u\}^T \cdot \{\phi\} \cdot dS = \int_v \{\delta u\}^T \cdot \{\sigma\} \cdot dV \quad (9)$$

Sustituyendo los valores de  $\{\delta u\}$ ,  $\{\delta \gamma\}$  y  $\{\sigma\}$  quedará:

$$\{\delta a^e\} \left[ \{s\} + \int_v \{N\}^T \{F_v\} dV + \int_s \{N\}^T \{\phi\} dS - \int_v \{B\}^T [D] [B] dV \{a^e\} + \int_v \{B\}^T [D] [\eta] dV \right] = 0 \quad (10)$$

La expresión anterior debe verificarse para cualquier valor de desplazamiento virtual de  $\{\delta a^e\}$ :

$$\{S\} \left[ \int_v \{B\}^T [D] [B] dV \right] \cdot \{\delta a^e\} - \int_v \{B\}^T [D] [\eta] dV - \int_v \{N\}^T \{F_v\} dV - \int_s \{N\}^T \{\phi\} dS = [K^e] \cdot \{a^e\} + \{s_0\} - \{p^e\} \quad (11)$$

Donde  $[K^e]$  es la matriz de rigidez del elemento  $\{s_0\}$  son las fuerzas iniciales y  $\{p^e\}$  la resultante de las fuerzas volumétricas y superficiales en el elemento.

### 1.5.6 Integración del sistema de ecuaciones para el método continuo

Una vez calculados los valores obtenidos de la matriz de rigidez de cada uno de los elementos y las resultantes de las fuerzas equivalentes en los mismos, es necesario generar las matrices de transformación de coordenadas locales del elemento a coordenadas globales del medio continuo. (Naranjo, 2015, pág.45)

Se obtendrán así las matrices de rigidez y los vectores de fuerzas equivalentes en ejes globales. Mediante un proceso de ensamblado, se constituirá el sistema completo de ecuaciones con los desplazamientos en los nodos como incógnitas, que se resolverá eliminando los grados de libertad dependientes como consecuencia de las diferentes ligaduras, los nodos comunes a uno y otro elemento tendrán los mismos desplazamientos.

Mediante la ecuación:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\epsilon\} = [D] \cdot \{\gamma\} - [D] \cdot \{\eta\} \quad (12)$$

Se recuperará el campo de esfuerzos de cada elemento.

## **1.6 Objetivos.**

### **1.6.1 Objetivo general.**

El objetivo de este proyecto es realizar el análisis a un cuadro de un prototipo de vehículo para una competencia estudiantil denominada HPVC por parte del organismo internacional ASME, mediante la aplicación del método de los elementos finitos en distintos programas con la finalidad de comparar resultados y poder hacer un análisis más exhaustivo.

Para ello se emplearán los programas y herramientas CAE: NX (Siemens), Inventor (Autodesk) y Abaqus (Dessault Systèmes), bajo las condiciones del reglamento de seguridad y a las cargas a las que será sometido es que se generará un entorno de simulación lo más aproximado para poder determinar su resistencia y durabilidad, así como también si este podrá concursar en este tipo de eventos.

### **1.6.2 Objetivos específicos.**

- Identificar las oportunidades para la innovación de en México.
- Analizar el material empleado en el desarrollo del vehículo.
- Verificar la viabilidad para participar y cumplir los lineamientos en una competencia HPVC.
- Realizar un estudio comparativo de entornos de simulación CAE.
- Garantizar la seguridad del ocupante.
- Determinar errores de diseño.

## Capítulo II

### 2. Diseño de vehículo HPVC

#### 2.1 Lineamientos Generales de la competencia

##### 2.1.1. Acerca de los Vehículos

1. Los vehículos deberán haber sido diseñados y construidos por equipos de estudiantes de Ingeniería Mecánica o carreras afines.
2. El diseño debe haber sido hecho de acuerdo con los requerimientos y preceptos emitidos por la institución organizadora y ASME Internacional.
3. La única fuente de energía usada durante la carrera para movilizar los vehículos debe ser la humana. Los acumuladores de energía usados, si es el caso, deben estar descargados al inicio y deberán cargarse con el movimiento de este.
4. Ningún vehículo podrá usar ningún tipo de motor.
5. Los participantes deberán estar preparados para explicar a los jurados la adecuación de su vehículo a las reglas de la competencia.
6. A aquellos vehículos con dispositivos inusualmente peligrosos a juicio de los jurados se les requerirá el retiro de dichos dispositivos para participar en la competencia.

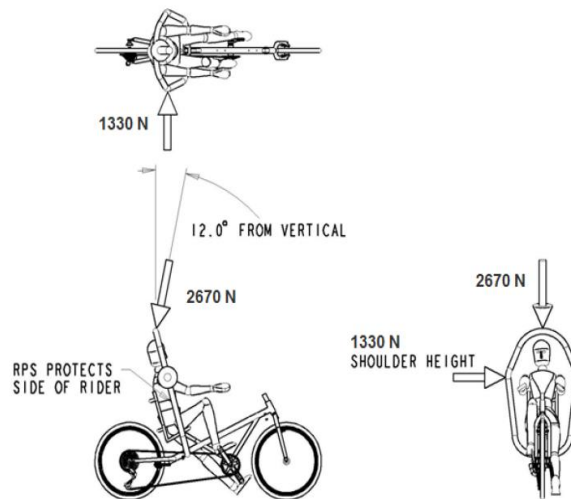
##### 2.1.2. Acerca de las dimensiones de los vehículos

1. Los vehículos deben medir a lo sumo **1.10mts** de ancho.
2. El largo de los vehículos es discrecional de los competidores, pero debe ajustarse a los radios de giro de los circuitos de la competencia.
3. Los vehículos serán de dos, tres o cuatro ruedas.

## 2.2 Seguridad

### 2.2.1. Acerca de la seguridad de los vehículos

- a) Cada vehículo debe contar con un sistema de protección de seguridad antivuelco que garantice que, en caso de volcamiento, quedando el vehículo boca abajo o de lado, el conductor no estará en contacto con el suelo con una tolerancia de al menos 15 cm.
- b) Los conductores deberán portar cinturón de seguridad.
- c) La jaula antivuelco deberá resistir al menos **2670N** aplicados en un ángulo de  $12^\circ$  sobre la vertical y una carga de **1330N** en los laterales de esta. Posterior a esto se examinará por un jurado, que verificará que:
  - c.1) No presente una deformación permanente, fractura o delaminación
  - c.2) La máxima deformación elástica será de **5.1cm** para los **2670N** y de **3.8cm** para los **1330N**, estas no deberán entrar en contacto con el piloto (**Figura 8**).



**Figura 8. Requerimientos de seguridad.**

- d) En caso de ser solicitado por el jurado el vehículo podrá ser puesto colocado en posición de volcadura con un miembro del equipo para comprobar la integridad de los pilotos.

- e) El sistema de protección de seguridad antivuelco deberá ofrecer resistencia a la abrasión en caso de volcadura con deslizamiento
- f) Las modificaciones hechas a los vehículos entre los eventos de la competencia no deben comprometer la seguridad del vehículo. Si el jurado determina que cualquier modificación ha reducido la seguridad del diseño a un nivel inaceptable, el vehículo podrá ser descalificado del evento.
- g) Los bordes y superficies del vehículo deben estar libres de aristas puntiagudas o bordes afilados.
- h) El sistema de protección de seguridad del vehículo debe proteger los pies del conductor ante la eventualidad de un choque frontal.
- i) La evaluación general de seguridad será realizada antes de la primera competencia a todos los vehículos. Aquellos vehículos que no satisfagan los requerimientos de seguridad podrán ser descalificados.
- j) Los competidores deberán portar casco de seguridad durante la competencia.
- k) Todos los participantes deberán probar su afiliación a un sistema general de salud.
- l) La seguridad de los participantes, espectadores y público general será siempre vigilada en el transcurso de la competencia. El jurado puede detener la competencia en caso de que la seguridad se vea comprometida, ningún evento puede ser aplazado o cancelado si se incumple los estándares de seguridad al menos de que se llegue a un acuerdo entre los jueces, ASME y la institución organizadora de lo contrario se considerara otros factores para las premiaciones.

### **2.2.2. Requerimientos de seguridad de rendimiento**

Cada vehículo deberá demostrar que puede frenar a una velocidad de 25 Km/h en una distancia de 6 metros, además de demostrar un radio de giro no mayor a 8 metros, deberá demostrar poseer estabilidad en su andar recorriendo una distancia de 30 metros a una velocidad de 5-8 Km/h.

### **2.2.3. Apelaciones y Protestas**

1. Las protestas deben ser anunciadas ante algún juez de la competencia al momento del incidente o 15 minutos después del anuncio de los resultados.
2. Después de presentada la intención de protesta debe presentarse una protesta por escrito dentro de los 30 minutos siguientes a la intención de protesta (no se aceptarán como válidas protestas orales). Se exige ser específico en la protesta. Las protestas serán examinadas y resueltas por los jueces y sus resultados serán considerados definitivos.

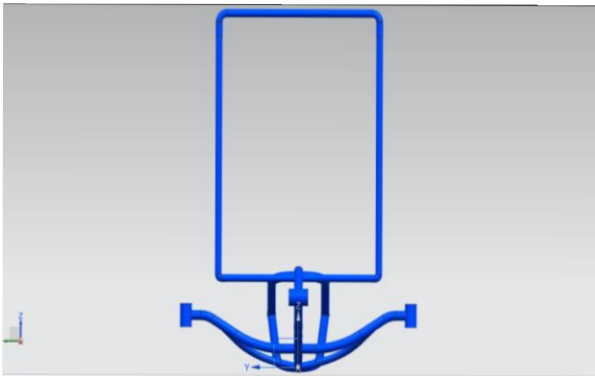
### **2.2.4. Participación y composición de los equipos**

1. En cada una de las competencias (Diseño, Resistencia y Velocidad), cada equipo deberá incluir la participación de al menos dos mujeres según la normatividad de participación de cada circuito (disponible próximamente).
2. Los participantes de cada equipo deben ser estudiantes regulares de una Institución de Educación Superior o haberse graduado dentro de los seis meses previos a la competencia.
3. Los equipos deben estar integrados por aquellos estudiantes que diseñaron y construyeron el vehículo.

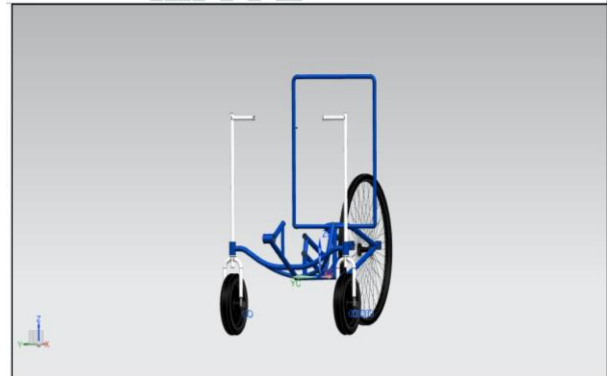
## 2.3 Modelo CAD

### 2.3.1 Descripción del modelo

Lo primero a realizar la obtención del modelo CAD del cuadro estructural fabricado en el 2018, el archivo fue convertido a formatos Step y parasólido para poder ser analizado en los tres solvers (modelos a estudio Figura 9 y 10).



**Figura 9. Modelo CAD en NX del vehículo manufacturado.**



**Figura 10. Ensamble preliminar de llantas en prototipo.**

## Capítulo III

### 3.1 Material

#### 3.1.1 Características del material

El aluminio (Al) es un metal no férreo el cual presenta una combinación de propiedades que lo hacen un material útil para la industria e ingeniería, tiene una densidad de 2.700 Kg/cm<sup>3</sup>, es un 34 % más baja que la densidad del acero (7.870 Kg/cm<sup>3</sup>) y un módulo de elasticidad de 69.5MPa. Aun cuando las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la tensión más bajas que el acero, su relación entre resistencia y peso es excelente. Al aluminio se le puede dar forma con toda facilidad, posee alta conductividad térmica y eléctrica y no muestra transiciones de dúctil a quebradizo a baja temperaturas.

Principal Aleante	Designación
Al	1XXX
Cu	2XXX
Mn	3XXX
Si	4XXX
Mg	5XXX
Mg y Si	6XXX
Zn	7XXX
Otros Elementos	8XXX
Series no utilizadas	9XXX

Tabla 1. Clasificación por elementos de aleaciones de Aluminio.

En la industria se pueden encontrar diversos métodos para aumentar la resistencia mecánica del aluminio, uno de los cuales es mediante la aplicación y combinación con otros elementos. Los principales elementos de aleación son el cobre (Cu), magnesio (Mg), silicio (Si), manganeso (Mn) y zinc (Zn). Este proceso es uno de los más importantes, ya que el aluminio puro presenta una combinación de propiedades mecánicas bajas las cuales se

optimizan al ser aleado con otro elemento. La designación de los principales elementos aleantes se puede observar en la **Tabla 1**.

A continuación, se describen algunas características de cada grupo de aleaciones:

- **1XXX** - (99.00% mínimo de Al), con una resistencia última entre 69 MPa a 186 MPa. Se caracterizan por tener una excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad eléctrica y térmica, bajas propiedades mecánicas y se puede trabajar de una forma aceptable. Sus mayores impurezas son el Hierro y Silicio. Estas aleaciones son ampliamente utilizadas en la industria eléctrica debido a su buena conductividad eléctrica y buena relación peso resistencia mecánica. La aleación más utilizada por su alto contenido de aluminio es la 1350 la cual contiene un mínimo de Aluminio del 99.5% lo cual le da una conductividad de 61.0% IACS.
- **2XXX - (Cu)** con una resistencia última entre 186 MPa a 427 MPa. El Cobre es el principal aleante, con un rango entre 0.7% a 6.8%, requiere de tratamientos térmico en solución para alcanzar sus propiedades óptimas, alcanzando y algunas veces superando la resistencia mecánica del acero dulce por la formación de la fase CuAl<sub>2</sub>. Estas aleaciones tienen una buena resistencia a la fluencia reduciendo su elongación, no tienen una buena resistencia a la corrosión, en ciertas condiciones pueden presentar corrosión intergranular, por lo que requiere de una protección galvánica adicional. Esta familia de aleaciones es muy utilizada en la industria aeronáutica.

- **3XXX - (Mn)** con una resistencia última entre 110 MPa a 283 MPa. Manganeseo es el aleante principal, en un rango entre 0.05% a 1.8%, no son tratables térmicamente, tienen buena resistencia a la corrosión, buena formabilidad y pueden ser utilizadas en aplicaciones que requieran de altas temperaturas,
- **4XXX - (Si)** con una resistencia última entre 172 MPa a 379 MPa. Silicio es el mayor aleante, en un rango que va de 0.6% a 21.5%, el cual reduce la temperatura de fusión por lo que se usa para la soldadura, no son tratables térmicamente.
- **5XXX - (Mg)** con una resistencia última entre 124 MPa a 352 MPa. Magnesio es su aleante principal, en un rango entre 0.2% a 6.2% cuando se mezcla con Manganeseo el resultado es de moderado a alto en su resistencia mecánica sin tratamiento térmico, posee buenas propiedades para ser soldado y buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos, cuando el magnesio se encuentra por arriba del 3.5% se debe tener cuidado con la temperatura de trabajo ya que esta no debe rebasar los 150°F para evitar la corrosión por estrés, el cual es un fenómeno en el que se presentan fisuras en el material debido a esfuerzos residuales que son liberados.
- **6XXX - (Mg y Si)** con una resistencia entre 124 MPa a 400 MPa. Silicio y Magnesio son sus mayores aleantes y los dos elementos se encuentran cercanos al 1.5% lo que lo hace tratable térmicamente, no tan resistente como las aleaciones 2XXX y 7XXX, posee buena formabilidad y resistencia media a la corrosión, este grupo de aleaciones son muy utilizadas en la construcción y la arquitectura, así como en la industria principalmente en forma de extrusiones y en muchas ocasiones son

utilizados como elementos estructurales. Se sabe que Mg<sub>2</sub>Si (Silisuro de Magnesio) es el responsable en las aleaciones 6XXX de proporcionar la dureza al perfil una vez que es tratado térmicamente.

- **7XXX - (Zn)** con una resistencia entre 221 MPa a 607 MPa. Zn es su mayor aleante, en un rango entre 0.8% a 12.0%, combinado con Magnesio resulta en aleaciones tratables térmicamente con una resistencia muy alta, debido a la formación de la fase MgZn<sub>2</sub> en este grupo se encuentra la aleación 7075 que ha sido la aleación de aluminio con mayor resistencia mecánica hasta ahora encontrada, sus aplicaciones son especialmente en la industria aeroespacial como elementos de soporte y son muy difíciles de soldar.

Aleación	Aplicaciones típicas
1050	Equipamientos para la industria química, automotriz y ferroviaria.
1100	Conformado de chapa, repujado.
5052	Tuberías soldadas.
5083	Recipientes a presión.
6061	Estructuras de servicio pesado, camiones y naves marinas
6063	Perfilería para automóviles, tubos y estructuras arquitectónicas.
7075	Estructuras aeronáuticas.

**Tabla 2. Aplicaciones de distintas aleaciones de Aluminio.[16]**

### ***Clasificación de las aleaciones de aluminio por su tratamiento de endurecimiento.***

Las aleaciones de aluminio se clasifican dependiendo el método de fabricación en dos grupos fundamentales aleaciones forjadas y fundidas. Estos dos grupos de aleaciones tienen composiciones químicas, mecánicas y microestructurales que son considerablemente diferentes entre sí.

Dentro de cada grupo principal es posible dividir las aleaciones en dos subgrupos: aleaciones que pueden recibir tratamiento térmico (se les puede realizar un tratamiento térmico para aumentar sus propiedades mecánicas) y las que no pueden recibir tratamiento (un claro ejemplo de las aleaciones de las serie 1XXX y 3XXX, lo cual es debido a que estas aleaciones solo presentan una fase, ya que la presencia de otros elementos aleantes es baja), solo el trabajo en frío y el endurecimiento por deformación permite aumentar las propiedades mecánicas de estas aleaciones.

Para identificar las aleaciones forjadas de aluminio se utiliza un código de cuatro dígitos “XXXX”. El primer número indica los principales elementos de aleación, y los números restantes se refieren a la composición química de la aleación.

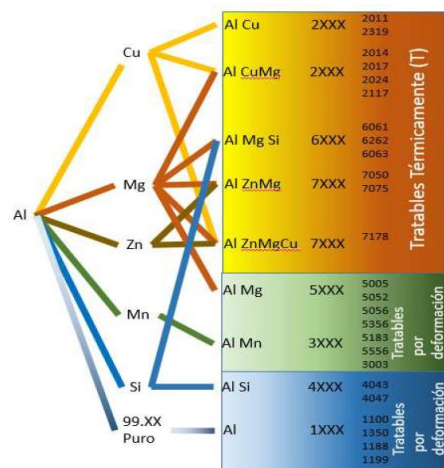
El grado de endurecimiento está dado por la notación del templeado T (endurecido por envejecimiento) o H (trabajada en frío), los numerales que siguen a la T o H indican la cantidad de endurecimiento u otros aspectos del procesamiento de la aleación.

Las aleaciones de aluminio fundidas se designan mediante tres dígitos “XXX” y un cuarto dígito “.X” separado por un punto decimal, el cual indica la forma del producto, 1 o 2 si es un lingote, y 0 para fundición.

Las Aleaciones de Aluminio son categorizadas como tratables térmicamente si los tratamientos tienen beneficios significativos en la dureza o no tratables térmicamente si la aleación no responde a un endurecimiento.

Entre estas aleaciones existen aquellas que pueden ser endurecidas mediante trabajo mecánico y aquellas que simplemente no cambian después de solidificar, como se puede observar en la **Figura 11**.

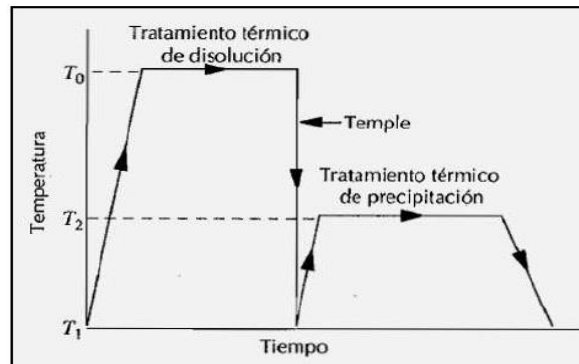
Los tratamientos térmicos se utilizan para modificar las propiedades mecánicas del material 16 y para recristalizar la estructura granular. Las aleaciones que contienen Cu, Mg, Si y Zn pueden ser tratadas térmicamente para mejorar significativamente su resistencia a través de la disolución y reprecipitación de la fase soluble.



**Figura 11. Clasificación de las aleaciones de Aluminio según su tratamiento de endurecimiento. [13]**

Las aleaciones extruidas que responden al incremento en resistencia por medio de tratamiento térmico son las que corresponden a las series 2XXX (Al-Cu, Al-Cu-Mg), la serie 6XXX (Al-Mg-Si) y la serie 7XXX (Al-Zn-Mg); de las cuales se hablará más adelante. Todas dependen del tratamiento de envejecimiento para aumentar su resistencia mecánica y se pueden clasificar en dos grupos: las que tienen resistencia media y son soldables (AlMg-Si y Al-Zn-Mg) y las aleaciones de alta resistencia (que han sido desarrolladas en principio para componentes de ejes de aviación, Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Cu), la mayoría de las cuales son muy difíciles de soldar, el endurecimiento por precipitación, las

propiedades mecánicas de algunas aleaciones metálicas como es el caso del aluminio pueden aumentar debido a la formación de partículas finas precipitadas en una matriz de metal deformable y uniformemente dispersas, esta transformación se puede alcanzar mediante un tratamiento térmico denominado endurecimiento por precipitación o envejecimiento. Una ventaja significativa de aplicar un endurecimiento por precipitación es que puede usarse para aumentar la resistencia a la fluencia de numerosos materiales metálicos sin establecer cambios significativos en la densidad.



**Figura 12. Grafica de temperatura de Temple por precipitado.[20]**

Por efectos de la temperatura y del tiempo de temple, las propiedades de una aleación que se endurece por precipitación están relacionadas con la temperatura de envejecimiento y el tiempo de sostenimiento. Conforme se aumenta el tiempo de envejecimiento se forman zonas de precipitación, con lo cual la aleación se vuelve más resistente, más dura y menos dúctil.

En el proceso de extrusión los medios más usados para templar el perfil saliendo de la prensa son el Aire, el Agua o una combinación de los dos. Para las aleaciones de la serie 6XXX la extrusión es enfriada directamente de la temperatura de extrusión, normalmente por aire dependiendo del espesor del perfil puede llegar a usarse agua.

Para obtener una respuesta adecuada para el estado final del tratamiento térmico, la extrusión debe tener un temple adecuado saliendo de la prensa, donde el material ha sido enfriado en un grado adecuado desde la temperatura de Solución Sólida.

***Subdivisión de los temples por tratamiento térmico.***

Para temples térmicamente tratados los números del 1 al 10 después de la T indican:

- **T1 Enfriado desde una temperatura elevada en un proceso de formación y envejecido naturalmente hasta una condición substancialmente estable.**

Aplica a los productos que no son trabajados en frío después del enfriamiento desde una elevada temperatura en un proceso de formación, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento no puede ser reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

- **T2 Enfriado desde una elevada temperatura en un proceso de formación, trabajado en frío y envejecido naturalmente hasta una condición substancialmente estable.**

Aplica a los productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia después del enfriamiento desde una elevada temperatura en un proceso de formación, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento es reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

- **T3 Tratado térmicamente por solución, trabajado en frío y envejecido naturalmente hasta una condición substancialmente estable.**

Aplica a los productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia después de un tratamiento térmico por solución, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento es reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

- **T4 Tratado térmicamente por solución y envejecido naturalmente hasta una condición substancialmente estable.**

Aplica a los productos que no son trabajados en frío después de un tratamiento térmico por solución, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento no pueden ser reconocidos en los límites de las propiedades mecánicas.

- **T5 Enfriado desde una temperatura elevada en un proceso de formación y después envejecido artificialmente.**

Aplica a los productos que no son trabajados en frío después del enfriamiento desde una temperatura elevada en un proceso de formación, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento no puede ser reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

- **T6 Tratado térmicamente por solución y después envejecido artificialmente.**

Aplica a los productos que no son trabajados en frío después de un tratamiento térmico por solución, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento no puede ser reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

- **T7 Tratado térmicamente por solución e hiper-envejecido/estabilizado.**

Aplica a los productos forjados que son envejecidos artificialmente después de un tratamiento térmico por solución para llevarlos más allá de un punto de resistencia máxima para proporcionar control de alguna característica importante. Aplica para productos de fundición que son envejecidos artificialmente después de un tratamiento térmico por solución para proporcionar estabilidad dimensional y estabilidad en la resistencia.

- **T8 Tratado térmicamente por solución, trabajado en frío y después envejecido artificialmente.**

Aplica a los productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento está reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

- **T9 Tratado térmicamente por solución, envejecido por solución y después trabajado en frío.**

Aplica a productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia.

- **T10 Enfriado desde una temperatura elevada en un proceso de formación, trabajado en frío, y después envejecido artificialmente.**

Aplica a los productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia, o en los que el efecto del trabajo en frío está reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

### 3.1.2 Al 6063 T6

En la actualidad las aleaciones de la serie 6XXX constituye el grupo más importante destinado a la industria extrusora de aluminio, a nivel mundial el 80 % de las aleaciones empleadas en el sector de la extracción pertenecen a esta serie, siendo la aleación de aluminio 6063 la más destacada por su gran volumen de producción.

Al 6063 (ALUMINIO-MAGNECIO-SILICIO)										
COMPOSICION QUIMICA										
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otro Elemento	Al
Mínimo	0.3				0.4					
Máximo	0.6	0.3	0.1	0.3	0.6	0.05	0.15	0.2	0.15	El resto
PROPIEDADES MECANICAS(Temp. Ambiente 20°)										
Características a la tracción										
Estado	Carga de rotura N/mm2		Limite elastico N/mm2		Alargamiento A 5.65%		Limite a la Fatiga N/mm2			
0	100		50		27		110			
T1	150		90		26		150			
T4	160		90		21		150			
T5	215		175		14		150			
T6	245		210		14		150			
T8	260		240							

Tabla 3. Propiedades mecánicas y composición química del Al 6063 T6.[16]

El aluminio 6063 T6 posee ciertas propiedades que lo hacen un material propicio para desarrollar la construcción de un prototipo de cuadro estructural, debido a su costo moderadamente económico en comparación con otros materiales, aunque presenta inconvenientes para su unión, que en el caso concreto de la pieza de estudio se requirió dos tipos de procesos de soldadura TIG (Gas Inerte de Tungsteno por sus siglas en inglés) y MIG (Gas Inerte de Metal) que ocupan como material de aporte una aleación 4043 (**Tabla 4**).

Metal base	6061-6063	5086	5083	5052	1100-3003
1100-3003	ER4043	ER5356	ER5356	ER4043	ER1100
5052	ER5356	ER5356	ER5356	ER5654	
5083	ER5356	ER5356	ER5183		
5086	ER5356	ER5356			
6061-6063	ER4043				

**Tabla 4. Combinaciones Metal base-Aporte. [3]**

Ventajas:

- Se dispone de tubería en Al-6063 T6.
- La aleación de los tubos es soldable por los métodos convencionales de soldadura de arco.
- Las propiedades mecánicas son excelentes.
- El aporte de soldadura admite tratamiento térmico.
- Una relación resistencia mecánica por densidad alta.

Como se puede apreciar en la **Tabla 4** hay un significativo aumento de la carga de ruptura pasando de 100MPa a más del doble teniendo un tratamiento térmico, posteriormente se realizará un cálculo de fatiga teórico contemplando más datos y factores que influirán en su comportamiento.

### *Efectos de la soldadura en el Aluminio.*

Las piezas de aluminio soldadas tienden a perder propiedades mecánicas en la zona soldada debido a la gran cantidad de calor que se les aplica, dando como resultado una pérdida del temple y una recristalización, se muestra a continuación en la **Tabla 6** los efectos de la soldadura en el esfuerzo de fluencia de algunas aleaciones de aluminio 6063 T6.

ALEACION Y TEMPLE	ESFUERZO DE FLUENCIA CON TEMPLE [MPa]	ESFUERZO A LA FLUENCIA EN RECOCIDO [Mpa]	MATERIAL DE APORTE	ESFUERZO MINIMO A LA FLUENCIA SOLDADO [MPa]
6063-0	23.44	27.58	4043	31.02
6063-T6	172.36	48.26	4043	75.84
6105-T6	241.32	55.16	4043	103.42

**Tabla 5. Efecto de la soldadura en el esfuerzo de fluencia de algunas aleaciones de Aluminio de la serie 6XXX.[3]**

El efecto del calor implícito en el proceso de soldadura genera un recosido del material reduciendo hasta en un 75% el esfuerzo mecánico del material original, este efecto se propaga entre 2 y 3 veces el espesor de la pieza soldada a partir del centro de la soldadura. Los diámetros del tubo están indicados en la Sección A del Anexo y estos datos fueron incluidos en el modelo CAD ya una vez que se fijaron y dimensionaron los tubos empleados en el vehículo solo fue necesario encontrar sus especificaciones para en caso de ser necesario adquirir más.

### 3.1.2 Asignación del material a la pieza de trabajo

Con el propósito de análisis es necesario aplicar el material al modelo para conocer su masa, así como posteriormente realizar una correcta simulación, los valores del material serán asignados con base a la **Tabla 3** y cargados al software.

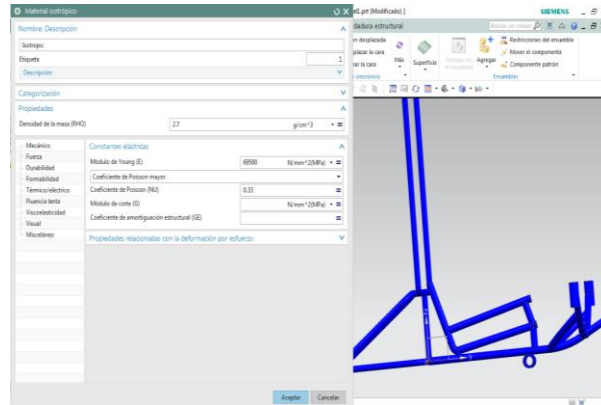


Figura 13. Asignación de Material Aluminio

Lo primero a realizar es usar la herramienta de Asignar material con los valores que ya se conocen a la pieza de trabajo (Figura 13), una vez cargado este ya se puede proseguir a emplear herramienta Propiedades Avanzadas de masa y en esta obtener la masa y otras propiedades (Figura 14).

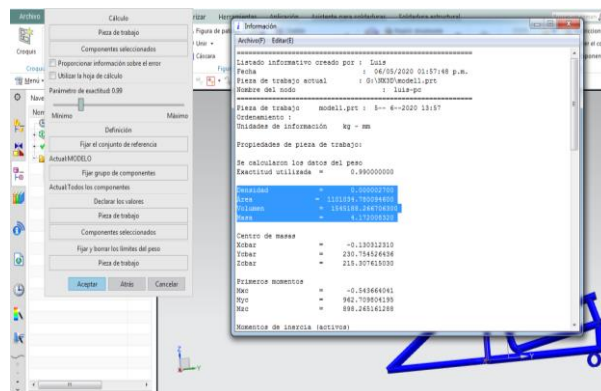


Figura 14. Cálculo de propiedades del cuerpo.

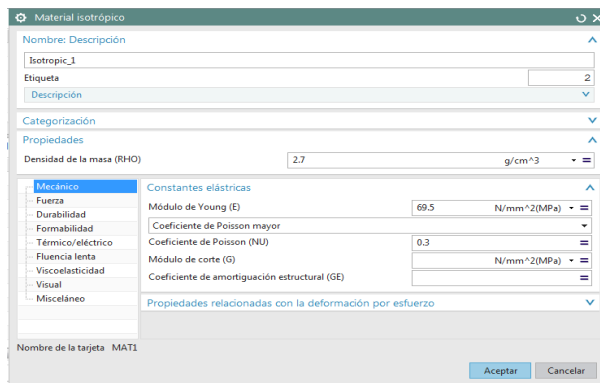
Con una exactitud de 0.99 los valores obtenidos en el cálculo del software fueron:

- Densidad = 0.000002700
- Área = 1101034.780094600
- Volumen = 1545188.266706300
- Masa = 6.172008320

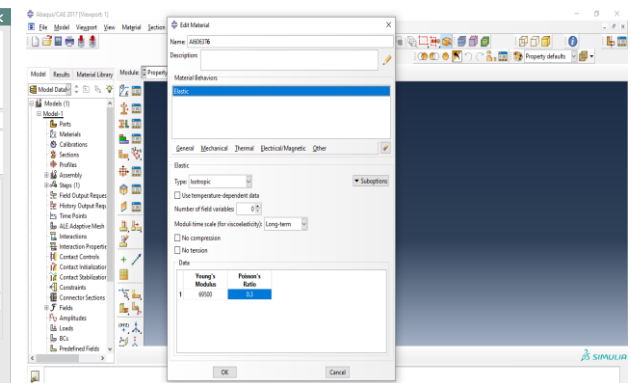
Estos cálculos todavía se realizan dentro del modelado de la pieza, pero para cuestiones de simulación es necesario cargar el material a los mallados en NX NASTRAN y en el caso concreto del análisis Shell se requiere asignar el espesor según la sección del vehículo.

Siendo similar la creación de un material Isotrópico para los tres tipos de simulación en sólidos, esto se debe cargar de manera similar una vez seleccionado el tipo de mallado para Nx y es definido desde un inicio para Inventor y Abaqus.

Para los solvers se asignarán las propiedades de módulo de Young y coeficiente de Poisson.



**Figura 15. Coeficiente de Poisson y Módulo de Young.**



**Figura 16. Asignación de Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson en Abaqus.**

Como se observa en las figuras 15 y 16 la carga de las propiedades del material se intentó hacer con el rango más basto posible abarcando todos los valores de la Tabla 3, junto con referencias bibliográficas. La carga de cada espesor es necesaria para brindar más exactitud en la solución, ya que de lo contrario habrá un gran margen de error y será difícil crear una comparación entre resultados.

## 3.2 Descripción del modelo físico.

### 3.2.1 Características del prototipo

EL prototipo fue desarrollado como ya se mencionó por estudiantes bajo la supervisión de docentes y especialistas en el área, lo que facilitó su elaboración, cabe mencionar que llevo muchas horas y procesos de manufactura tanto del cuadro como los demás componentes, fue pues un proceso de varias facetas y con distintas ubicaciones según se requiriese, ya fuera un taller de rolado, un taller de herrería, las instalaciones de Ciudad Universitaria y un laboratorio de la facultad de Ingeniería las sedes para el desarrollo de un proyecto como este.

También es cierto que durante este proceso se cometieron errores propios en el desarrollo de un prototipo que fueron corregidos de una manera que podrían afectar un poco el comportamiento del modelo real y el de la simulación. Pero se espera que esto sea mínimo.

Para la obtención del cuadro para empezar fue necesario realizar procesos de rolado, posterior a ello se llevó a cabo la unión de elementos por medio de procesos de soldadura que siendo aplicados los procesos TIG y MIG en este, siendo estos procesos denominados de aporte, el material a emplear fue Aluminio 4041 tanto en varilla como microalambre y la atmosfera de fusión fue generada por el gas Argón.



**Figura 17. Proceso de manufactura del cuadro.**

Una vez obtenido el ensamble del cuadro por la razón de estudio que se realizarán en esta tesis (Figura 17) y que no se emplearon durante su manufactura, fue necesario corregir muchas medidas, y elementos para poder adecuarse a los pilotos y a las pruebas.

## Capítulo IV

### 4. Análisis CAE

#### 4.1 Uso del CAE

Una manera de discretizar un cuerpo o estructura es dividirla en un sistema equivalente de cuerpos pequeños, tal que se genere un ensamble que representa el cuerpo original. La solución que se obtiene para cada unidad se combina para obtener la solución total. Por ende, La solución del problema consiste en encontrar los desplazamientos de estos puntos y a partir de ellos, las deformaciones y las tensiones del sistema analizado. Las propiedades de los elementos que unen a los nodos, están dadas por el material asignado al elemento, que definen la rigidez del mismo, y la geometría de la estructura a modelizar entre si mediante la rigidez y las relaciones constitutivas del elemento. Trabajando en régimen elástico, las ecuaciones que definen el sistema pueden expresarse de forma matricial como se muestra a continuación:

$$[k] \cdot \{\delta\} = \{F\} \quad (13)$$

$[K]$ : es la matriz rigidez del sistema

$\{\delta\}$ : es el vector desplazamientos

$\{F\}$ : es el vector de esfuerzos

##### 4.1.1 Elemento Tipo Placa (Shell)

Los elementos tipo Shell consideran elementos genéricos  $e$  con 3 nodos  $i, j, k$  y elementos  $e'$  con 4 nodos  $(i, j, k, l)$ .

*Campo de desplazamiento del elemento*

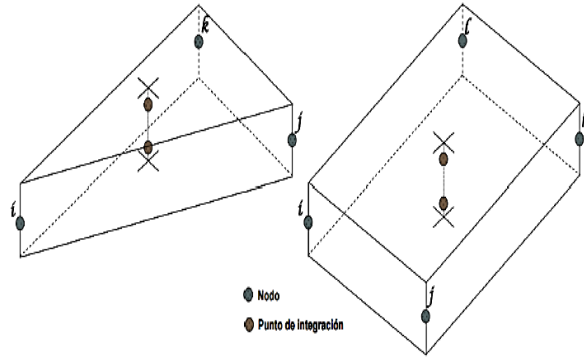


Figura 18. Elementos triangular y cuadrado.

Las relaciones de estos desplazamientos están dadas por:

$$u(x, y) = \sum_i N_{mi}(x, y) \cdot u_i - z \frac{\partial w}{\partial x} \quad (14)$$

$$v(x, y) = \sum_i N_{mi}(x, y) \cdot v_i - z \frac{\partial w}{\partial y} \quad (15)$$

$$w(x, y) = \sum_i [N_{mi}(x_i, y_i)] \cdot (\theta_{xi}) \quad (16)$$

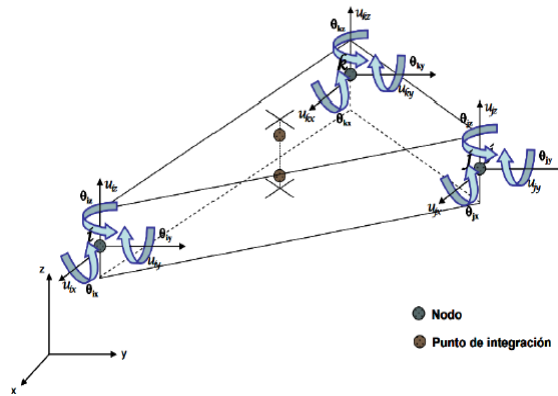


Figura 19. Campo de desplazamiento en elemento Shell.

Donde  $N_{mi}(x, y)$  son las funciones de forma para los desplazamientos en el plano, que están cumpliendo con:

$$N_{mi}(x_i, y_i) = 1 \text{ para } j = i \text{ y } N_{mi}(x_i, y_i) = 0 \text{ para } j \neq i \quad (17)$$

Y  $N_{wj}(x_i, y_i)$  son matrices de un orden (1,3), que contienen las funciones de forma para desplazamientos fuera del plano:

$$[N_{wj}(x_i, y_i)] = [1 \ 0 \ 0] \text{ para } j = 1 \quad (18)$$

$$[N_{wj}(x_i, y_i)] = [0 \ 0 \ 0] \text{ para } j \neq i \quad (19)$$

$$\frac{\partial [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial x} = [1 \ 0 \ 0] \text{ para } j = 1 \quad (20)$$

$$\frac{\partial [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial x} = [0 \ 0 \ 0] \text{ para } j \neq i \quad (21)$$

$$\frac{\partial [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial y} = [1 \ 0 \ 0] \text{ para } j = 1 \quad (22)$$

$$\frac{\partial [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial y} = [0 \ 0 \ 0] \text{ para } j \neq i \quad (23)$$

### ***Campo de deformaciones del elemento***

A partir del campo de desplazamientos se deduce el campo de deformaciones del elemento, que se por las expresiones:

$$\varepsilon_x(x, y, z) = \frac{\partial u}{\partial x} = \sum_i \frac{\partial N_i(x, y)}{\partial x} \cdot u_i - z \cdot \sum_i \frac{\partial^2 [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial x^2} \cdot \begin{pmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\varepsilon_y(x, y, z) = \frac{\partial u}{\partial y} = \sum_i \frac{\partial N_i(x, y)}{\partial y} \cdot v_i - z \cdot \sum_i \frac{\partial^2 [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial y^2} \cdot \begin{pmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$\gamma_{xy}(x, y, z) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \sum_i \frac{\partial N_i(x, y)}{\partial x} \cdot u_i + \sum_i \frac{\partial N_i(x, y)}{\partial y} \cdot v_i - 2z \cdot \sum_i \frac{\partial^2 [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial x^2} \cdot \begin{pmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{pmatrix} \quad (26)$$

Y obtenemos:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = [B_w(x, y)] \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{pmatrix} + z \cdot [B_w(x, y)] \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \vdots \\ w_n \\ \theta_{xn} \\ \theta_{yn} \end{pmatrix} \quad (27)$$

### *Campo de esfuerzos del elemento*

El campo de esfuerzos para esta formulación verifica la relación descrita para la formulación general.

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} \quad (28)$$

### *Equilibrio del elemento*

Quedaría como en la siguiente (Figura 21):

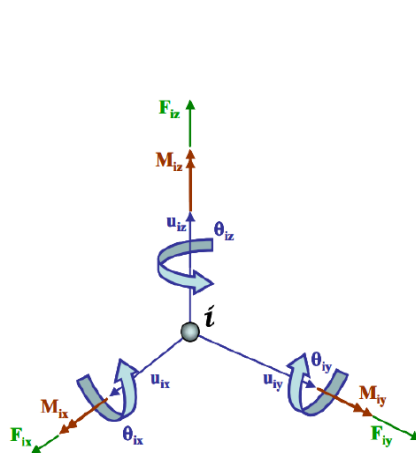


Figura 20. Esquema de desplazamientos, giros, fuerzas y momentos en un nodo.

$$\begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \end{pmatrix} = [K_m] \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \end{pmatrix} \gamma + \begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} F_{x1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ \vdots \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \end{pmatrix} = [K_w] \begin{pmatrix} w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \vdots \\ w_n \\ \theta_{xn} \\ \theta_{yn} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{x1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ \vdots \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \end{pmatrix} \gamma + \begin{pmatrix} F_{x1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ \vdots \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \end{pmatrix} V \quad (29)$$

Donde la ecuación (20) representa las cargas y desplazamientos en el plano y la (21) la flexión fuera de él.

Las fuerzas con subíndice  $T$  corresponden a las cargas debidas a temperatura y las de subíndice  $V$  son las cargas nodales equivalentes a las fuerzas volumétricas. Debido a la simetría, quedan desacopladas las ecuaciones correspondientes a la flexión y las de la placa de trabajando en su plano.

Reorganizando las ecuaciones.

$$\begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \\ M_{zn} \end{pmatrix} = [K_e] \begin{pmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ \vdots \\ U_n \\ V_n \\ W_n \\ \theta_{xn} \\ \theta_{yn} \\ \theta_{zn} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \\ M_{zn} \end{pmatrix} T + \begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \\ M_{zn} \end{pmatrix} V \quad (30)$$

### ***Integración del sistema de ecuaciones para el medio continuo***

Con la formulación anterior, las filas y columnas correspondientes a los giros  $\theta_z$  son nulas. En algunos modelos, esto puede generar que la matriz de rigidez global sea singular. Para evitarlo,

existen varias formas de asignar rigideces para estos grados de libertad, muchos descritos en una vasta literatura sobre elementos finitos.

Según sea el caso es sabido que los elementos tipo Shell de 4 nodos se pueden emplear en objetos planos y semiplanos de forma más fácil, en cambio los de tres nodos son mejores en objetos de con muchas curvaturas.

### 4.1.2 Elemento Solido

La formulación aplicada para los elementos solidos o volumétricos considera elementos genéricos  $e$  con 4 nodos ( $i, j, k, l$ ). (Oñate, 1992)

Se considera un sólido tridimensional discretizado en elementos tetraédricos de cuatro nodos (Figura 21).

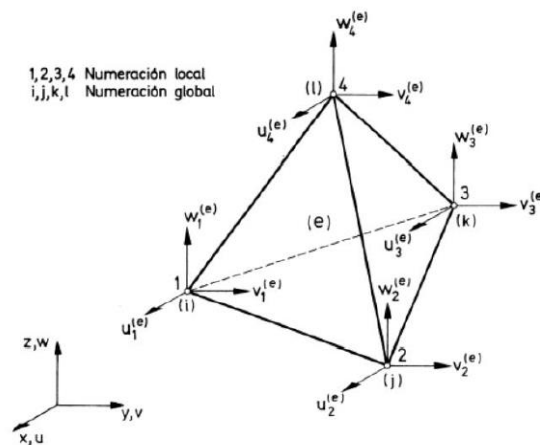


Figura 21. Desplazamientos, giros, fuerzas y momentos en un elemento.

El campo de desplazamientos en el interior de un elemento se puede aproximar por:

$$u = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1 U_1 + N_2 U_2 + N_3 U_3 + N_4 U_4 \\ N_1 V_1 + N_2 V_2 + N_3 V_3 + N_4 V_4 \\ N_1 W_1 + N_2 W_2 + N_3 W_3 + N_4 W_4 \end{pmatrix} \quad (31)$$

Donde

$$N = [N_1, N_2, N_3, N_4]; N_1 = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

y

$$a^e = \begin{pmatrix} a^e_1 \\ a^e_2 \\ a^e_3 \\ a^e_4 \end{pmatrix}; a^e_i = \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{pmatrix} \quad (33)$$

Son respectivamente, la matriz de funciones de forma y el vector de desplazamientos del elemento y de un nodo.

Cuatro nodos definen una variación lineal de los desplazamientos en las coordenadas  $xyz$  de manera que la expresión analítica de las funciones de forma  $N_i$  se pueden escribir como:

$$\begin{aligned} u &= a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 z \\ u &= a_1 + a_6 x + a_7 y + a_8 z \\ u &= a_1 + a_{10} x + a_{11} y + a_{12} z \end{aligned} \quad (34)$$

La constante  $a_i$  se obtiene sustituyendo adecuadamente las coordenadas de los nodos e igualando los desplazamientos a sus valores nodales. Como se ha utilizado la misma aproximación para todos los desplazamientos, basta con calcular las cuatro constantes para un solo desplazamiento. Así, considerando el desplazamiento  $u$ :

$$\begin{aligned} u_1 &= a_1 + a_2 x_1 + a_3 y_1 + a_4 z_1 \\ u_2 &= a_1 + a_2 x_2 + a_3 y_2 + a_4 z_2 \\ u_3 &= a_1 + a_2 x_3 + a_3 y_3 + a_4 z_3 \\ u_4 &= a_1 + a_2 x_4 + a_3 y_4 + a_4 z_4 \end{aligned} \quad (35)$$

Resolviendo el sistema anterior y sustituyendo los valores de  $a_i$  encontrados se define, tras una ordenación de los términos

$$N_1 = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{6V^e} (a_1 + b_1x + c_1y + d_1z)u_i \quad (36)$$

De donde se deduce que la función del nodo  $i$  es:

$$N_1 = \frac{1}{6V^e} (a_1 + b_1x + c_1y + d_1z)u_i \quad (37)$$

Donde  $V^e$  es el volumen del elemento, y

$$a_i = \det \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \end{vmatrix}; \quad b_i = -\det \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{vmatrix}$$

$$c_i = \det \begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_l & 1 & z_l \end{vmatrix}; \quad b_i = -\det \begin{vmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_l & y_l & 1 \end{vmatrix} \quad (38)$$

Obteniendo así los distintos coeficientes para los valores  $i=1, 2, 3,4$  mediante la adecuada permutación cíclica de los subíndices  $i, j, k, l$ .

### ***Matriz de deformación***

Sustituyendo la aproximación del campo de desplazamientos en la expresión del campo de deformaciones se obtiene, para un elemento genérico “n” nodos

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n \left\{ \begin{array}{c} \frac{\delta N_i}{\delta x} u_i \\ \frac{\delta N_i}{\delta y} v_i \\ \frac{\delta N_i}{\delta z} w_i \\ \frac{\delta N_i}{\delta y} u_i + \frac{\delta N_i}{\delta z} v_i \\ \frac{\delta N_i}{\delta z} u_i + \frac{\delta N_i}{\delta x} w_i \\ \frac{\delta N_i}{\delta z} v_i + \frac{\delta N_i}{\delta y} w_i \end{array} \right\} = \sum_{i=1}^n B_i a^e_i = B a^e \quad (39)$$

Donde B es la matriz de deformación del elemento dada por

$$B = [B_1, B_2, B_3, \dots, B_n] \quad (40)$$

Siendo  $B_1$  la matriz de deformación del nodo  $i$ , con:

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\delta N_i}{\delta x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\delta N_i}{\delta y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\delta N_i}{\delta z} \\ \frac{\delta N_i}{\delta y} & \frac{\delta N_i}{\delta x} & 0 \\ \frac{\delta N_i}{\delta z} & 0 & \frac{\delta N_i}{\delta x} \\ 0 & \frac{\delta N_i}{\delta z} & \frac{\delta N_i}{\delta y} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Dado que la matriz de deformación del elemento contiene tantas submatrices como nodos tiene el elemento, en el caso estudiado, se tendrá:

$$B = [B_1, B_2, B_3, B_4] \quad (42)$$

### ***Matriz de rigidez del elemento***

Sustituyendo la ecuación constitutiva de un elemento isotrópico en particular en ejes globales en la ecuación del PTV, se obtiene la ecuación de equilibrio del elemento:

$$k^e a^e - f^e = q^e \quad (43)$$

Donde  $k^e$  es la matriz de rigidez del elemento  $f^e$  es el vector de fuerzas equivalentes nodales y  $q^e$  es el vector de las fuerzas nodales de equilibrio. La matriz de rigidez tiene la expresión:

$$[k^e] = \int_{v^e} [B]^T [D][B]dV \quad (44)$$

Y una submatriz de rigidez típica, relacionando los nodos  $i$  y  $j$  del elemento, se escribe como:

$$[k^e]_{ij} = \int_{v^e} [B]^T_i [D][B]_j dV \quad (45)$$

En el caso de los elementos tetraédricos de 4 nodos se puede encontrar una forma explícita sencilla de,  $[K^e]_{ij}$  puesto que todas las cantidades subintegrales son constantes, como:

$$[k^e]_{ij} = [B]^T_i [D][B]_j V^e \quad (46)$$

### ***Vector de fuerzas nodales equivalentes***

El vector de fuerza nodales equivalentes tiene la expresión siguiente:

$$\begin{aligned} f^e &= \int_{v^e} [N]^T b \cdot dV + \int_{A^e} [N]^T t dA + \int_{v^e} [B]^T [D]\epsilon^0 \cdot dV - \int_{v^e} [B]^T \sigma^0 \cdot dV \\ &= f^e_b + f^e_t + f^e_\epsilon + f^e_\sigma \end{aligned} \quad (47)$$

Donde la primera integral representa el vector fuerza de volumen, la segunda, el de fuerza de superficie; y la tercera y cuarta los vectores de fuerzas debidas a deformaciones y tensiones iniciales, respectivamente.

La aproximación lineal del elemento tetraédrico de cuatro nodos le confiere una precisión limitada ya que solo puede modelar exactamente un campo de tensiones o deformaciones de manera uniforme. Esto implica que en zonas donde se tengan gradientes de tensiones elevadas será necesario utilizar otro tipo de malla.

Otro problema que presenta este tipo de malla es la dificultad para discretizar un sólido con una geometría irregular.

## 4.2 Análisis a la pieza de trabajo

### 4.2.1 Análisis de Fatiga

En la vida real se observa que repetidos ciclos de carga y descarga debilitan las piezas a lo largo del tiempo incluso cuando las cargas inducidas están considerablemente por debajo de la tensión de rotura estática e incluso del límite elástico del material. Este fenómeno se le conoce como Fatiga. Cada ciclo de fluctuación de la tensión deteriora o daña la pieza un poco. Tras un determinado número de ciclos, la pieza está tan debilitada que se fractura. Para complicar más el tema también se observa en piezas metálicas que por debajo de un cierto valor de la tensión no se produce la rotura por elevado que sea el número de ciclos de trabajo de la pieza.

Todo esto hace que la fatiga sea realmente compleja y por desgracia una de las primeras causas de fallo en muchas piezas construidas. Ejemplos de fallo por fatiga los tenemos en máquinas rotativas, productos de consumo, ruedas de ferrocarril, plataformas marítimas, barcos, vehículos y puentes.

El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio.

Los estudios estructurales lineales y no lineales no predicen los fallos por fatiga estos calculan la respuesta de un diseño sujeto a un entorno específico de cargas y restricciones. Si los resultados de desplazamientos y tensiones están por debajo de un cierto nivel admisible se puede concluir que el diseño es seguro en ese entorno de solicitaciones con independencia de cuantas veces se aplique la carga. [17]

Los fundamentos para la predicción de vida a fatiga se basan en las propiedades del material obtenidas en el laboratorio ensayando con pequeños especímenes sujetos a cargas dinámicas hasta que parten o aparece la primera grieta. El método de tensión-deformación local asume que la vida del espécimen en el laboratorio se puede relacionar con la vida de la estructura real. Es más, se asume

que las cargas utilizadas en la estimación de vida a fatiga de la estructura son tensiones o deformaciones locales en posiciones críticas.

#### 4.2.2 Calculo de la fatiga generada en el cuadro con Aluminio 6063 T6

Para poder realizar un análisis de fatiga, es necesario identificar las propiedades de la pieza de estudio y las propiedades del material en el que está fabricada.

Para ello, se requiere tomar en cuenta el material para obtener el límite de fatiga  $S'_e$ , ya que está relacionado con la resistencia a la tracción  $S_{ut}$ , el aluminio 6063 T6 tiene una tensión a la ruptura de 245MPa por lo tanto su límite de fatiga se calcula con la siguiente formula (Naranjo, 2015, pág. 36):

$$S'_e = 0.5 \times S_{ut} \quad (48)$$

Dónde:

$S'_e$ =Límite de fatiga

$S_{ut}$  =Resistencia a la tracción

En este caso contamos con un valor dado por la **Tabla 3**:

- $S'_e = 150MPa$

**Factor de acabado superficial  $K_a$**

Los tubos de aluminio 6063 son fabricados mediante extrusión y estirado en frio. Por lo tanto, los valores  $a$  y  $b$  de la ecuación a utilizar se sacan a partir de la Tabla 6:

Acabado Superficial	Coficiente a (Mpa)	Exponente b
Pulido	1	0
Acabado fino(rectificado,..)	1.58	-0.085
Mecanizado sin acabar	4.51	-0.265
Laminado en caliente	57.7	-0.718
Forjado	272	-0.995

**Tabla 6. Valores de a y b, factor de acabado superficial [18].**

Es así que  $a = 4.51MPa$  y  $b = -0.265$

$$k_a = a \times S_{ut}^b \quad (49)$$

Dónde:

$K_a$  =factor de acabo superficial

$S_{ut}^b$  =Resistencia a la tracción

Sustituyendo:

- $K_a = 4.51MPa \times (245MPa)^{-0.264} = 1.04965$

**Factor de Tamaño  $K_b$**

Este factor es distinto dependiendo del caso de cargas existentes, en este caso los tubos van a sufrir cargas axiales, cortantes, de flexión y de torsión y, por tanto, no se puede considerar un factor igual a 1. También depende del tubo que se esté analizando, ya que para el cuadro estructural se usaron dos distintos tubos, se empleara la siguiente ecuación (Shigley, 2012, pág. 118):

$$k_b = \left( \frac{d}{7.62} \right)^{-0.1133} \quad (50)$$

Dónde:

$K_b$ =Factor de tamaño

d= Diámetro exterior

Para diámetros:  $2.79 \leq d \leq 51$

(d en mm)

Agregando los diámetros tenemos que:

- Tubo  $\frac{1}{2}$ :  $k_b = \left( \frac{33.4}{7.62} \right)^{-0.1133} = 0.845833$
- Tubo  $\frac{3}{4}$ :  $K_b = \left( \frac{26.67}{7.62} \right)^{-0.1133} = 0.867675$

Se utiliza el diámetro externo debido a que en esta zona se presenta el mayor esfuerzo a flexión.

### ***Factor de confiabilidad $K_c$***

Este factor permite de forma analítica diseñar un elemento mecánico sometido a cargas de fatiga de manera que tenga un tiempo de vida deseado con una determinada confiabilidad. Se considerará una confiabilidad de 90% de la Tabla 7(Naranjo, 2015):

$$K_c = 0.897$$

Confiabilidad	Factor de confiabilidad $K_c$
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659

**Tabla 7. Valores de confiabilidad.**

### ***Factor de temperatura $K_d$***

En este caso la temperatura es bastante inferior a 450°C, por lo que el fallo en caso de darse sería uno frágil y se toma como  $K_d = 1$

### ***Factor de concentración de tensiones $K_e$***

Como en el caso de la pieza de estudio de forma teórica no cuenta con ranuras, chavetas, muescas que alteren la distribución del esfuerzo no habrá regiones con concentración de tensiones en esas zonas. Los programas basados en el método de los elementos finitos (MEF), tienen en cuenta la geometría del modelo, por lo que no es necesario aplicar o corregir este factor, entonces se maneja en todas las zonas del cuadro que  $K_e = 1$

### ***Factor de efectos diversos $K_f$***

En este factor se consideran los posibles esfuerzos residuales, la posible direccionalidad y la corrosión de los tubos, al ser características que no afectan en gran medida y son difíciles de cuantificar

se consideraran dos casos uno como  $K_f = 1$  y el siguiente se considerara como ya se mencionó en la descripción del material la afectación de la soldadura siendo están  $K_f = 0.66$ .

### ***Límite de fatiga $S_e$***

Se tiene que:

$$S_e = K_a K_b K_c K_{(4)} \cdot S'_e \quad (51)$$

Sustituyendo valores:

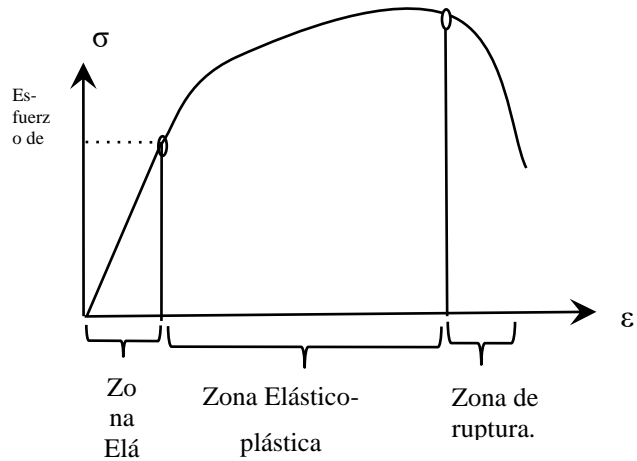
- $S_{eN} = 1.04965 \cdot 0.845833 \cdot 0.897 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 150\text{MPa} = 119.45\text{MPa}$
- $S_{eS} = 1.04965 \cdot 0.845833 \cdot 0.897 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.66 \cdot 150\text{MPa} = 78.84\text{MPa}$

Cuando se compara lo obtenido con los valores de la **Tabla 5** se obtiene para el caso que contempla soldadura una ligera variación, cosa contraria con el otro caso, por lo que se considerara un rango como “admisible” los intervalos que se generen, que al final serán detectados por el software y se verá si realmente generan afectación en la pieza.

### **4.2.3 Análisis Estático No Lineal**

Este tipo de estudio se lleva a cabo en la zona Elastoplástica del material ejemplificada en la gráfica Esfuerzo-Deformación (Stress-Strain) de un material dúctil como lo son todos los metales.

La diferencia principal respecto a un análisis de tipo lineal es que en este se encuentra la deformación que tendrá el elemento de estudio a diferencia del desplazamiento que se obtiene cuando las cargas no superan el esfuerzo de cedencia (Figura 23).



**Figura 24. Gráfico de representación de Esfuerzo-Deformación.**

Debido a los requerimientos de la pieza de estudio en los que permite una deformación que no ponga en riesgo al piloto se realizara este análisis.

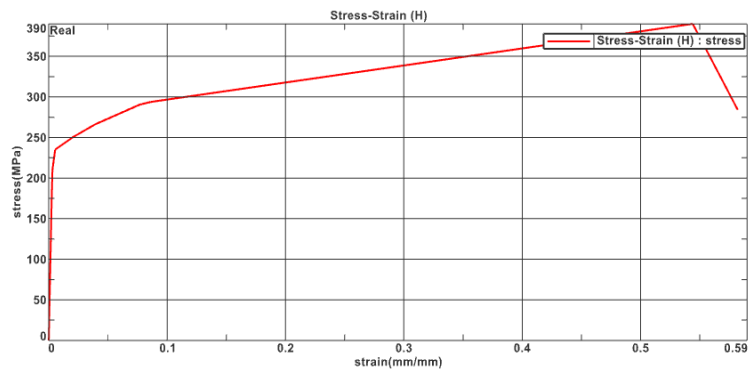
Muchos programas que integran herramientas CAE tiene diversas herramientas o soluciones en el caso de Nx Nastran se resuelve con SOL. 106 estático No Lineal y para Abaqus solo es necesario activar la no linealidad en este tipo de estudio.

En el caso particular de Autodesk Inventor en su módulo de diseño no cuenta con esta herramienta, y dado que se requiere adquirir otro modulo en este caso Autodesk Nastran se omitirá la prueba, ya que no se encuentra incluida como en los otros programas.

Para la realización de una simulación más apegada al comportamiento del 6063 T6 se tomará en cuenta un estudio realizado en el cual entrego valores como se muestra en Tabla 8.

Stress (MPa)	Strain (mm)
170.0	0.0024
210.7	0.0031
235.0	0.0054
249.9	0.0198
266.2	0.0392
284.1	0.0582
290.5	0.0769
293.2	0.0861
390.0	0.5440

**Tabla 8. Valores de relación Stress-Strain.**



**Figura 25. Gráfico Stress-Strain(Esfuerzo-Deformación).[26]**

#### 4.2.4 Análisis Modal

El análisis modal es el estudio de las propiedades dinámicas de las estructuras lineales, sobre la base de las pruebas estructurales por medio de la simulación MEF. Entre estas propiedades dinámicas se encuentran las frecuencias de resonancia conocidas como frecuencias naturales o frecuencias Eigen y los modos estructurales (modos Eigen).

Las propiedades dinámicas dependen de la masa, la rigidez y la distribución de la amortiguación en la estructura. Una estructura con excitaciones externas podrá vibrar en uno más de sus frecuencias naturales.

Para desarrollar la solución de un sistema de frecuencias naturales se tiene la siguiente ecuación:

$$M_u + K_u = 0 \quad (52)$$

$$u = w_u^2 = \lambda_u \quad (53)$$

Con estos valores, se obtiene que:

$$(k - \lambda M)_u = 0 \quad (54)$$

$$|k - \lambda M| = 0 \quad (55)$$

Donde:

k; Matriz de Rigidez

M; Matriz de Masa

La constante  $k$  es el coeficiente elástico de la Ley de Hooke, esta ley se cumplirá siempre que la fuerza aplicada produzca una deformación en la cual el resorte afectado pueda recuperar su forma original, es decir, no sobrepase el límite elástico. Se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{m \times g}{v} \quad (56)$$

Siendo:

k=constante de elástica

m= masa

g=gravedad

v=desplazamiento

La frecuencia natural es aplicada en sistemas mecánicos de tipo masa-resorte (amortiguador) para lograr un diseño en que las frecuencias siempre estén alejadas de la frecuencia de excitación. Se calcula de la siguiente manera:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (57)$$

Siendo:

$\omega_n$  =frecuenciadel cuadro.,

k=constante de elástica

m= masa

Las revoluciones por minuto normales de un ciclista oscilan entre 70-90rpm, por lo que para este análisis se realizara una simulación para ver posibles fallos en la estructura.

Se tiene la siguiente ecuación:

$$f_n = \frac{w_n}{2\pi} \quad (58)$$

$$t = \frac{1}{w_n} \quad (59)$$

y convirtiendo los rpm a Rad/s obtenemos 7.33, 8.377 y 9.424 Rad/s

Sustituyendo obtenemos

Revoluciones	Frecuencia	Tiempo
70rpm	1.16Hz	0.86s
80rpm	1.33Hz	0.75s
90rpm	1.499Hz	0.66s

**Tabla 9. Frecuencias naturales producidas por pedaleo.**

Al considerar este rango de valores con los que se obtendrán en la simulación se podrá generar graficas que den un entendimiento de la estructura, así como descartar fallos por cargas y comportamientos dinámicos.

## 4.3 Condiciones del Elemento

### 4.3.1 Malla 2D

Ya una vez definido el comportamiento de la malla tipo Shell de tres nodos, en la sección 4.2.1, la opción que ofrece Nx es el mallado tetraédrico tipo CTRIA3 que con base a un criterio y capacidad de procesamiento del ordenador se definió con dimensiones de 10mm al ser esta medida considerada “buena” para realizar una simulación de este tipo.

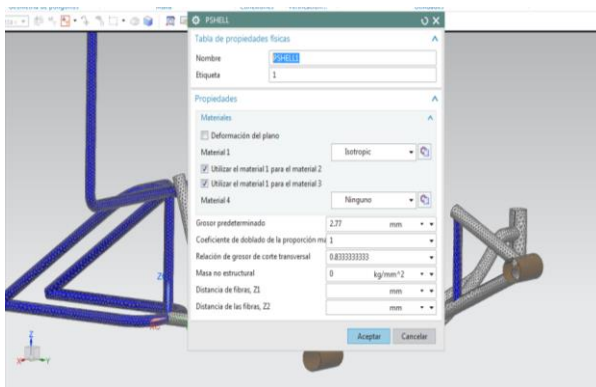


Figura 27. Asignación de Espesor 2.77mm.

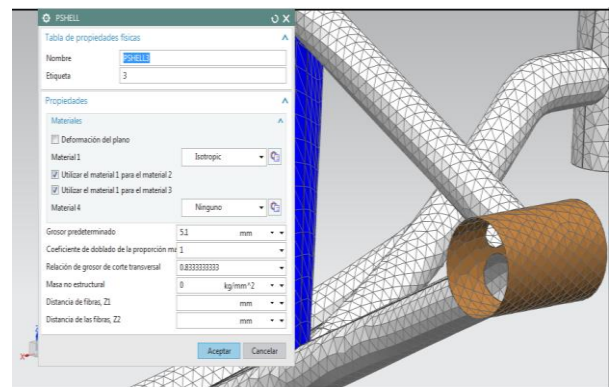


Figura 29. Asignación de Espesor 5.1mm.

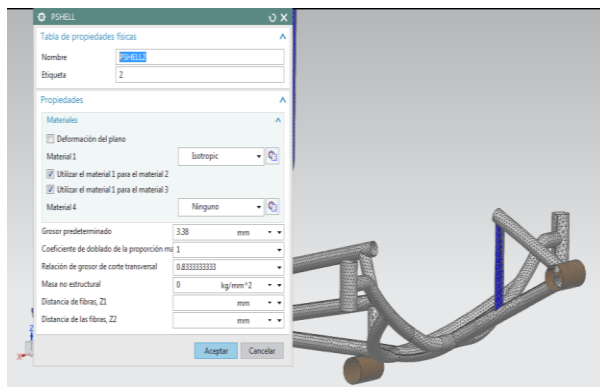


Figura 28. Asignación de Espesor 3.38mm.

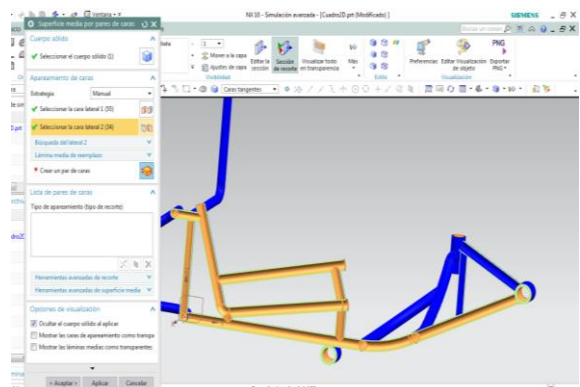
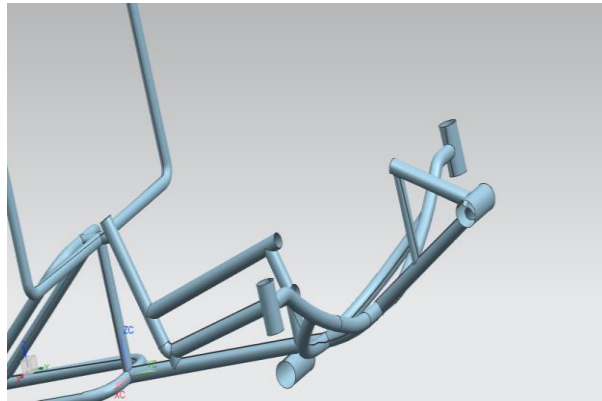


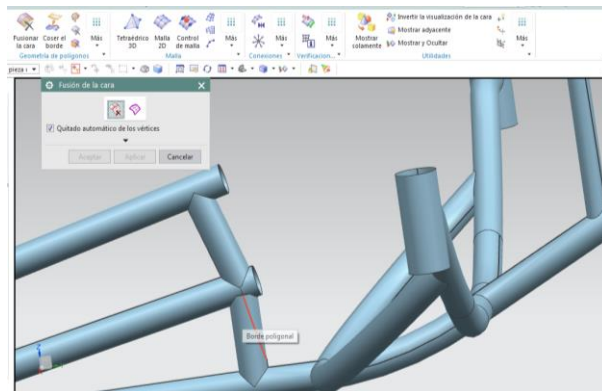
Figura 30. Obtención de la cara superficial de

Para poder llevar a cabo la aplicación de este tipo de mallado es necesario dividir el cuerpo en caras (como se observa en la Figura 29), que se realiza en Simulación Avanzada del software y que nos permite utilizar una capa inferior, media o superior de un cuerpo sólido, para el estudio la superficie a utilizar será la externa.



**Figura 31. Pieza ya tratada para estudio tipo**

Posterior a esto es necesario mejorar la capa con la finalidad de obtener un mallado más uniforme en el cuerpo



**Figura 32. Tratamiento de superficie.**

Una vez obtenida la capa superficial se procede a seleccionar en el entorno de NX Nastran la malla, siendo que el material es el mismo en toda la pieza se requiere aplicar el espesor correspondiente a los tubos que se encuentran en la estructura.

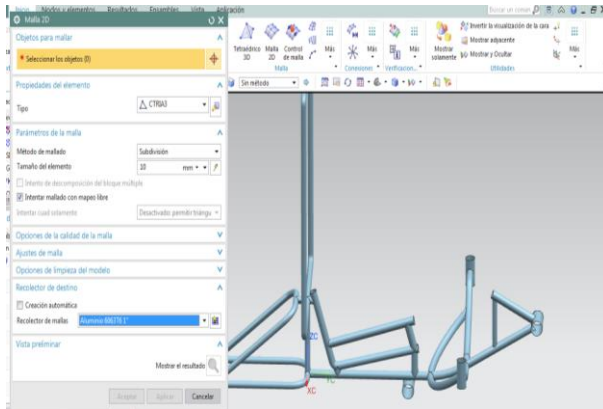


Figura 33. Selección de Malla.

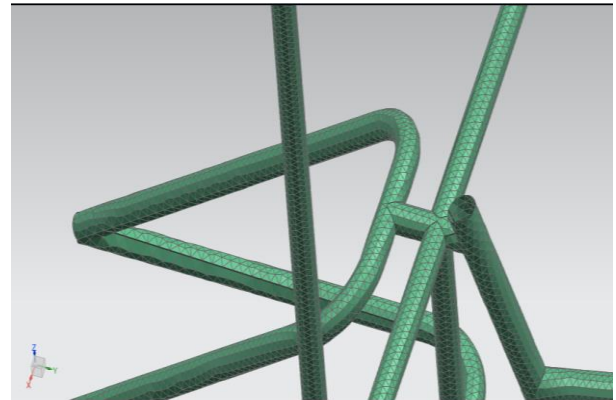


Figura 34. Aplicación de malla.

### 4.3.2 Malla 3D

Para el caso del cuadro en análisis 3D se empleará un mallado tetraédrico tipo CTE-TRA(4), ya que debido a la forma del elemento dificulta otro tipo de malla.

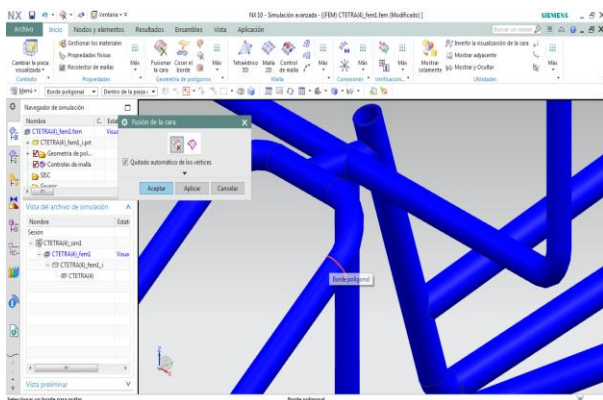


Figura 35. Tratamiento a pieza.

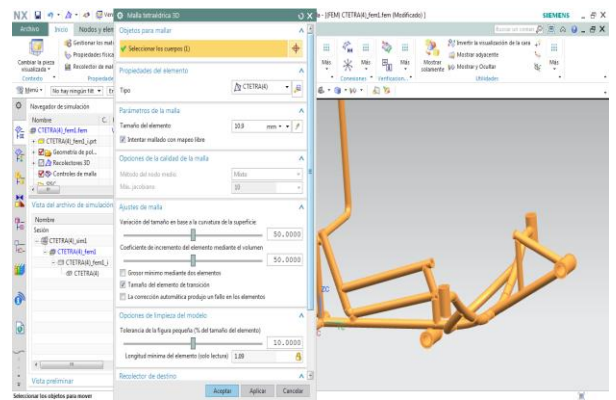
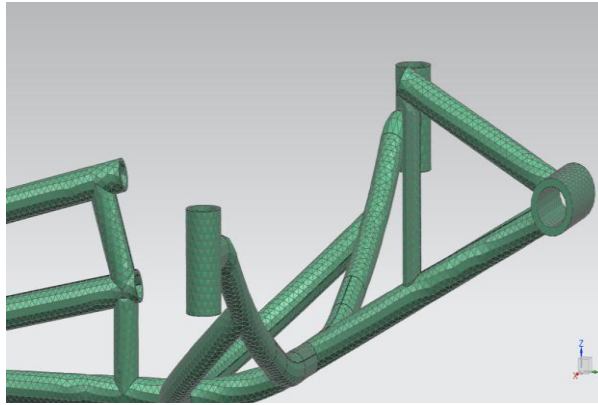


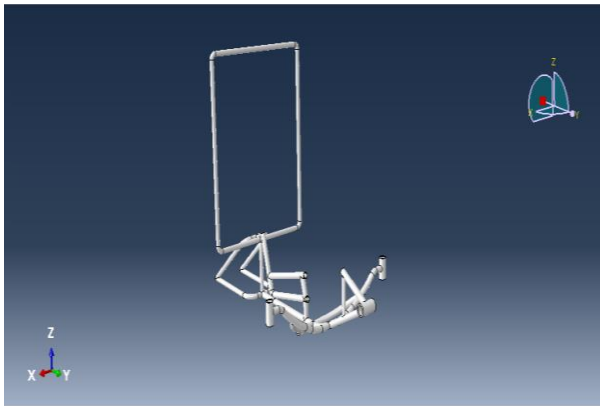
Figura 36. Selección de malla.



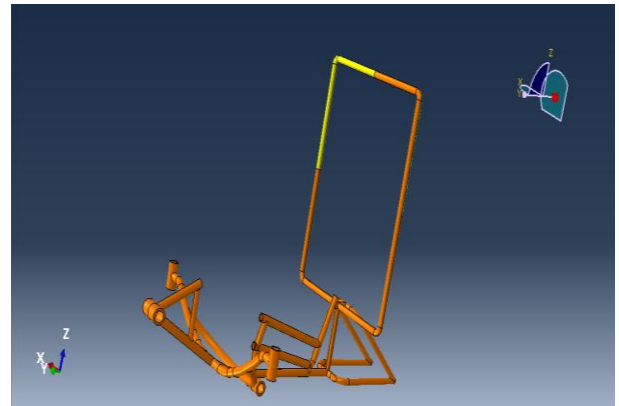
**Figura 37. Aplicación de Malla.**

Al igual que con el mallado tipo Shell se eligió de tamaño de 10mm para desarrollar una mejor comparación de resultados.

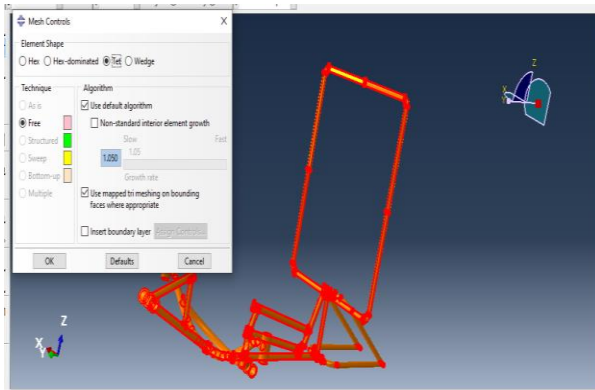
Para el caso de Abaqus el mallado es un poco distintito al del NX, debido a que el entorno de este programa es totalmente CAE a diferencia del anterior lo primero a realizar es la importación de la geometría en formato STEP.



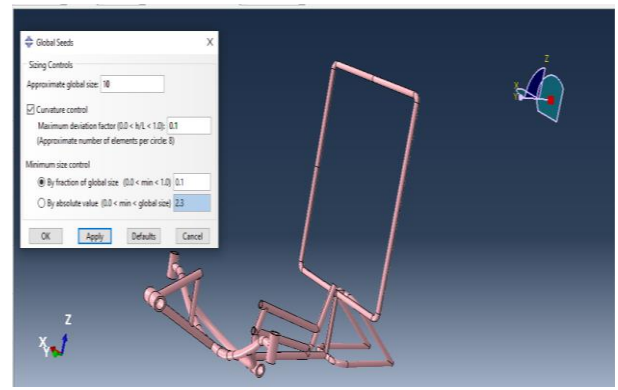
**Figura 38. Modelo CAD importado en Abaqus.**



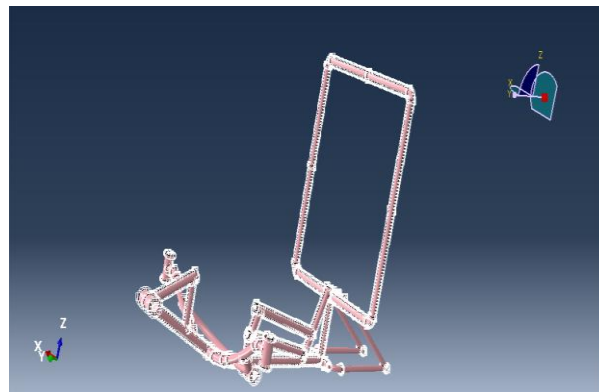
**Figura 39. Detección de geometría compleja por el software.**



**Figura 40. Selección de tipo de malla.**

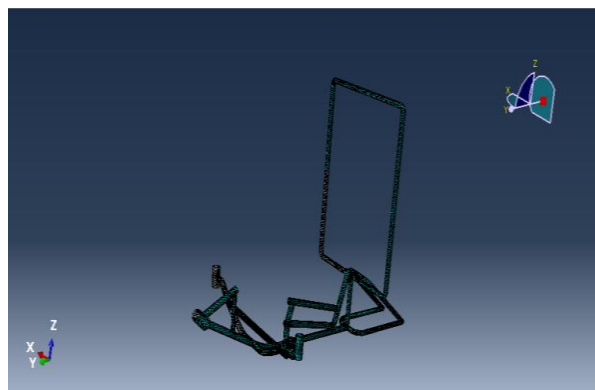


**Figura 41. Designación de tamaño de malla.**



**Figura 42. Malla tetraédrica tamaño 10.**

### 4.3.3 Cargas



**Figura 43. Aplicación de mallado.**

Las cargas para emplear serán necesarias para la obtención de resultados más ciertos respecto a su comportamiento, debe ser lo más cercano al ambiente normal al que se expondrá.

Se realizará un estudio en dos modos el primero en condiciones de un mallado Shell y el otro en un sólido para así poder comparar los resultados de en los dos tipos de estudio y brindar mejores resultados en el estudio del cuadro.

Para poder resolver el sistema, será necesario conocer las fuerzas y momentos que se deben aplicar a la pieza, para modelarlo lo más aproximado a las condiciones a las que estará sometido, se aplicaran de forma que arrojen resultados en las zonas de interés.

En el caso particular del soporte de buje de pedales se considerará como un momento considerando la distancia de este al tubo que soporta al inicio de los soportes de las ruedas delanteras.

Las cargas aplicadas serán basadas en las situaciones a las que se someterá el cuadro como son las fuerzas de **2670N** en la parte superior de la jaula y **1330N** en las laterales de la misma como primer caso.

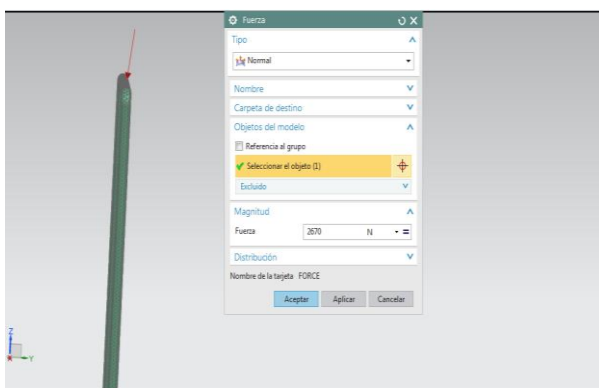


Figura 44. Aplicación de 2670N según especificaciones del reglamento.

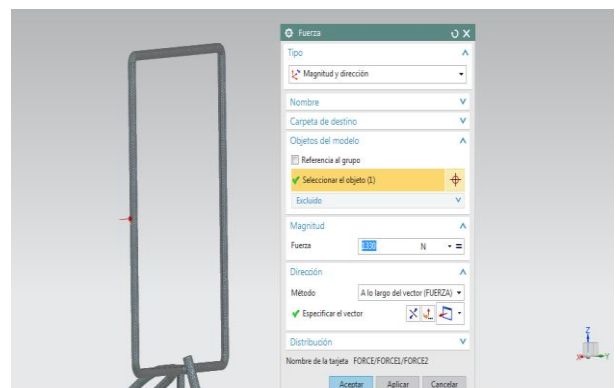
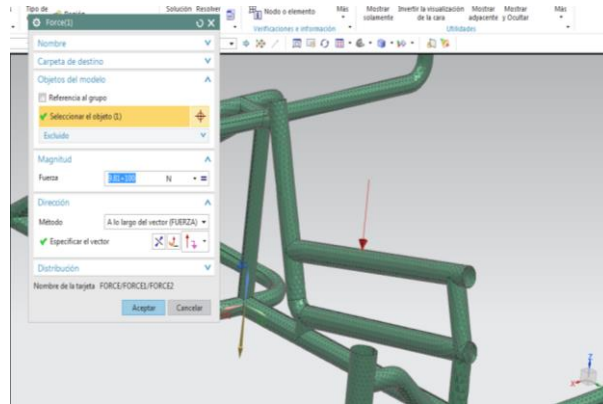


Figura 45. Aplicación de 1330N a un costado.



**Figura 46. Carga de peso del piloto.**

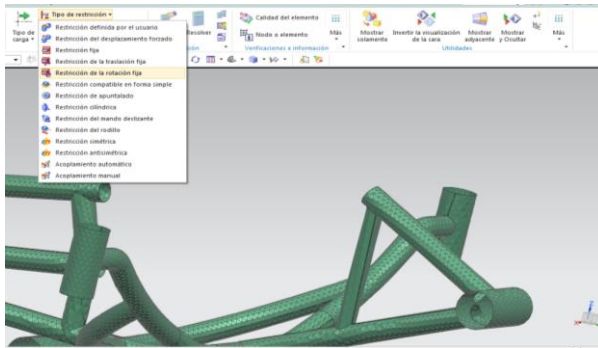
Como complemento se utilizarán estas cargas para el cálculo de frecuencia natural como parte de un entendimiento más detallado del cuadro.

#### 4.3.4 Restricciones

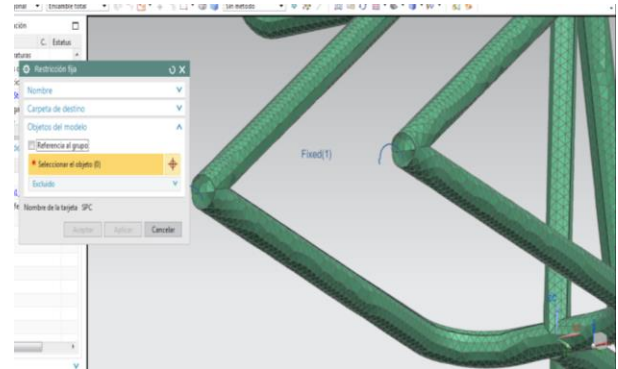
Siendo un cuadro soportado por tres ruedas las restricciones a considerar serán con un empotramiento fijo en la parte posterior y con libertad de rotación en los soportes delanteros considerando que sería un soporte simplemente apoyado, para entender el comportamiento en los seis ejes en el software Nx se muestra la siguiente tabla.

Traslación	
DOF1	x
DOF2	y
DOF3	z
Rotación	
DOF4	x
DOF5	y
DOF6	z

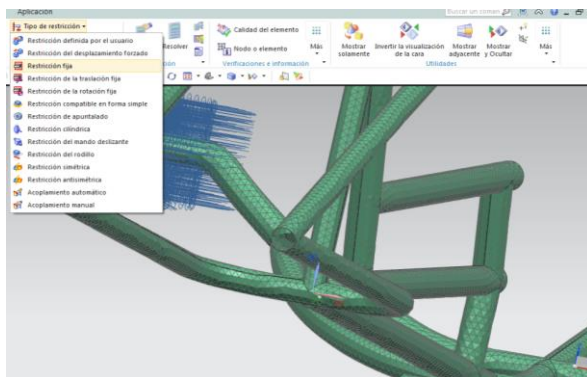
**Tabla 10. Ejes de giro de los componentes en NX.**



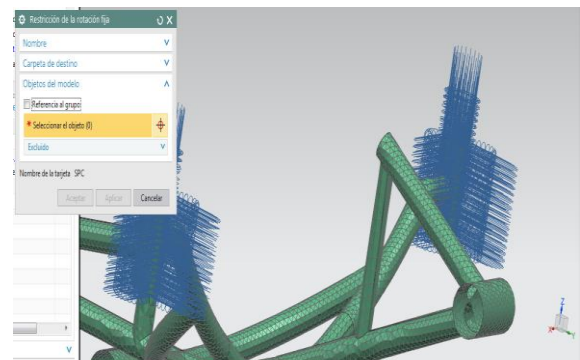
**Figura 47. Restricciones en soporte de llanta del cuadro.**



**Figura 49. Restricciones en soportes delanteros del cuadro.**



**Figura 48. Aplicación de restricciones en soporte de llanta trasera.**



**Figura 50. Aplicación de restricción en soportes delanteros.**

Los resultados obtenidos fue que la jaula de seguridad sufrió un desplazamiento de 4.84 mm por la fuerza ejercida por una persona con las características ya mencionadas, por lo que este dato se consideró para un estudio dinámico.

#### **4.4 Discusión de resultados**

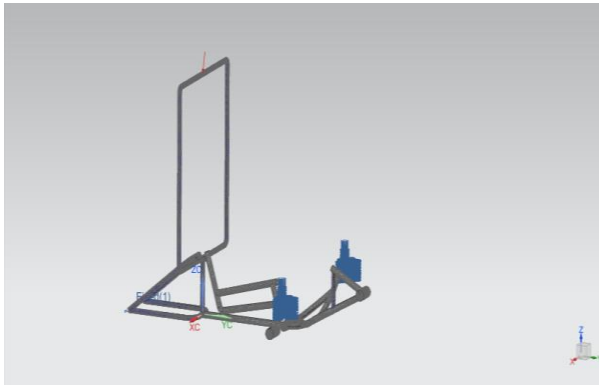
El comportamiento de la estructura fue la esperada ya que debido al peso que este aporta al conjunto que forma todo el vehículo soporta de una manera que puede ser funcional.

Según las distintas comparativas de los resultados del software Nx, Abaqus e Inventor se puede obtener una aproximación del comportamiento del vehículo, lo cual según su interpretación puede ser parteaguas para la mejora en el diseño.

### 4.4.1 Simulación de cargas a jaula de seguridad con mallado CTE-TRA (3)

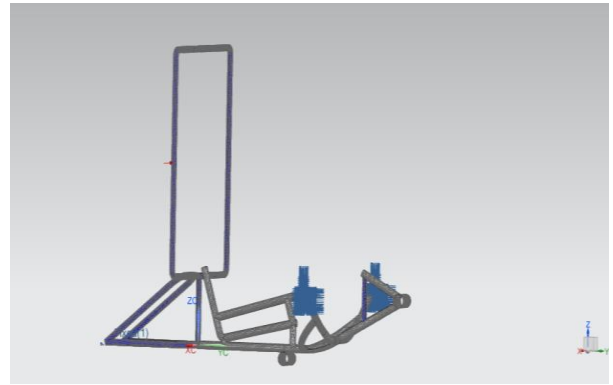
Debido a la geometría del vehículo es necesario aplicar este tipo de malla, pero primero es se generó una capa en el cuerpo sólido como preparación para así aplicar el mallado 2D.

**Carga de 2670N**

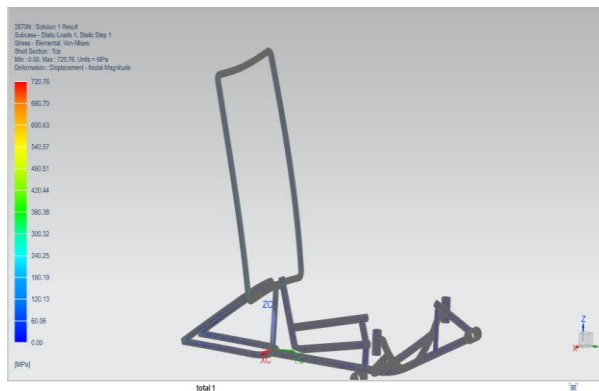


**Figura 51. Pieza lista para simulación(2670N).**

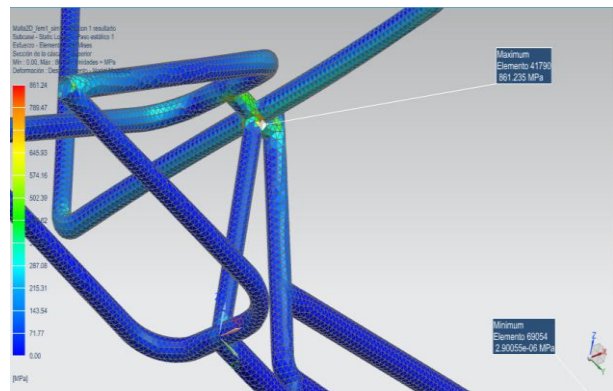
**Carga de 1330N**



**Figura 53. Pieza lista para simulación (1330N).**



**Figura 52. Esfuerzo Von Mises de 720MPa.**



**Figura 54. Esfuerzo Von Mises de 861.5MPa.**

## Carga de 981N

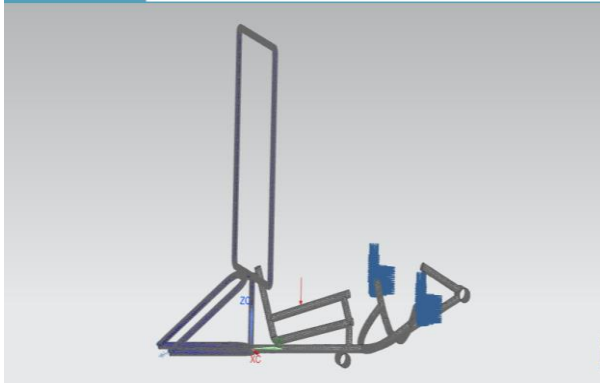


Figura 55. Pieza lista para simulación (981N).

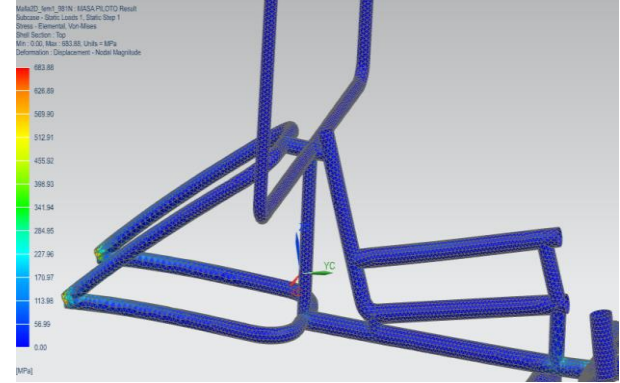


Figura 56. Esfuerzo Von Mises de 109.53MPa.

### 4.4.2 Simulación de cargas a jaula de seguridad con mallado Tetraédrico

Como se mostró en la sección 4.1.2, los elementos tetraédricos no son un elemento de mallado muy preciso en cuanto a resultados, pero debido a la geometría que posee la pieza con muchas curvas dificulta el uso de otro tipo de mallado, por lo que se optó por su uso en este estudio, que aproximara un resultado al comportamiento de este ante la aplicación de las cargas que establece el reglamento de este tipo de competencias.

Para iniciar con las simulaciones es necesario tomar en cuenta los lineamientos establecidos en la competencia de HPVC, por lo que es necesario comprobar la resistencia de la jaula antivuelco para verificar si era apto para participar en este evento.

Por lo que se realizó la simulación del objeto de estudio de la siguiente manera:

## I. Nx Nastran

### Carga de 2670N

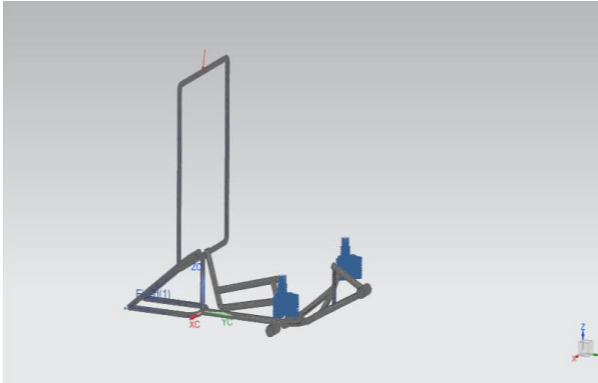


Figura 57. Carga de 2670N con restricciones.

### Carga de 1330N

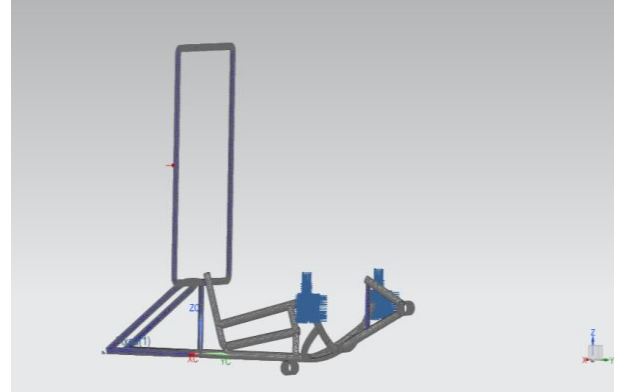


Figura 59. Carga de 1330N con restricciones.

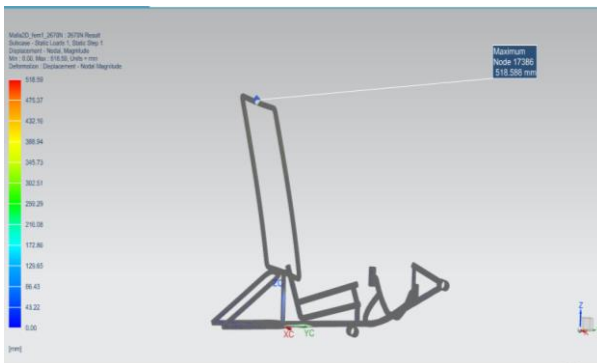


Figura 58. Esfuerzo Von Misses de 518.5MPa.

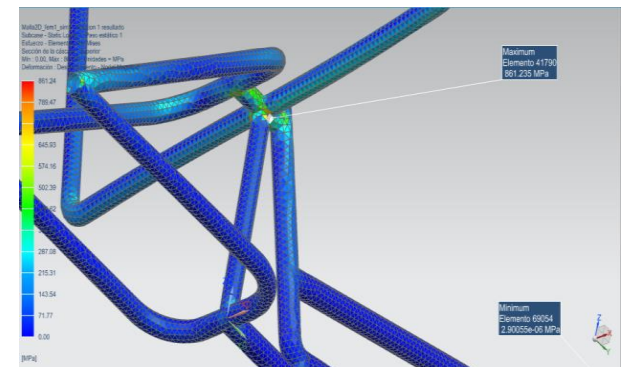


Figura 60. Esfuerzo Von Misses de 861.2MPa.

### Carga de 981N

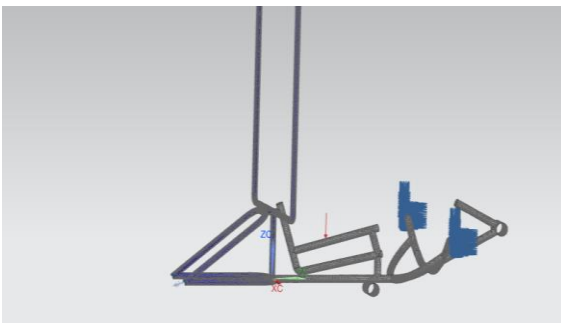


Figura 61. Carga de 981N con restricciones.

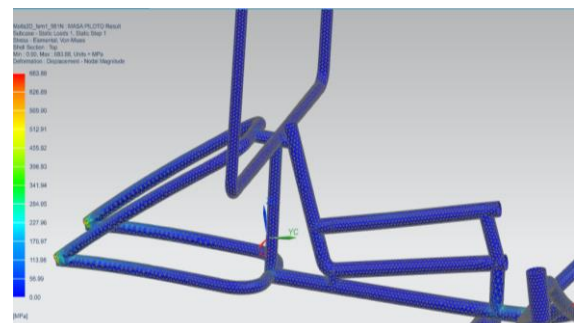


Figura 62. Esfuerzo Von Mises de

## II. Abaqus

### Carga de 2670N

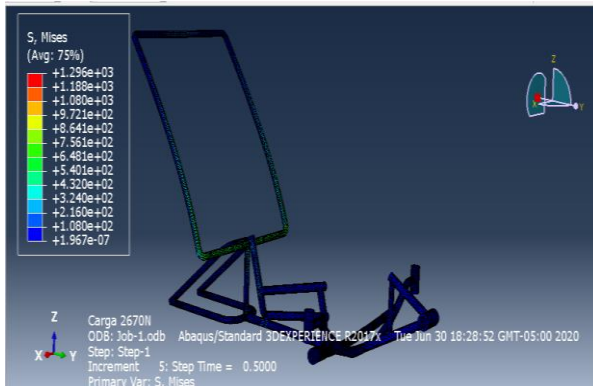


Figura 63. Esfuerzo Von Mises de 902MPa.

### Carga de 1330N

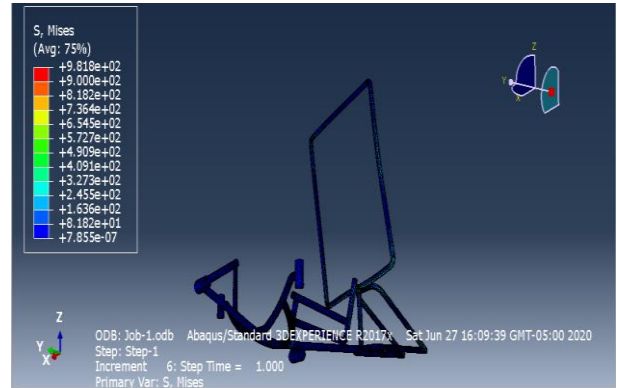


Figura 64. Esfuerzo Von Mises de 981MPa.

### Carga de 981N

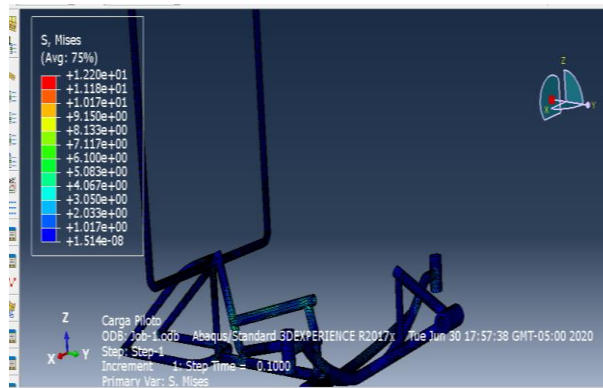


Figura 65. Esfuerzo Von Mises de 120MPa.

### III. Inventor

#### Carga de 2670N

##### *Coefficiente de Seguridad*

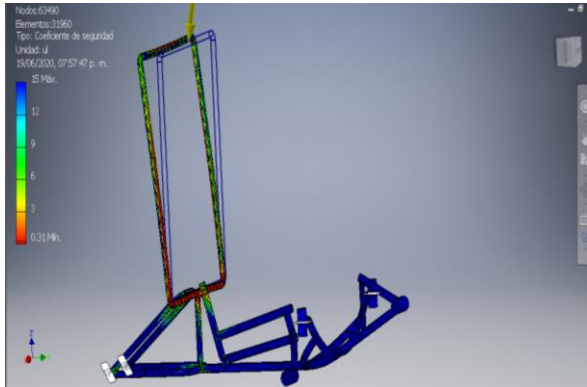


Figura 66. Coeficiente de seguridad de 0.31.

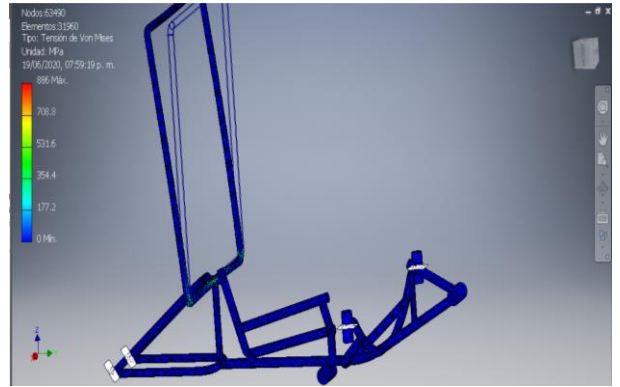


Figura 67. Esfuerzo Von Mises de 885MPa.

#### Carga de 1330N

##### *Coefficiente de Seguridad*

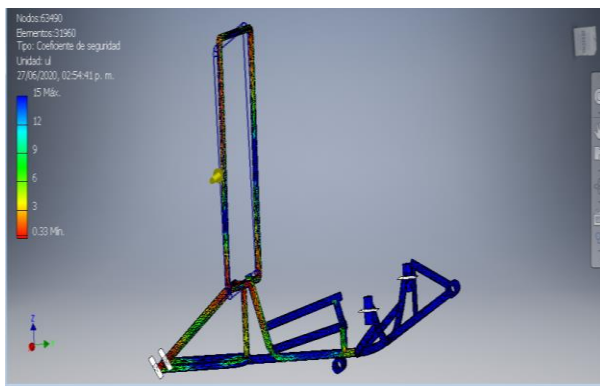


Figura 68. Coeficiente de Seguridad de 0.33.

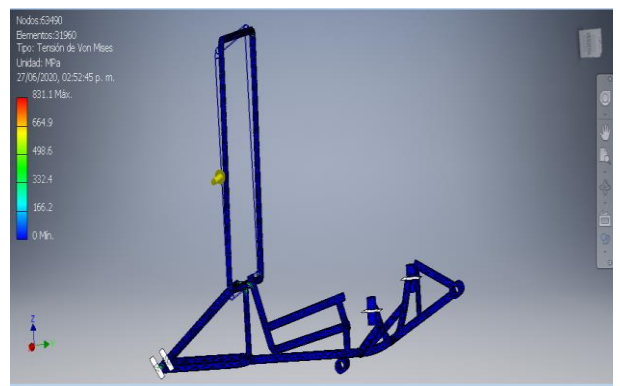


Figura 69. Esfuerzo Von Mises de 831.1MPa.

## Coefficiente de Seguridad

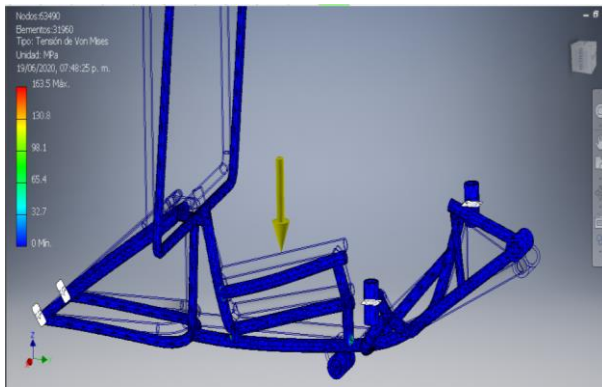


Figura 71. Esfuerzo Von Mises de 163MPa.

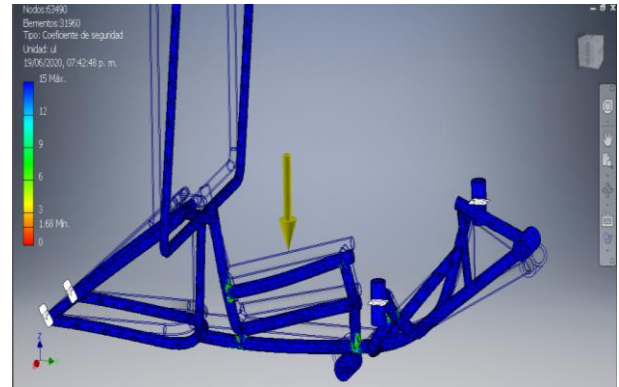


Figura 70. Factor de Seguridad de 1.68.

### 4.4.3 Simulación de Frecuencias SOL 103 en Nx

El siguiente estudio se considerará el desplazamiento y el esfuerzo Von Mises, contenido en 10 modos de frecuencias que permiten apreciar un comportamiento dinámico en distintas frecuencias y comportamientos, se realizó en el mallado de tipo Shell debido al tiempo de cómputo que representaría realizarlo en un mallado tetraédrico sólido.

#### Modo 1, 10.86Hz

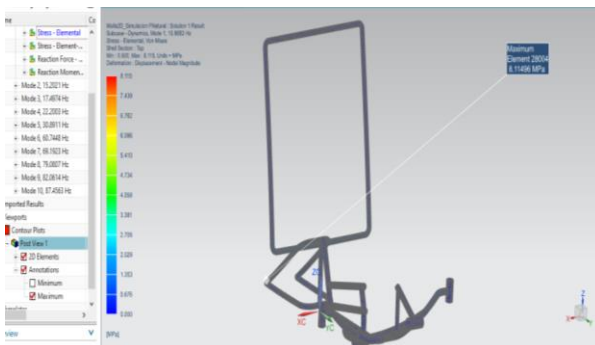


Figura 72. Desplazamientos en el modo de frecuencia 1.

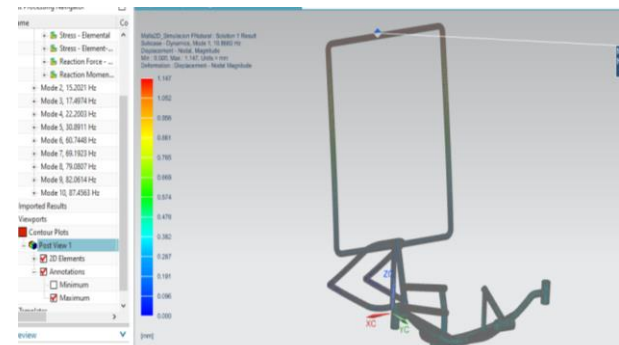


Figura 73. Von Mises de 8.11MPa.

## 4.4.4 Análisis Modal en Abaqus/CAE

### Modo 1, 12.7Hz

#### Desplazamiento

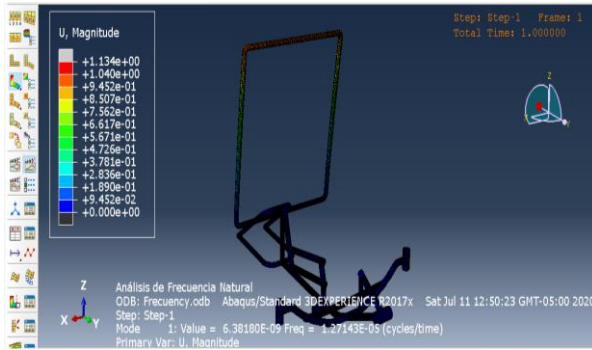


Figura 74. Desplazamientos en el modo de frecuencia 1.

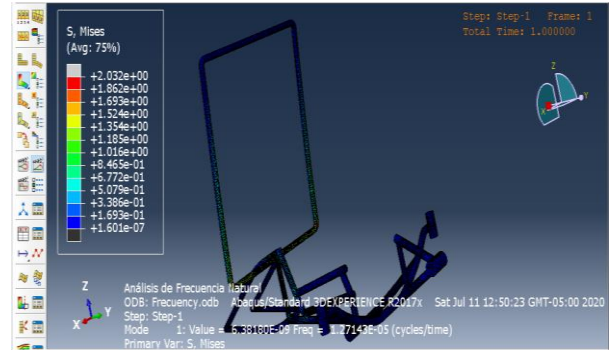


Figura 75. Esfuerzos Von Mises en el modo de frecuencia 1.

## 4.4.5 Análisis Modal en Inventor

### Modo 1, 13.42Hz

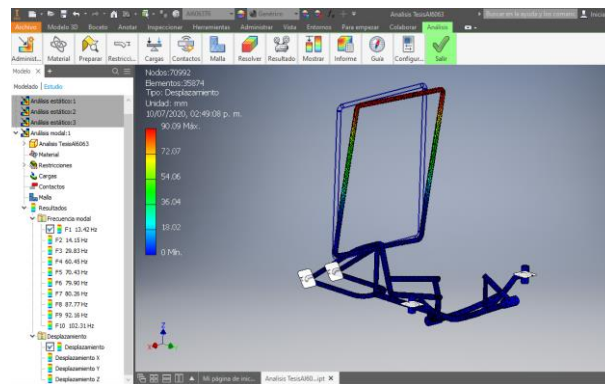


Figura 76. Obtención de 10 Modos de Frecuencia.

## 4.4.6 Simulación No Lineal con SOL. 106 en Nx

### Simulación con valores de Grafica Stress-Strain

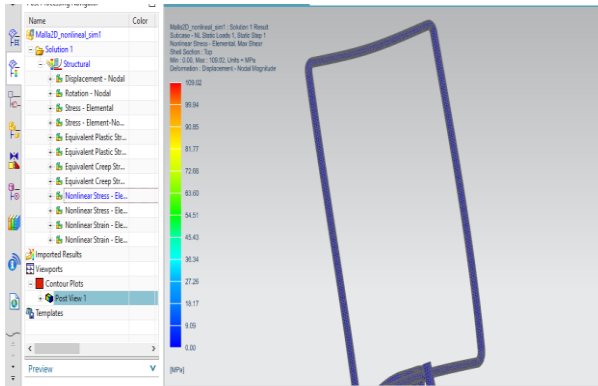


Figura 77. Von Mises con valor de 109MPa.

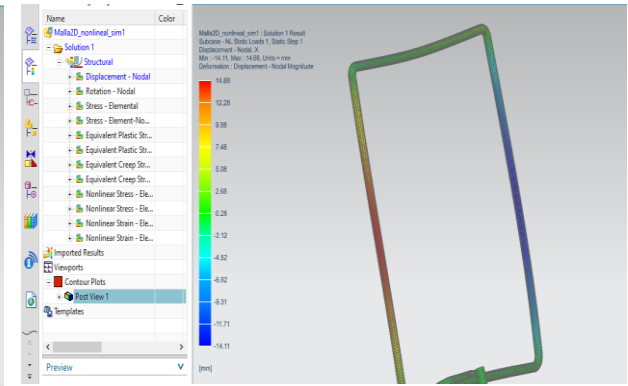


Figura 78. Deformación (Strain) de 10mm.

### Simulación sin valores Stress-Strain

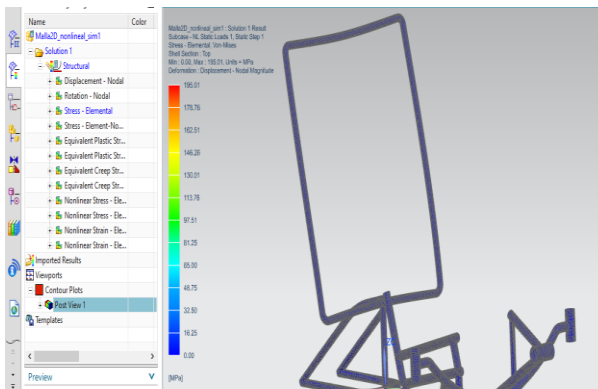


Figura 79. Von Mises con valor de 194MPa.

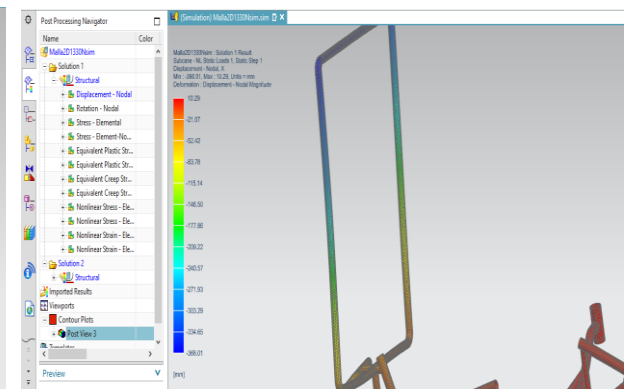


Figura 80. Deformación (Strain) de 14mm.

## Discusión de resultados

El comportamiento de la estructura fue la esperada ya que debido al peso que este aporta al conjunto que forma todo el vehículo soporta de una manera que puede ser funcional.

Según las distintas comparativas de los resultados del software Nx, Abaqus e Inventor se puede obtener una aproximación del comportamiento del vehículo, lo cual según su interpretación puede ser parteaguas para la mejora en el diseño.

## Análisis de Cargas Lineales

Dado los valores obtenidos en los estudios 2D y 3D, se puede inferir que es una estructura con cierta viabilidad para competir en un evento de este tipo, aunque se recomendaría cierto reforzamiento estructural para mejorar el cuadro y entregar un poco más de seguridad.

<b>Carga de 2670N</b>		
<b>Programa</b>	<b>Desplazamiento [mm]</b>	<b>Esfuerzo Von Mises [MPa]</b>
Abaqus	20	833
Nx	19.9	781.81
Inventor	19.6	885

Tabla 11. Comparativa Análisis Lineal con Carga de 2670N.

<b>Carga de 1330N</b>		
<b>Programa</b>	<b>Desplazamiento [mm]</b>	<b>Esfuerzo Von Mises [MPa]</b>
Abaqus	16.5	792
Nx	12.8	861
Inventor	15.8	831

Tabla 12. Comparativa Análisis Lineal con Carga de 1330N.

<b>Carga de 981N</b>		
<b>Programa</b>	<b>Desplazamiento [mm]</b>	<b>Esfuerzo Von Mises [MPa]</b>
Abaqus	4.27	185
Nx	3.6	109.53
Inventor	3.65	163

Tabla 13. Comparativa Análisis Lineal con Carga de 981N.

<b>Nx 2D</b>		
<b>Carga [N]</b>	<b>Desplazamiento [mm]</b>	<b>Esfuerzo Von Mises [MPa]</b>
2670	12.3	710.48
1130	5.1	813.46
981	3.2	69.95

Tabla 14. Comparativa Análisis Lineal con mallado tipo Shell.

Si bien los valores de esfuerzo fueron muy próximos al valor del material debilitado por soldadura, también se considera que su proceso si llevo cierto enfriamiento natural después de las uniones por lo que los valores pudieron ser mayores a los calculados, considerando el comportamiento del vehículo en las pruebas físicas en las que estuvo implicado, se puede apreciar un comportamiento estructural valido, por lo que el material seleccionado fue una opción con cierta viabilidad para producir este tipo de vehículos.

El hecho de haber utilizado un mallado tetraédrico que se puede considerar básico a comparación de otros como uno basado en cubos o hexaedros con sus respectivos grados de libertad, genera resultados que pueden ser considerados como exagerados en algunas regiones, pero su elección fue debida a la capacidad de la computadora por lo que se refino lo más posible mejorando el resultado.

Por lo general softwares más especializados poseen un preprocesamiento que genera mallados más sofisticados, para este estudio el software más limitado fue Inventor ya que en su entorno no es posible tener un amplio control de mallado a diferencia de Nx y *Abaqus*. La disparidad entre los resultados se debe a el código y los parámetros utilizados por los programas y en cierta medida al tipo de mallado ya que en el caso de Nx este afecto los resultados, al considerar las regiones con restricciones como las de mayor sometimiento a esfuerzo.

Por otro lado, en Abaqus es un programa de resolución de simulaciones no lineales por lo que aun siendo el mismo estudio con las mismas propiedades que Nx dio resultados algo alejados del anterior.

En el caso de Autodesk Inventor este en muchos resultados fue el más cercano a Nx, que si bien es el programa con menos recursos en cuanto herramientas CAE, comparte con Nx el código Nastran para ejecutar las simulaciones.

Como las reglas generales de la competencia organizada por ASME pueden que la jaula no presente una deformación mayor a 5.2cm y sumado al hecho de que no cumple con parámetros de linealidad (Elasticidad) en el estudio No lineal realizado en Abaqus y Nx Nastran (SOL. 106 Non Lineal Static Constrains) obtuvimos la deformación que presenta esta.

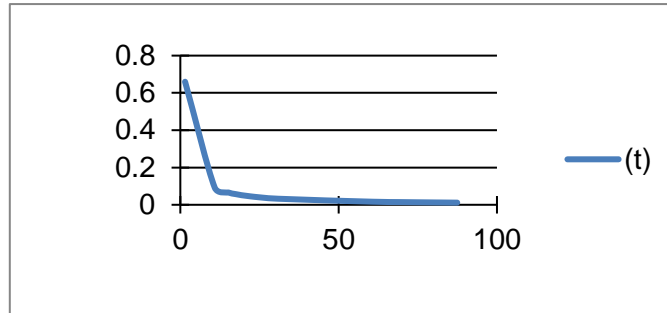
Lamentablemente Autodesk Inventor no posee en la versión utilizada capacidad para análisis no lineal, por lo que no se considerara para este estudio, es una limitante del programa.

### ***Análisis Modal.***

Los resultados obtenidos con la SOL 103 de respuesta dinámica nos arrojaron valores, que ciertamente ayudan a un entendimiento dinámico de vehículo, así como la validación del mismo, debido a que al no poseer un rango de frecuencias cercano al de mayor valor en el intervalo de  $w_n$  se puede asegurar un correcto funcionamiento estructural.

70 RPM	
$f_0$	(t)
1.16	0.86
10.86	0.09208
15.2	0.06579
17.49	0.05718
22.2	0.04505
30.89	0.03237
60.74	0.01646
69.19	0.01445
79.08	0.01265
82.06	0.01219
87.45	0.01144

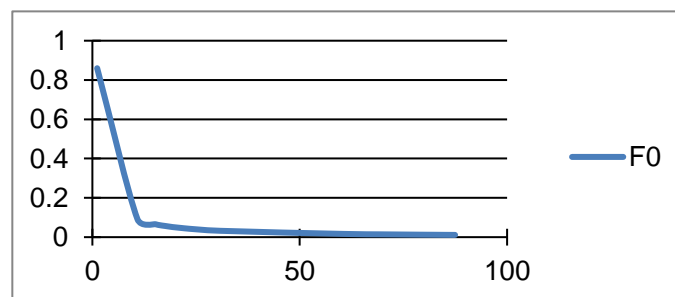
**Tabla 15. Modos de frecuencia en comparación con 70rpm.**



**Figura 82. Gráfico de comportamientos de frecuencia modal a 70rpm.**

80 RPM	
$f_0$	(t)
1.16	0.75188
10.86	0.09208
15.2	0.06579
17.49	0.05718
22.2	0.04505
30.89	0.03237
60.74	0.01646
69.19	0.01445
79.08	0.01265
82.06	0.01219
87.45	0.01144

**Tabla 15. Modos de frecuencia en comparación con 80rpm.**



**Figura 83. Gráfico de comportamientos de frecuencia modal a 80rpm.**

90 RPM	
$f_0$	(t)
1.16	0.66
10.86	0.09208
15.2	0.06579
17.49	0.05718
22.2	0.04505
30.89	0.03237
60.74	0.01646
69.19	0.01445
79.08	0.01265
82.06	0.01219
87.45	0.01144

Tabla 17. Modos de frecuencia en comparación con 90rpm.

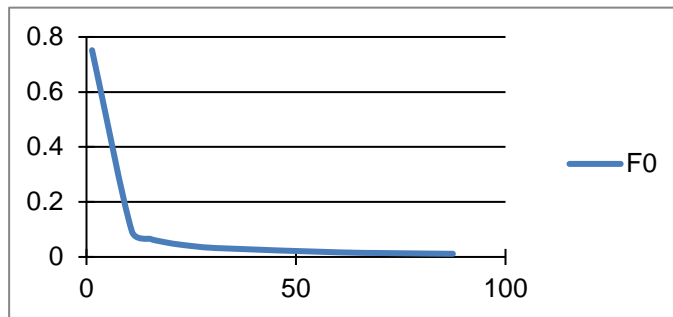


Figura 84. Gráfico de comportamientos de frecuencia modal a 90rpm.

Análisis Modal			
Modos	Abaqus [Hz]	Nx [Hz]	Inventor [Hz]
Modo 1	12.7	10.86	13.42
Modo 2	14.7	15.2	14.15
Modo 3	29.4	17.49	29.83
Modo 4	60.6	22.2	60.45
Modo 5	70.7	30.89	70.43
Modo 6	75.1	60.74	79.90
Modo 7	79.6	69.19	80.26
Modo 8	88.9	79.08	87.77
Modo 9	91.7	82.06	92.16

Tabla 18. Comparativa de Frecuencias obtenidas en los tres entornos.

Dado que ninguna frecuencia es menor o igual a la generada por la vibración ejercida por los pedales al cuadro se descarta un fallo por cargas dinámicas siendo la mayor de estas 40GPa, considerando que aun con el debilitamiento generado por el efecto térmico generado por la soldadura el esfuerzo que se produce en estas cargas no llega a acercarse al valor mínimo del Al 6053 T6.

De los resultados mostrados en cada uno de los estudios se aprecia el comportamiento similar entre los programas así como su limitantes, mientras Nx Nastran y Abaqus poseen módulos que permiten realizar estudios no lineales a las piezas Autodesk Inventor se limita a solo análisis lineales que al ser un programa con el mismo código que Nx Nastran no da comportamientos tan distintos considerando que la variación se da por el control del mallado que claramente no es tan desarrollado al no tener un módulo de Preprocesamiento. El análisis no lineal hecho en la jaula de la estructura da un acercamiento al comportamiento real de esta ante las situaciones expresadas en el reglamento de la competencia, claramente por las exigencias de este no se puede hacer uso de la SOL. 101 del código de Nastran debido a que este genera esfuerzos con respecto al desplazamiento lo cual se da en la región elástica del material y lo que se requiere en el caso particular es la relación de esfuerzo-deformación que bien a demostrado dar resultados con esfuerzos menores a los arrojados por análisis lineales, aunque estos se pueden usar para un diseño, representaría robustecer la estructura dando no solo un diseño limitado sino un prototipo poco práctico y costoso.

Al ser el objeto de estudio de este proyecto una estructura ya manufacturada se puede dar un reporte de lo que está bien en el diseño y sus limitantes que surgieron por ser un concepto concebido por estudiantes, aunque por los resultados aquí mostrados no estuvieron del todo equívocos.

Claramente la estructura presentada fue una propuesta para una competencia estudiantil por lo que su diseño es limitado en varios aspectos. Aun así, es aplicable para este tipo de competencias al menos en cuestiones de seguridad estructural

<b>Carga de 2650N</b>		
<b>Programa</b>	<b>Deformación [mm]</b>	<b>Esfuerzo Von Mises [MPa]</b>
Abaqus	13.5	129
Nx	14.2	109
Inventor	-	-

**Tabla 19. Análisis No Lineal comparativa Nx-Abaqus.**

## Observaciones

Con base a los resultados obtenidos, se encontró ciertas áreas débiles en el diseño, de haberse aplicado este tipo de análisis antes de manufacturar el cuadro se habría eliminado ciertos fallos y se habría obtenido un mejor dimensionamiento en el caso del espesor del tubo seleccionado. Es por ello que hoy en día el desarrollo de productos se ha visto favorecido por el uso de sistemas CAD-CAE, ya que de otra forma se necesitaría generar prototipos solo dedicado a pruebas, lo que implica un alto costo o correcciones en el producto final, esto puede generar ciertas cuestiones antiestéticas que, aunque mejoran el comportamiento pueden influenciar en la elección de estos y en el caso de una competencia HPVC, afectaría su obtención de premios, debido al aspecto de este.

La selección de la aleación Al 6063 T6 se realizó solo con las recomendaciones de uso de los fabricantes y una idea general de sus propiedades, con el presente estudio se corrobora esa aplicación, aunque en el mercado existen opciones que serían en cierto modo más accesibles, las bondades que este material aporta son considerables, por lo que su uso en este proyecto represento un buen análisis y aplicación.

El uso de este tipo de softwares y entendimiento del análisis por elementos finitos requiere capacitación y entendimiento en el área así como un conocimiento de materiales y su aplicación en la ingeniería, la formación del Ingeniero Mecánico y Eléctrico de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla permite que el egresado obtenga habilidades en sistemas CAD-CAE, con enfoque a este perfil profesional, que posee cierto prestigio en el ámbito laboral debido al creciente sector manufacturero, este se ve beneficiado con la aplicación de esta tecnología, que representa un mejor desarrollo de sus productos que al final se ve reflejado en la calidad del producto para el consumidor y que repercute en la aceptación en los mercados y aporta mejor competitividad a las empresas.

Ya con la comparación obtenida en los tres programas utilizados se puede afirmar que su uso dependerá de la experiencia del usuario e inversión que requiera el estudio, en el caso de Autodesk Inventor su tiempo de aprendizaje es menor a los dos anteriores, en el caso particular de alguien que tenga conocimiento en entornos CAD, el uso de su herramienta de CAE es más intuitiva por lo que representa una ventaja en cuanto a simulaciones que requieran un análisis rápido y una capacitación básica en el área de FEA.

Para el uso y aprendizaje de Abaqus se requiere mayor conocimiento en el área de CAE, ya que a diferencia de Nx e Inventor tiene un código más robusto y un módulo de materiales más completo en cuestión de asignación de valores a diferencia de los otros dos que en muchos casos poseen una biblioteca con diversos materiales, aunque carece de unidades físicas en los resultados por lo que para su interpretación se requiere que el usuario tenga identificado los valores y unidades que utilizó en el entorno, lo que puede complicar el entendimiento en los resultados para personas ajenas al entorno, por otro lado posee una especie de guía del proceso bien elaboradas, debido a que genera un trabajo ordenado desde la pieza hasta el mallado, según la apreciación del autor en el área del mallado de piezas se tiene mayor ventaja a comparación de los otros, ya que el programa da las pautas al usuario para seleccionar el mallado que más se adecue a la geometría evitando errores y retrabajos.

Nx Nastran posee un entorno bueno, pero con una curva de aprendizaje de mayor tiempo que Inventor, aunque similar al de Abaqus, su fortaleza es la facilidad para corregir errores en el diseño original, para luego efectuar la simulación, además de un gran recurso por parte de la empresa Siemens, que tiene mucha información.

En el caso del estudio que se realizó en la tesis tanto Nx como Abaqus fue sencillo en términos de capacidad, ya que estos poseen herramientas que podrían analizar un sistema más complejo a diferencia de Inventor, pero todo esto dependerá del presupuesto destinado, ya que si este es módico Inventor sería bien valorado ya que en comparación de costos de licencia tanto Siemens como Dassault Systemes ofrecen productos de mayor poder adquisitivo lo que en muchos casos limita el acceso tanto a instituciones educativas como empresas para que adquieran licencias, en versiones estudiantiles particularmente Siemens PLM ofrece versiones gratuitas de sus programas como son Solid Edge, Nx y Femap este último enfocado totalmente a CAE, por su parte Dassault Systemes ofrece una versión estudiantil de Abaqus, por otro lado existen más programas como son: ANSYS, LS-DYNA, MSC NASTRAN /PATRAN, Hyperworks y otros más, todos estos son muy buenos y al igual que en este estudio depende de la habilidad y conocimientos del usuario su aplicación en diversos proyectos así como la inversión que se realice ya que no solo es la adquisición de licencia, sino también la capacitación y compra de equipo de cómputo especializado para realizar estos trabajos lo que en muchos casos será un impedimento

para una empresa o institución educativa, además de la influencia que las primeras dan al sector educativo regional ya que los planes de estudio se enfocaran a los programas que más se usen.

Un hecho que se debe mencionar es que en este proyecto se hizo un análisis simple con los programas de fácil acceso, aunque cabe resaltar que el único programa enfocado a FEA es Abaqus ya que los anteriores son de interfaz CAD/CAM/CAE cada uno con sus virtudes y limitantes por lo que el estudio realizado tiene un porcentaje de exactitud limitado debido al equipo en el que se realizaron los análisis y que a comparación del uso de programas más avanzados estos son paquetes para MEF.

Como una mención el perfil del ingeniero formado en la Benemérita Universidad de Puebla, aunque tiene bases para realizar estos estudios como ya se mencionó anteriormente de forma muy superficial, ya que los solvers actualmente ocupados a los que el alumno tiene acceso limita un poco la adquisición de experiencia en el dominio practico en un solver profesional, no así la formación teórica.

## Conclusión

Los resultados obtenidos en este estudio comparativo fueron los esperados en la estructura base ya que en el análisis lineal obtenido en los tres entornos de simulación arrojaron valores aceptables en cuanto a la carga del piloto por lo que el criterio de materiales dúctiles y de esfuerzo Von Mises fue el adecuado.

Sin embargo, en la jaula de seguridad requirió un análisis distinto ya que por reglamento se necesitó determinar su deformación, así como su fiabilidad, gracias a las herramientas de FEA que poseen tanto Abaqus como Nx Nastran se obtuvo valores aceptables más cercanos al comportamiento real.

Se llega a la conclusión de que el uso de las herramientas de análisis no lineal de los distintos softwares es una herramienta muy importante ya que sin ella el presente en caso de estar en etapas de desarrollo se habría visto forzado a un rediseño más robusto del presentado, cabe aclarar que el hecho de haber usado elementos triangulares suma rigidez a la pieza por lo que sus resultados se elevan significativamente, esto se disminuye al emplear elementos tipo Shell como se vio en los estudios realizados; además de requerir menor tiempo de cómputo en su solución.

Un aspecto de suma importancia es el llenado correcto de los valores del material empleado ya que de no haber agregado los datos de la curva Esfuerzo-Deformación la regiones y límites del material se determinan lo que eleva los esfuerzos y da menor fiabilidad en lo que se realiza.

Ningún programa con herramientas CAE o enfocado directamente a FEA es mejor que el otro, sino que cada uno cuenta con ciertas características y se adaptan a lo que el usuario requiera de ellas.

## Referencias

- [1] Alcaraz, L., López, E., Valdés, O., Reséndiz, S. y Rodríguez, R. (2016). « *Revisión del estado del arte del efecto de procesos de fabricación sobre esfuerzos en componentes de aluminio*, ». *REDIB*, Vol. 38, Núm. 119. <http://www.itce-laya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/271/261>
- [2] APA. (09 de Abril del 2020). «*Normas APA Actualizadas [7ª Edición]*» <https://normas-apa.org/referencias/citar-pagina-web/>
- [3] Askeland, D. (1998). «*Ciencia e Ingeniería de los Materiales*,» Cd. Mex, Mex. International Thomson.
- [4] Blanco, A., y Vereá, L. (2016) « *ESTUDIO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE CARROCERÍA EN ALUMINIO PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO DE TRANSPORTE URBANO DE PASAJEROS Y AHORRO DE ENERGÍA*» *SEDICI*, II Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación (MTL 2016), págs.: 201-214. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77431>
- [6] Cañizares, P. (2016). «*Prediseño y Análisis Numérico de un prototipo de cuadro de bicicleta en CFRP*» Sevilla, Es., Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- [7] Castaño, D. (2019). , « *Diseño, análisis y estudio de fatiga de cuadro de bicicleta con elementos finitos y diferentes materiales de fabricación*, » Valencia, Es. Universitat Politècnica de Valencia.
- [8] Cortassa, M. (2015). «*Simulación numérica de ensayo para bicicleta de montaña según UNE-EN 14766*», Córdoba, Ar. Universidad de Córdoba.
- [9] da Fonseca, Z. (2011), «*El método de los elementos finitos: una introducción*, “Maracaibo, Ve. Universidad Rafael Urdaneta.
- [10] de Mulder, D. (2013). «*Construcción y validación estructural del Vehículo de Tracción Humana 2013 de la Universidad de los Andes*,» Bogotá, Co. Universidad de los Andes.
- [11] Fajardo, C. Veira, S. (2019). «*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO DE TRACCIÓN HUMANA (VTH) TIPO TRICICLO, COMO ALTERNATIVA AL TRANSPORTE URBANO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ*,» Bogotá, Co. Universidad Distrital Francisco Javier de Caldas.

- [12] Ferrari, D. del Castillo, F. (2018) «*Método del Elemento Finito y AutoFEM,*» Cuauhtitlán Izcalli, México, Universidad Autónoma de México.
- [13] Gokhale, N., Bedekar, S., Deshpande, S. y Thite, A. (2008) «*Practical Finite Element Analysis,*» Maharashtra, In. Altair.
- [14] Hernández, R., Fernández C. y Baptista M. (2010). «*Los métodos mixtos,*» de Metodología de la investigación, México, Mc Graw Hill.
- [15] Khennane, A. (2013). «*Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus,*» Boca Raton, U.S.A. Taylor and Francis Group.
- [16] Logan, D. (2007), «*A First Course in the Finite Element Method,* » Wisconsin, U.S.A. University of Wisconsin.
- [17] Marco, E. (2010). «*METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS A FATIGA MEDIANTE EL CÓDIGO PRO ENGINEER: APLICACIÓN A UN EJE FERROVIARIO,*», Madrid, Es. Universidad Carlos III de Madrid.
- [18] Marmolejo, C. (2014). «*MANUAL DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ALUMINIO,*», Cd. Mex, Mex. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [19] Marinez, C. (2016). «*Análisis de materiales para el diseño de un remate a compresión basado en el desempeño del producto y su fabricación,*» Querétaro, Mex. CIA-TEQ.
- [20] Mendoza, A. Gómez, J. (2016). «*Modelado dinámico y diseño para fatiga estocástico de una bicicleta plegable usando FEM y Simulación CAE en NX NASTRAN con el método Montecarlo,*» Cartagena de Indias, Co. Universidad Tecnológica de Bolívar.
- [21] Molero, B. (2 de Mayo del 2020). «*Introducción al Análisis de Fatiga o Durabilidad.*» Iberisa. <http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm>
- [22] Molina, J. (1992). «*Análisis Estructural con Elementos Finitos,*», Sn. Nicolás de los Garza. Mex. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [23] Molina, J. (2010). «*Fundamentos del Método de Elementos Finitos,*» La Paz, Bo. U.M.S.A.
- [24] Morocho, E. (2018). «*DISEÑO, Análisis estructural y construcción de un cuadro para bicicleta de montaña,*» Loja, Ec. Universidad Nacional de Loja.

- [25] Naranjo, M. (2015). «*Estudio de fatiga de un cuadro de bicicleta mediante el método de los elementos finitos*», Madrid, Es. Universidad Carlos III de Madrid.
- [26] Oñate, E.(1992), «*Calculo de estructuras por método de elementos finitos. Análisis estático lineal,*» Madrid, Es.
- [27] Ortiz, S. (2017). «*Diseño de marco estructural de un trike recumbente por medio de la tecnica de optimización topológica*», Valencia, Es. Universitat Politecnica de Valencia.
- [28] Rico, V. (2016). «*Análisis de las Propiedades Mecánicas de Tenacidad, Esfuerzo de Tensión y Dureza de la aleación de Aluminio 2024 T4, Tratamiento Térmicamente mediante el Endurecimiento por precipitación a 180°C,*» Bogotá, Co. Universidad Libre.
- [29] Santoyo, L. (2 de Junio del 2020). «*Cuando los Ingenieros buenos entregan Malos resultados del Análisis de Elemento Finito*». Luri Engineering. <https://www.linkedin.com/pulse/cuando-los-ingenieros-buenos-entregan-malos-del-de-finito-s-lópez>
- [30] Shegley, J. (2012). «*Diseño en Ingeniería Mecánica de Shegley,*» Cd. Mex., México, Mc Graw Hill.
- [31] Trigo, O. (2011). «*Cálculo, diseño y optimización de chasis tubular mixto para vehículo eléctrico,*» Zaragoza, Es. Universidad de Zaragoza.