



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Propuesta metodológica para el diseño estructural
de exocoques

Methodological proposal for the structural design
of exocars

Autor/es

Victor Navarro Guinda 760984

Director/es

Juan José Alba López

Titulación del autor

Graduado en Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2023/2024

Resumen sobre propuesta metodológica para el diseño estructural de exocoches

El presente trabajo tiene como objetivo la creación de una metodología a seguir para la elaboración de exocoches, es decir, vehículos de chasis tubulares, teniendo como sujeto concreto de trabajo un chasis con capacidad de cuatro plazas. El procedimiento abarca desde seleccionar todas las herramientas necesarias para el cálculo de la estructura como son los criterios, el material y el método de cálculo, hasta el prediseño y análisis mecánico de la estructura. Para facilitar la comprensión de esta última parte, hay un apartado dedicado a una guía rápida que recoge como diseñar y analizar estructuralmente el chasis.

Índice de figuras

Figura 1.1-1 Vista frontal en tres cuartos del exocoche MEV Rocket, Autor Stiggymills bajo licencia CC (by-sa)	1
Figura 1.1-2 Vista lateral de SandRail, Autor John Lloyd bajo licencia CC (by).....	1
Figura 1.1-3 Vista trasera de un Buggy, Autor Arjan Carja, bajo licencia copyleft en www.Pexels.com	2
Figura 1.1-4 Vista frontal en tres cuartos del exocoche MEV Missile EV, Autor Stuart Mills, bajo licencia CC (by-sa).....	2
Figura 1.1-5 Exocoche accidentado, todos los derechos de wavy.com	3
Figura 1.1-6 Vista frontal de Caterham Seven, Autor Mangopulp2008, bajo licencia CC (by-nc-nd)	3
Figura 1.1-7 Competición Caterham Academy Autor Ian Dick, bajo licencia CC (by) ..	4
Figura 2.1-1 Equilibrio estático del chasis: cargas externas.....	6
Figura 2.4-1 viga biapoyada con carga distribuida lineal.....	11
Figura 2.4-2 viga biempotrada con carga distribuida lineal	11
Figura 2.4-3 viga biapoyada con carga puntual en el punto medio.....	12
Figura 3.1-1 Dimensiones generales del chasis.....	14
Figura 3.1-2 Leyenda con nombres de las partes del chasis.....	15
Figura 3.1-3 Representación visual del desplazamiento de la iteración cero.....	15
Figura 3.1-4 Representación visual de las tensiones máximas de la iteración cero	16
Figura 3.1-5 Representación visual de las tensiones mínimas de la iteración cero.....	16
Figura 3.2-1 Representación visual del desplazamiento de la iteración uno.....	17
Figura 3.2-2 Representación visual de las tensiones mínimas de la iteración uno.....	17
Figura 3.3-1 Representación visual del desplazamiento de la iteración dos	18
Figura 3.3-2 Representación visual de las tensiones máximas de la iteración dos	19
Figura 3.3-3 Representación visual de las tensiones mínimas de la iteración dos	19
Figura 3.4-1 Representación visual de las tensiones mínimas de la iteración tres.....	20
Figura 3.4-2 Representación visual de las tensiones máximas de la iteración tres	20
Figura 3.5-1 Representación de los apoyos durante el análisis modal	21
Figura 3.5-2 Resultados de las frecuencias modales	21
Figura 3.5-3 Ejemplo desplazamiento a casa de frecuencias modales	22
Figura 3.5-4 Chasis reformado tras estudio modal.....	22
Figura 3.5-5 Resultados de las frecuencias modales solucionadas	22
Figura 3.5-6 Resultados de análisis estático tras análisis modal	22
Figura 4.1-1 Programa de CAD: boceto alámbrico de arcos.....	23
Figura 4.1-2 Programa de CAD: elección de plano perpendicular.....	23
Figura 4.1-3 Programa de CAD: sección de las barras.....	24
Figura 4.1-4 Programa de CAD: implementación del método paramétrico.....	24

Figura 4.1-5 Programa de CAD: extrusión de los perfiles 3D	25
Figura 4.2-1 Programa de análisis: inicio de proyecto	25
Figura 4.2-2 Programa de análisis: Selección de geometría.....	26
Figura 4.2-3 Programa de análisis: conversión a alámbrico.....	26
Figura 4.2-4 Programa de análisis: guardado	27
Figura 4.3-1 Paquete de MEF: propiedades de material	27
Figura 4.3-2 Paquete de MEF: propiedades de sección.....	28
Figura 4.3-3 Paquete de MEF: asignación de perfil	28
Figura 4.3-4 Paquete de MEF: propiedades de contacto	29
Figura 4.3-5 Paquete de MEF: propiedades de mallado.....	29
Figura 4.3-6 Paquete de MEF: cargas externas y apoyos.....	30
Figura 4.3-7 Paquete de MEF: obtención de resultados	31
Figura 4.4-1 Paquete de nodos modales: propiedades de contacto	32
Figura 4.4-2 Paquete de nodos modales: propiedades de apoyos.....	32
Figura 4.4-3 Paquete de nodos modales: masas puntuales	33
Figura 4.4-4 Paquete de nodos modales: configuración de la solución.....	33
Figura 4.4-5 Paquete de nodos modales: obtención de la solución	34
Anexos	
Figura A.2-1 Caso 1: viga biapoyada con carga distribuida lineal.....	A2.1
Figura A.2-2 Caso 1: representación gráfica en MEFI.....	A2.2
Figura A.2-3 Caso 1: variables introducidas en MEFI.....	A2.3
Figura A.2-4 Caso 1: solución mediante MEFI.....	A2.3
Figura A.2-5 Caso 1: convergencia método lineal según nodos	A2.4
Figura A.2-6 Caso 1: convergencia método lineal según elementos.....	A2.4
Figura A.2-7 Caso 1: convergencia método cuadrático según nodos.....	A2.5
Figura A.2-8 Caso 1: convergencia método cuadrático según elementos	A2.5
Figura A.2-9 Caso 1: convergencia método sección según nodos	A2.6
Figura A.2-10 Caso 1: convergencia método sección según elementos	A2.6
Figura A.2-11 Caso 1: comparación de error según nodos	A2.7
Figura A.2-12 Caso 1: comparación de error según elementos.....	A2.7
Figura A.2-13 Caso 2: viga biempotrada con carga distribuida lineal	A2.9
Figura A.2-14 Caso 2: variables introducidas en MEFI.....	A2.9
Figura A.2-15 Caso 2: representación gráfica en MEFI.....	A2.10
Figura A.2-16 Caso 2: solución mediante MEFI.....	A2.10
Figura A.2-17 Caso 2: convergencia método lineal según nodos	A2.10
Figura A.2-18 Caso 2: convergencia método lineal según elementos.....	A2.10
Figura A.2-19 Caso 2: convergencia método cuadrático según nodos	A2.11

Figura A.2-20 Caso 2: convergencia método cuadrático según elementos.....	A2.11
Figura A.2-21 Caso 2: convergencia método sección según nodos	A2.11
Figura A.2-22 Caso 2: convergencia método sección según elementos	A2.12
Figura A.2-23 Caso 2: comparación de error según nodos	A2.12
Figura A.2-24 Caso 2: comparación de error según elementos.....	A2.12
Figura A.2-25 Caso 3: viga biapoyada con carga puntual central.....	A2.14
Figura A.2-26 Caso 3: variables introducidas en MEFI A	2.14
Figura A.2-27 Caso 3: representación gráfica en MEFI.....	A2.15
Figura A.2-28 Caso 3: solución mediante MEFI.....	A2.15
Figura A.2-29 Caso 3: convergencia método lineal según nodos	A2.15
Figura A.2-30 Caso 3: convergencia método lineal según elementos.....	A2.15
Figura A.2-31 Caso 3: convergencia método cuadrático según nodos	A2.16
Figura A.2-32 Caso 3: convergencia método cuadrático según elementos.....	A2.16
Figura A.2-33 Caso 3: convergencia método sección según nodos	A2.16
Figura A.2-34 Caso 3: convergencia método sección según elementos	A2.17
Figura A.2-35 Caso 3: comparación de error según nodos	A2.17
Figura A.2-36 Caso 3: comparación de error según elementos.....	A2.17

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Exocoches.....	1
1.1.1	¿Qué son?	1
1.1.2	Afición y problemas relacionados	3
1.2	Objetivo y alcance	4
1.3	Contexto	4
1.4	Metodología.....	5
2	Selección de herramientas	6
2.1	Selección de criterio	6
2.2	Selección de material.....	7
2.3	Selección del método de cálculo	7
2.4	Selección del método de elementos finitos.....	9
2.4.1	Solución analítica	10
2.4.2	Solución mediante MEFI.....	10
2.4.3	Método de tetraedros lineales	10
2.4.4	Método de tetraedros cuadráticos	10
2.4.5	Método de la sección	11
2.5	Coeficiente de seguridad	12
3	Diseño de la estructura	14
3.1	Prediseño	14
3.1.1	Análisis según la deformación recibida.....	15
3.1.2	Análisis según los esfuerzos recibidos	15
3.1.3	Valoración del diseño	16
3.2	Iteración número 1	17
3.2.1	Análisis según la deformación recibida.....	17
3.2.2	Análisis según los esfuerzos recibidos	17
3.2.3	Valoración del diseño	18
3.3	Iteración número 2.....	18
3.3.1	Análisis según la deformación recibida.....	18
3.3.2	Análisis según los esfuerzos recibidos	18
3.3.3	Valoración del diseño	19
3.4	Iteración número 3.....	19
3.4.1	Análisis según la deformación recibida.....	19
3.4.2	Análisis según los esfuerzos recibidos	20

3.4.3	Valoración del diseño	20
3.5	Análisis de frecuencias modales.....	21
4	Guía rápida para el análisis de una estructura	23
4.1	Creación mediante software de diseño	23
4.2	Adaptación de la estructura	25
4.3	Análisis estático de la estructura	27
4.4	Análisis de frecuencias modales.....	31
5	Experiencias, objetivos y valoración final.....	35
5.1	Incidencias, experiencia conseguida y problemas encontrados.....	35
5.2	Cumplimiento de objetivos, mejoras, continuación y aplicación.....	35
5.3	Conclusiones y valoración final	36
6	Referencias y bibliografía.....	37
6.1	Lista de referencias	37
6.2	Bibliografía adicional	37
Anexos.....		1
Anexo 1: Información tabulada de pesos y esfuerzos externos.....		1
Anexo 2: Estudio de divergencia de los distintos métodos: casos		1
Caso 1: viga biapoyada con carga distribuida lineal		1
	Solución analítica	1
	Solución mediante MEFI.....	2
	Solución mediante simulación.....	4
	Comparación de error	7
	Tabla-resumen de los valores del caso 1	8
Caso 2: viga biempotrada con carga distribuida lineal.....		9
	Solución analítica mediante MEFI	9
	Solución mediante simulación.....	10
	Comparación de error	12
	Tabla-resumen de los valores del caso 2	13
Caso 3: viga biapoyada con carga puntual en el punto medio.....		14
	Solución analítica mediante MEFI	14
	Solución mediante simulación.....	15
	Comparación de error	17
	Tabla-resumen de los valores del caso	18
Anexo 3: Propiedades químicas de los aceros estudiados.....		1

1 Introducción

1.1 Exocoche

1.1.1 ¿Qué son?

Antes de comenzar, es necesario conocer una definición más amplia de lo que es un exocoche o automóvil exoesqueleto, visible en la figura 1.1-1. ‘Un automóvil exoesqueleto tiene un marco externo visible, hecho de tubos de acero, aluminio o fibra de carbono. (...) Estructuralmente, un chasis de exoesqueleto está a medio camino entre un chasis independiente y un chasis de estructura espacial. En su forma más simple, consta de dos chasis independientes, uno encima del otro. El chasis independiente clásico es rígido contra las fuerzas laterales, pero débil contra las fuerzas de flexión vertical. El uso de tubos emparejados, separados verticalmente, hace que el chasis sea mucho más rígido en esta dirección. Sin embargo, a diferencia de una estructura espacial, las fuerzas principales actúan como cargas de flexión sobre estos tubos, en lugar de las fuerzas puras de tensión o compresión de la verdadera estructura espacial.’ [1] Este tipo de vehículos se suele usar en actividades recreativas, ya que no cuenta con las comodidades habituales



Figura 1.1-2

como para ser usado a diario y cuenta con un alto grado de especialización en el campo de uso que se le da, ya sea en circular en terrenos abruptos o conseguir el mejor tiempo



Figura 1.1-1

dentro de un circuito. Se puede diferenciar en tres tipos distintos dependiendo del uso que se aplique al vehículo.

El primer tipo es conocido como Sandrail. Como su propio nombre indica, su uso es mayoritariamente en dunas de arena, aunque tiene capacidad para más terrenos. Las características principales de este vehículo respecto a los otros es la falta de paneles, una disposición del motor trasera o central y en ocasiones pueden contar con ruedas del mundo agrícola para mejorar la tracción. Ejemplo en la figura 1.1-2. En España se pueden encontrar este tipo de vehículos en el Campeonato de España de AutoCross, modalidad que va ganando adeptos cada año [2].



Figura 1.1-3

El segundo tipo son los buggies, que su uso principal es fuera de carretera. Se distinguen del primer tipo porque están especializados en circular en cualquier terreno, cuentan con ruedas específicas para terrenos irregulares, además de con mayor altura libre al suelo para salvar obstáculos y suelen contar con mayor número de paneles para proteger a los pasajeros del entorno. Ejemplo en la figura 1.1-3.

El último tipo es el de los exocoche deportivos o, simplemente exocoche. Su principal uso es en circuito. Pueden ser tanto vehículos creados desde cero como adaptaciones de vehículos existentes. Mantienen la disposición del vehículo donante y en ocasiones cuentan con paneles para mejorar la aerodinámica. Es la clase en la que se centra el desarrollo. Ejemplo en la figura 1.1-4.



Figura 1.1-4

1.1.2 Afición y problemas relacionados

Aunque se pueden encontrar planos tan pronto como 1940 [3] la popularización de este tipo de vehículos en su forma deportiva ocurre durante los 2000, con empresas como Ariel Motor Company y su modelo Atom. [4] A finales de la década de 2010 y principios de 2020 se volvieron a popularizar, esta vez utilizando donantes como alternativa de bajo coste y alto rendimiento. Al utilizar vehículos ya existentes, las modificaciones pueden no ser adecuadas y resultar en accidentes fatales [5], como se muestra en la figura 1.1-5.



Figura 1.1-5

La mayoría de los exocoche son para una sola persona, existiendo algún coche biplaza y hasta un modelo con 3 asientos. A su vez, dentro de Europa, la mayor concentración de fabricantes de este tipo de vehículos se encuentra en Reino Unido, donde se puede encontrar Caterham [6], Ariel Motor Company [7], DJC Sportcars [8]... donde todos estos vehículos pueden estar matriculados, como es el caso de las figuras 1.1-6 y 1.1-7.



Figura 1.1-6

Mientras que en el continente es mucho más común encontrar kits para vehículos donantes, es decir, utilizar un vehículo ya existente y modificarlo cambiando su chasis original por la estructura tubular, como es el caso de K1-Attack [9]. También hay versiones de los coches encontrados en Inglaterra con modificaciones para poder matricularlos, como ofrece la empresa RCB7[10]. Sin embargo, dentro del continente no

hay ninguna empresa que ofrezca un modelo genuino de exocoche con capacidad para 4 personas.



Figura 1.1-7

1.2 Objetivo y alcance

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado, a partir de ahora TFG, es generar un documento metodológico con pautas para la elaboración de forma adecuada y pedagógica del chasis de un vehículo tubular. Como sujeto del TFG, se utiliza un chasis con capacidad para 4 plazas, ya que ningún vehículo de chasis tubular cuenta con estas características. Este chasis va a ser utilizado como ejemplo concreto de desarrollo, ya que ayuda a la comprensión del proceso. El problema que se quiere abordar es el de la falta de conocimientos y rigurosidad a la hora de fabricar un exocoche, lo que conlleva fallos de diseño críticos que hacen peligrar la vida de los usuarios. El resultado final pretende ser una guía que, combinada con la reglamentación de cuerpos oficiales del mundo del automovilismo, sea suficiente para realizar una primera iteración física de la estructura de un vehículo destinado a los circuitos.

1.3 Contexto

Este TFG se apoya principalmente en el análisis mediante elementos finitos, aunque también se recogen conceptos sobre materiales y estructuras. Ha surgido por iniciativa propia, ya que en los últimos años he descubierto el mundo de los exocoche por distintas vías, tanto observando una serie de vídeos en los que se muestra la creación de un vehículo de este tipo de forma artesanal [11], como documentales al respecto, del incremento de la popularidad de vehículos a los que se les había retirado el chasis y sustituido por una jaula de seguridad para obtener rendimientos semejantes a los de automóviles deportivos. La característica que más atractiva me parece de este tipo de vehículos no está relacionada con su rendimiento en los circuitos, sino con las capacidades que tiene el vehículo respecto a ecología: se reduce notablemente el uso de metal en elementos estructurales, en más de 200 kg respecto a vehículos de proporciones similares[12], por lo que se consiguen reducir las emisiones durante el proceso de fabricación del automóvil, además, al reducir el peso total, se consigue un menor consumo durante toda la vida útil del vehículo, poniendo por ejemplo la reducción de peso anterior, que se encontraría en torno al 13%, podría suponer una ganancia de eficiencia de entre el 5 y el 8% [13].

1.4 Metodología

Para concluir la introducción, se presentan los bloques en los que se divide el TFG:

- En el capítulo 2, ‘Selección de herramientas’ se obtienen los parámetros de las fuerzas que se van a utilizar para diseñar la estructura, el material más adecuado para la estructura y el método más eficaz para el cálculo de esta estructura en particular, incluyendo programas a utilizar y tipo de método de elementos finitos.
- En el capítulo 3, ‘Diseño de la estructura’ se realiza una primera estructura con las pautas elegidas y después se analiza dicha estructura con las herramientas del apartado anterior. En caso de necesitarse, ya sea por no cumplir o cumplir holgadamente con los requisitos, se realizan iteraciones sobre el diseño. En cada iteración que se realice se justifican los cambios realizados. Sobre la última iteración se realiza un análisis de frecuencias modales para obtener la respuesta ante vibraciones.
- En el capítulo 4, ‘Guía rápida para el análisis de una estructura’ se propone un tutorial que sirva para componer una estructura mediante el uso del programa Solid Edge. Se explica como transformar la estructura con los editores del paquete de programas ANSYS para, finalmente, poder realizar un análisis estructural y modal.
- En el capítulo 5, ‘Experiencias, objetivos y valoración final’ se explican los eventos más importantes que han tenido lugar durante el desarrollo del trabajo, el cumplimiento de los objetivos propuestos, posibles procedimientos alternativos o futuros y una conclusión sobre la totalidad del trabajo.
- En el capítulo 6, ‘Referencias y bibliografía’ se incluyen los recursos bibliográficos utilizados para la generación de la memoria.
- En el anexo 1 ‘Información tabulada de pesos y esfuerzos externos’ se detalla el peso de los componentes utilizados y los esfuerzos aplicados a cada iteración del análisis.
- En el anexo 2 ‘Estudio de divergencia de los distintos métodos: casos’ se abordan con detalle los casos estudiados para obtener la fiabilidad del método utilizado. Se incluye una comparación de los errores en cada caso y sus respectivas tablas con todos los valores numéricos utilizados para la elaboración de las gráficas.
- En el anexo 3 ‘Propiedades químicas de los aceros estudiados’ se detallan los valores máximos de la concentración en masa admisibles por las respectivas normas para cada acero comparado.

2 Selección de herramientas

2.1 Selección de criterio

La selección del criterio es uno de los aspectos más importantes a la hora de realizar la fabricación de estructuras, ya que va a indicar los esfuerzos recibidos y otro tipo de limitaciones, en caso de que las hubiese, como puede ser el tipo de material que se debe utilizar. Por ello, el criterio no va a ser impuesto por el alumno, sino que se va a utilizar, aunque sea parcialmente, directrices de órganos oficiales en el mundo del automovilismo, como es el caso de la Federación Internacional de Automovilismo.

Por semejanza a las características físicas, este chasis se puede asemejar a una jaula de seguridad que se incorpora en vehículos de competición. Por prestaciones, el vehículo puede ser considerado de la categoría I, que recoge los grupos de automóviles N, A y B, que consisten en automóviles de producción con modificaciones para competir. Teniendo en cuenta las características del vehículo, se escoge la normativa de un año en el que se aceptan variaciones a los diseños establecidos, para poder desarrollar un diseño propio.

‘...la construcción está certificada para soportar los mínimos de tensión indicados a continuación (y aplicados simultáneamente):

- 1,5w lateral
- 5,5w longitudinal
- 7,5w vertical

Con $w = \text{peso del coche} + 75\text{kg.}$ [14, p163]

Para cumplir con las especificaciones anteriores, se calcula el peso de todos los componentes del vehículo, recogido en el anexo 1 y se obtienen las fuerzas totales que se van a aplicar sobre el chasis. Para obtener la fuerza distribuida, se miden las longitudes de cada barra a la que se va a aplicar fuerza. Se aplican las fuerzas distribuidas sobre las barras correspondientes, todas a la vez, tal y como se muestra en la figura 2.1-1.

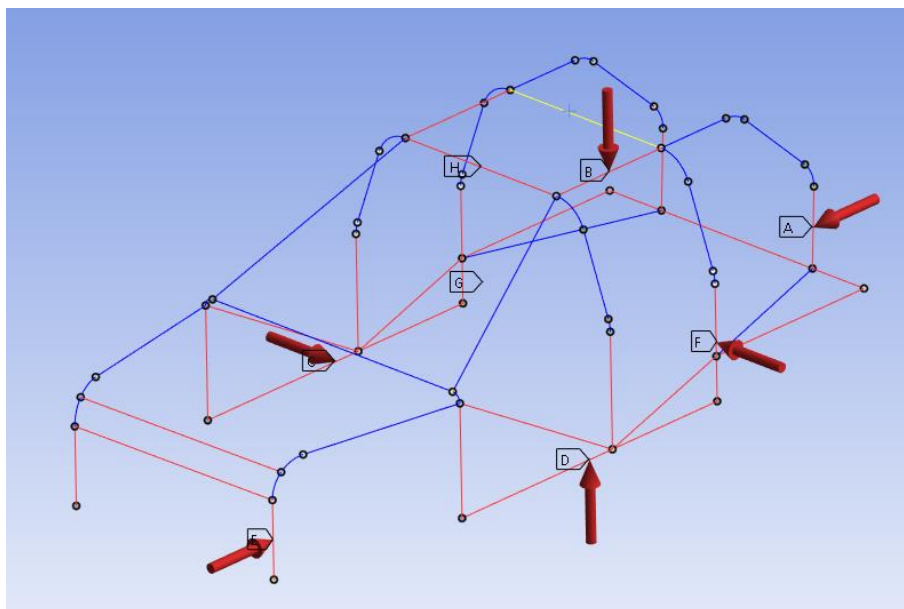


Figura 2.1-1

No solo debe soportar las fuerzas, sino que debe resistirlas, por lo que, para este TFG, se supone que resistir las fuerzas sea no causar cambios por lo que se decide trabajar dentro del límite elástico del material seleccionado. Para analizar las secciones, que están sometidas a flexión compuesta, se utiliza la fórmula general 2.1-1:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} - \frac{M_z \cdot I_y + M_y \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \cdot y + \frac{M_y \cdot I_z + M_z \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \cdot z \quad (2.1-1)$$

Que se puede simplificar en las expresiones 2.1-2 y 2.1-3:

$$\sigma_{x,m\acute{a}x} = \sigma_{axil} + \sigma_{momentoFlector,m\acute{a}x} \quad (2.1-2)$$

$$\sigma_{x,min} = \sigma_{axil} + \sigma_{momentoFlector,min} \quad (2.1-3)$$

Donde σ_{axil} es la tensi3n provocada por el esfuerzo axil y $\sigma_{momentoFlector,m\acute{a}x}$ y $\sigma_{momentoFlector,min}$ es la tensi3n provocada por los componentes de flexi3n en los puntos m\acute{a}ximo y m\acute{in}imo de la secci3n, respectivamente.

2.2 Selecci3n de material

Se toma la decisi3n de utilizar un \acute{u}nico material para todo el chasis para facilitar el dise\~no y minimizar al m\acute{a}ximo el error humano. Para el material se sigue el mismo comportamiento que para la elecci3n de los criterios, estando en el mismo art\cdulo recogidas las caracterfsticas que deben presentar los perfiles de acero de la estructura. Se necesita una resistencia elevada y un buen \cdndice de soldabilidad. Se comparan los aceros m\acute{a}s usados para hacer jaulas de seguridad que son 15CDV6, T45, 4130 y 25CRMO4 y se escoge el que tenga mejor soldabilidad [14]. El criterio utilizado es el carbono equivalente propuesto por el Instituto Internacional de Soldadura [15], aplicado sobre el peor escenario posible, donde los elementos aleados est\cdn en su concentraci3n m\acute{a}xima. Los resultados de carbono equivalente se muestran en las f3rmulas 2.2-1 a 2.2-5.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (2.2-1)$$

$$CE_{15CDV6} = 0,18 + \frac{1,1}{6} + \frac{0}{15} + \frac{1,5 + 1 + 0,3}{5} = 0,9233 \quad (2.2-2)$$

$$CE_{T45} = 0,25 + \frac{1,7}{6} + \frac{0 + 0,4}{15} + \frac{0,25 + 0,1 + 0}{5} = 0,63 \quad (2.2-3)$$

$$CE_{4130} = 0,33 + \frac{0,6}{6} + \frac{0,35 + 0,25}{15} + \frac{1,1 + 0,25 + 0}{5} = 0,74 \quad (2.2-4)$$

$$CE_{25CRMO4} = 0,29 + \frac{0,9}{6} + \frac{0}{15} + \frac{1,2 + 0,3 + 0}{5} = 0,74 \quad (2.2-5)$$

El material elegido para el chasis es el acero de alta resistencia y baja aleaci3n T45. Las propiedades mec\cdnicas del acero T45 son un l\cdmite el\cdstico de 620 MPa y una elongaci3n m\acute{in}ima garantizada por el fabricante del 15%. [16]

2.3 Selecci3n del m\cdtodo de c\cdlculo

A la hora de resolver un problema estructural como este, es tan importante saber la estructura que se quiere resolver como la herramienta que se va a utilizar para resolverla.

A continuación, se enumera un listado de opciones y programas con los que se han trabajado durante el desarrollo del grado y/o se usan ampliamente a nivel profesional, cada uno con sus ventajas y desventajas.

Forma manual

El método de resolución manual consiste en plantear tanto el equilibrio estático como el análisis de nodos modales analógicamente, es decir con papel y bolígrafo, con los conocimientos y procedimientos aprendidos durante todo el desarrollo del grado.

La ventaja principal de este método es el control total que se tiene sobre todo el proceso. Se puede elegir cada uno de los parámetros y se tiene acceso a variables que en otros métodos serían internas y no se podrían acceder. La mayor desventaja de este método es la cantidad de tiempo que se necesita, que puede llegar a ser de varios órdenes de magnitud superior respecto a los métodos más rápidos. Este inconveniente se desdobra en dos consecuencias. La primera es que, al realizar modificaciones, el proceso se vuelve más tedioso e innecesariamente lento. La segunda, la cual es más influyente, es que al ser un proceso que necesitaría de tantas horas de mano de obra se hace inviable tanto económicamente como para aplicar posteriormente lo aprendido al mundo laboral.

SolidEdge

SolidEdge es un software de diseño creado por Siemens especializado en CAD 3D. Aunque sea un programa cuyo principal fin es el diseño de piezas, cuenta con módulos tanto de elementos finitos como de análisis de frecuencias modales.

La principal ventaja de este método es que los módulos de análisis están incorporados en el programa de diseño, por lo que la compatibilidad del modelo a la hora de realizar los análisis es total. También cabe destacar que las modificaciones entre las distintas iteraciones se pueden realizar dentro del mismo programa con gran facilidad, agilizando drásticamente el proceso. Además, se ha trabajado en varias ocasiones con este programa durante el curso, con especial énfasis en la parte de diseño. La principal desventaja que se encuentra con este método es que la potencia de los módulos de análisis de esfuerzo y modal es limitada, lo cual afecta a la exactitud de la solución. Otra desventaja se debe a que, al no ser un producto especializado en análisis, está simplificado y es muy limitado en las opciones respectivas a la simulación, como, por ejemplo, el tamaño de los elementos del mallado, por lo que se tiene poco control sobre los parámetros de simulación.

MEFI

Este programa, también conocido como Método de Elementos Finitos en Ingeniería, ha sido desarrollado por el Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cartagena.

La principal ventaja de este programa es su facilidad de uso que, combinada con haber sido utilizada anteriormente en el grado, supone un aprovechamiento máximo del tiempo durante su uso. Las principales desventajas que imposibilitan su uso son dos. Primero, esta aplicación está destinada al análisis de figuras planas, por lo que tendría que estudiarse una versión del chasis adaptada a dos dimensiones, con las consecuencias, imprecisiones y limitaciones de diseño que implique la adaptación. La segunda desventaja es que está destinado única y exclusivamente al uso de análisis estático, por lo que no cuenta con un apartado o extensión para analizar la respuesta frente a frecuencias modales.

Abaqus

El programa Abaqus es la herramienta especializada de análisis por elementos finitos desarrollada por la empresa Dassault Systèmes. Existen diferentes ventajas a la hora de utilizar esta herramienta. La primera es que este programa ha sido utilizado de forma extensa con anterioridad en el grado, por lo que además de los conocimientos, se cuenta con los tutoriales proporcionados. La segunda es que, al ser ampliamente utilizado, cuenta con tutoriales y guías. La principal desventaja con la que cuenta esta opción es que la licencia estudiantil está limitada a 1000 elementos o nodos, la cual se podría suplir con una licencia profesional, pero utilizar una licencia de pago supone que la guía pierde alca y es más difícil poder obtener las herramientas necesarias para seguirla, aunque se intente realizar la guía de forma genérica para poder seguirse con la mayoría de las alternativas.

ANSYS

Es uno de los paquetes de elementos finitos más utilizados, ya que cuenta con diversos módulos, cada uno con una función propia, como puede ser análisis estático, aerodinámico, eléctrico... La principal ventaja con la que cuenta este paquete de programas es la versatilidad, ya que cuenta con un módulo para cada necesidad del trabajo, varios entornos con los que crear las piezas, también acepta piezas realizadas en programas de diseño. Otra ventaja con la que cuenta este paquete es que, al ser tan ampliamente utilizado en el ámbito laboral, cuenta con un gran número de tutoriales y guías en línea para poder aprender. Respecto a la licencia estudiantil, ofrece un mayor margen que otros programas especializados, ya que cuenta con un límite de 128.000 nodos y/o elementos, el cual es suficientemente amplio como para poder realizar una simulación precisa del chasis que se quiere estudiar. La principal desventaja con la que cuenta este programa es que no ha sido usado durante el desarrollo del grado, por lo que puede resultar desconocido y confuso a la hora de usarse.

El método que se decide usar para la realización de este TFG es un conjunto de varios programas anteriormente mencionados, favoreciendo la precisión. Para el diseño del chasis se utiliza un programa propio de diseño, SolidEdge, debido a que, en las herramientas de análisis, el apartado de diseño no está lo suficientemente implementado como para utilizarse con comodidad y rapidez en diseños complejos. Respecto a los análisis, se decide utilizar el paquete ANSYS, ya que es la única alternativa que permite realizar un diseño tridimensional con un mallado lo suficientemente fino como para que los resultados sean significativos. La utilización de varios programas genera un inconveniente, el cual se ha tenido en cuenta a la hora de elegir el método, que consiste en la compatibilidad parcial de las piezas para ser analizadas, con errores que pueden incluir discrepancias de pesos y la no lectura de ciertas operaciones de diseño.

2.4 Selección del método de elementos finitos

Para la simulación mediante el Método de Elementos Finitos, el factor limitante que hay que tener en cuenta es la licencia del programa. El paquete *Mechanical* de ANSYS cuenta con una licencia de estudiante de hasta 128.000 nodos o 128.000 elementos, el límite que se alcance antes. Por ello, es imprescindible utilizar un método que converja pronto, para obtener la mejor aproximación manteniéndose la simulación por debajo del límite. En este apartado se va a estudiar la convergencia mediante el refinamiento H de 2 geometrías de elementos distintas y se va a comparar el refinamiento P en una de ellas. Este proceso se va a llevar a cabo en varios casos sencillos, cuya solución analítica se puede obtener.

Todos los casos tienen en común la misma barra, cambiando los apoyos y las fuerzas externas que sufre la barra.

2.4.1 Solución analítica

Se empieza con la fórmula genérica para el desplazamiento máximo de una viga simple biapoyada sometida a una carga uniforme en todo el vano, figura 4.4-1.

$$u_y \left(x = \frac{L}{2} \right) = -\frac{5qL^4}{384EI} = u_{ymáx} \quad (2.4-1)$$

Sustituyendo el momento de inercia, la carga y el módulo de Young de la ecuación 4.4-2 se obtiene la flecha máxima teórica en la ecuación 4.4-3:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{0,05 \cdot 0,1^3}{12} = 4,1667 \cdot 10^{-6} m^4 \quad (2.4-2)$$

$$u_{ymáx} = \frac{5 \cdot 25 \cdot 2^4}{384 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 4,1667 \cdot 10^{-6}} = 6,25 \cdot 10^{-6} m \quad (2.4-3)$$

2.4.2 Solución mediante MEFI

Para obtener un método más efectivo para el cálculo de la solución analítica, se calcula también mediante el uso del programa MEFI. Esta solución es la misma, por lo que se utiliza para comparar en los próximos casos.

2.4.3 Método de tetraedros lineales

El primer método para analizar es el método de tetraedros lineales, ya que es el más sencillo de implementar. El estudio realizado sobre este método es el refinamiento h, que consiste en reducir el tamaño de los elementos. Con cada malla se obtiene la flecha máxima respecto al número de elementos y al número de nodos.

Se puede observar en las figuras A.2-4, A.2-5, A.2-15, A.2-16, A.2-27 y A.2-28, que en torno a 100 elementos o 100 nodos el valor de las aproximaciones se distorsiona, esto es debido al bajo número de elementos. Respecto a la convergencia, poco se puede decir ya que no se alcanza en el dominio de la gráfica, y, en caso de alcanzarla, sería con un número de elementos mayor de los permitidos por la licencia, por lo que no es un método apropiado para utilizar en este TFG.

La diferencia entre el número de elementos y el número de nodos indica que se podría aplicar el refinamiento p para conseguir una mejor aproximación, consistente en aumentar el grado del polinomio de las funciones de aproximación.

2.4.4 Método de tetraedros cuadráticos

Este método sigue basándose en la misma geometría que el anterior, en los tetraedros, pero con una mejora en la que el contorno de estos queda definido con un mayor número de puntos. El estudio realizado consiste en seguir los mismos pasos que el anterior.

La primera ventaja que se obtiene al aplicar este método consiste en poder formar mallas con un número de elementos menor. La segunda ventaja es que tener un número de elementos pequeños genera resultados con mayor consistencia. La tercera ventaja y más importante es que con este método se obtiene convergencia y, además, es conforme.

2.4.5 Método de la sección

El método beam, traducido al español sería método viga o método de la sección, consiste en utilizar el perfil del elemento a estudiar como geometría del método de elementos finitos. Esto reduce las dimensiones del problema y, en los problemas que se puede aplicar, reduce la potencia de cómputo para hallar la solución. El estudio realizado es el mismo que en los dos casos anteriores.

La primera ventaja que se obtiene al aplicar este método consiste en poder formar mallas con un número de elementos menor. La segunda ventaja es que tener un número de elementos pequeños no hace inconsistentes los resultados. La tercera ventaja y más importante es que con este método se obtiene convergencia y, además, es conforme.

Las ventajas que se obtienen mediante este método son las mismas que mediante el método de tetraedros cuadrados, por lo que se procede a hacer una comparación de los 3 métodos.

Caso 1: viga biapoyada con carga distribuida lineal, figura 2.4-1:

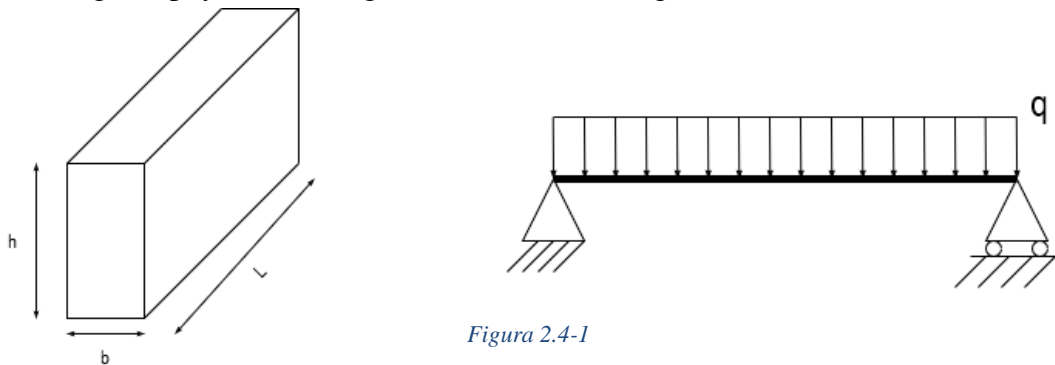


Figura 2.4-1

Con

$$b = 50\text{mm} ; h = 100\text{mm} ; L = 2000\text{mm} ; q = 25\text{N/m}$$

Caso 2: viga biempotrada con carga distribuida lineal, figura 2.4-2:

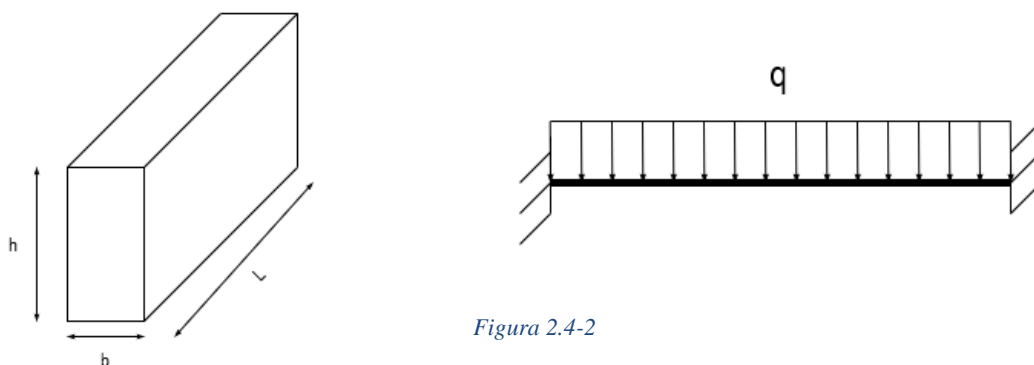


Figura 2.4-2

Con

$$b = 50\text{mm} ; h = 100\text{mm} ; L = 2000\text{mm} ; q = 25\text{N/m}$$

Caso 3: viga biapoyada con carga puntual en el punto medio, figura 2.4-3:

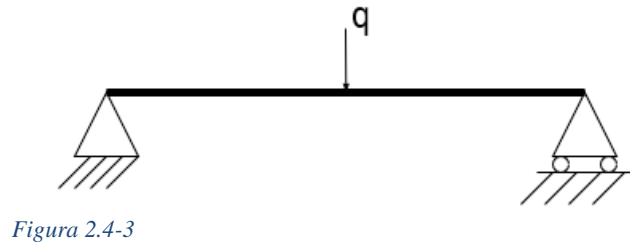
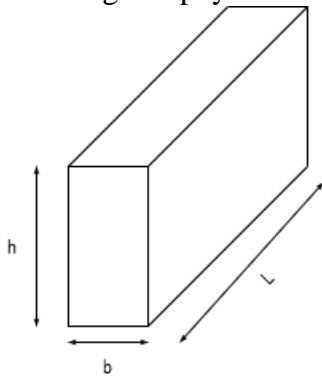


Figura 2.4-3

Con

$$b = 50\text{mm} ; h = 100\text{mm} ; L = 2000\text{mm} ; q = 500\text{N}$$

Al comparar los métodos, la primera conclusión es descartar el método de tetraedros lineales, ya que en los casos 1 y 2 no consigue llegar a un número suficiente de elementos y nodos como para converger. También se descarta por la inconsistencia mostrada cuando hay un número de elementos reducido. De los dos métodos restantes, el método que se descarta es el de los tetraedros cuadráticos, ya que hay un orden de magnitud entero entre tetraedros cuadráticos y beam en conseguir un error semejante observable en los casos 1 y 2. El método beam muestra su peor resultado en el caso 3, en el que los resultados son comparables a los otros dos métodos.

En el caso 3 los resultados no serían pertinentes para obtener una solución al ejercicio ya que el error es muy elevado. Este error, en el caso del método de la sección, es provocado por un nodo extra para la aplicación de la fuerza, lo que crea una rigidización en la simulación. Es debido al tipo de carga. En los casos 1 y 2, la diferencia de la solución de la simulación con la solución analítica es debida a los efectos del cortante.

Por las características del problema y de las fuerzas, el método de la sección es adecuado y es el más acertado de usar entre los 3 métodos estudiados.

Los análisis extendidos, con todas las gráficas y datos obtenidos, se encuentran en el anexo 2.

2.5 Coeficiente de seguridad

De los 3 casos desarrollados en el anexo 1 se puede observar que las soluciones obtenidas, aunque cuentan con una gran aproximación, no son del todo exactas. Si se contemplan los casos 1 y 2, se observa que aportan una información más aproximada al modelo, ya que las uniones entre barras no son totalmente rígidas, pero tienen cierta libertad, localizándose en un entorno entre el caso 1 y el caso 2. Por lo tanto, para obtener un coeficiente de seguridad para la simulación, hay que basarse en los errores de estos dos casos. Los coeficientes que se obtendrían de cada caso seguirían la fórmula 2.5-1, siendo el error el correspondiente a cada caso en su asíntota horizontal.

$$F_s = 1 + \|\text{error}_\%\| \tag{2.5-1}$$

Para el caso 1, el coeficiente de seguridad queda según la fórmula 2.5-2:

$$F_{scaso1} = 1,007 \quad (2.5-2)$$

Para el caso 1, el coeficiente de seguridad queda según la fórmula 2.5-3:

$$F_{scaso1} = 1,032 \quad (2.5-3)$$

Como la diferencia entre ambos casos es el tipo de apoyo que tiene la viga en cada extremo, se podría calcular el coeficiente de distribución de los distintos nudos para saber el coeficiente con mayor exactitud, pero para simplificar y aumentar la seguridad se decide aplicar a todos los elementos el mayor coeficiente de seguridad, el cual es el del caso 1 y tiene un valor de 1,032. Esto implica que, para superar la incertidumbre provocada por el error debido al método utilizado, el coeficiente de seguridad debe de ser no inferior a 1,032. En caso de querer aumentarse la seguridad o al tener falta de precisión en las herramientas utilizadas tanto como para el análisis como para la construcción de un chasis similar, este coeficiente se puede aumentar acorde a las incertidumbres generadas por el método de trabajo. En este caso se mantiene el mínimo teórico porque el diseño de la estructura es exclusivamente teórico.

3 Diseño de la estructura

3.1 Prediseño

Para el diseño, se tienen en cuenta las características deseadas para el vehículo que. Las características que se han decidido para este vehículo son:

Para las medidas generales se utilizan valores de diseño típicos dentro de los vehículos preparados para tener dos filas de asientos, siendo 4200x1850x1500mm medidos desde los ejes de los perfiles exteriores y respecto al suelo. Con estas medidas se consigue el espacio necesario para albergar cuatro ocupantes. El diseño se basa en el tipo de chasis conocido como *hatchback* y el comienzo del chasis se supone a aproximadamente 130mm de altura. El perfil utilizado para el primer diseño es un perfil tubular de 40mm de diámetro exterior y un espesor de 2mm para la mayoría de las barras. En las barras donde se realizan un mayor número de soldaduras, que son el travesaño trasero y las barras ABC, se utilizan perfiles tubulares cuadrados huecos de 50,8mm de lado exterior y 1,6mm de grosor para tener que realizar menos operaciones de retirada de material en las barras en caso de que se realizase un chasis físico, facilitando a su vez la soldadura al realizarse entre dos superficies planas. Siguiendo todas estas pautas, el primer prediseño pesa 59,76 kg y queda según las figuras 3.1-1 y 3.1-2.

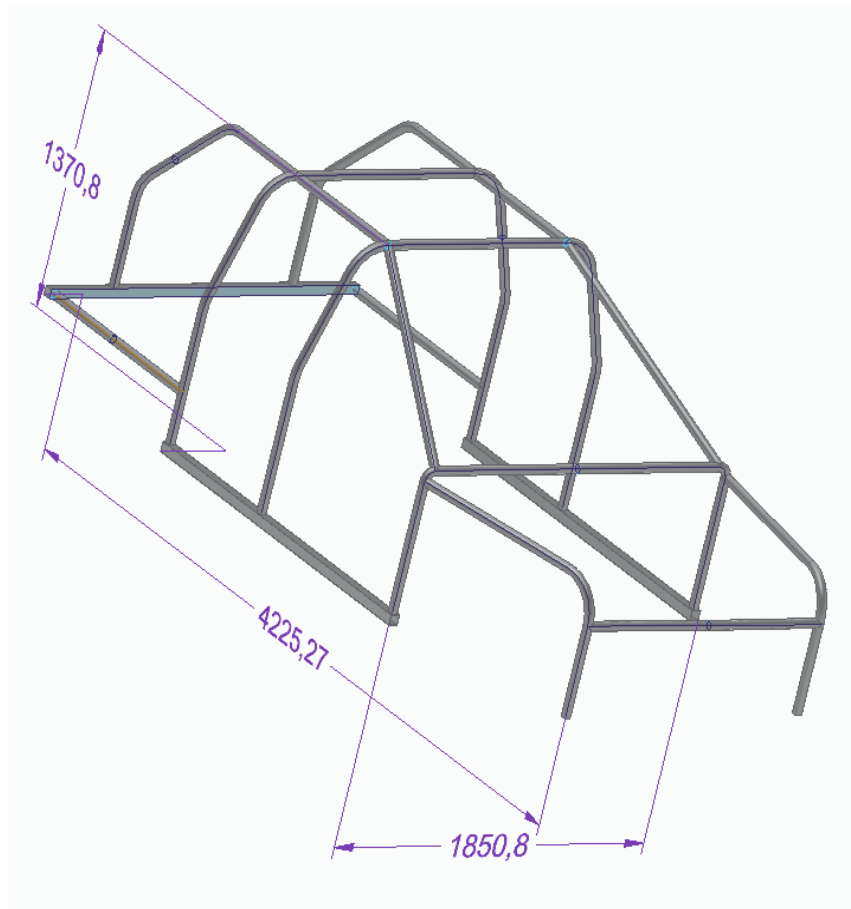


Figura 3.1-1

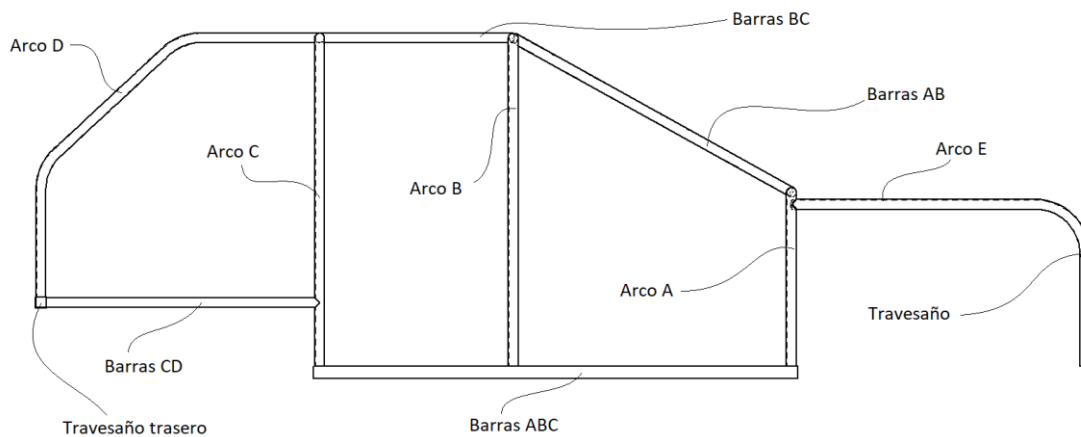


Figura 3.1-2

3.1.1 Análisis según la deformación recibida

Según la deformación sufrida apreciable en la figura 3.1-3, se puede observar que la parte correspondiente al travesaño trasero sufre un desplazamiento de 289 mm en su punto máximo que, midiendo la pieza 1800mm, conlleva un desplazamiento del 15,8%. El resto de las barras sufren deformaciones mayores a 100 mm, por lo que indica que la estructura necesita mejorar su rigidez.

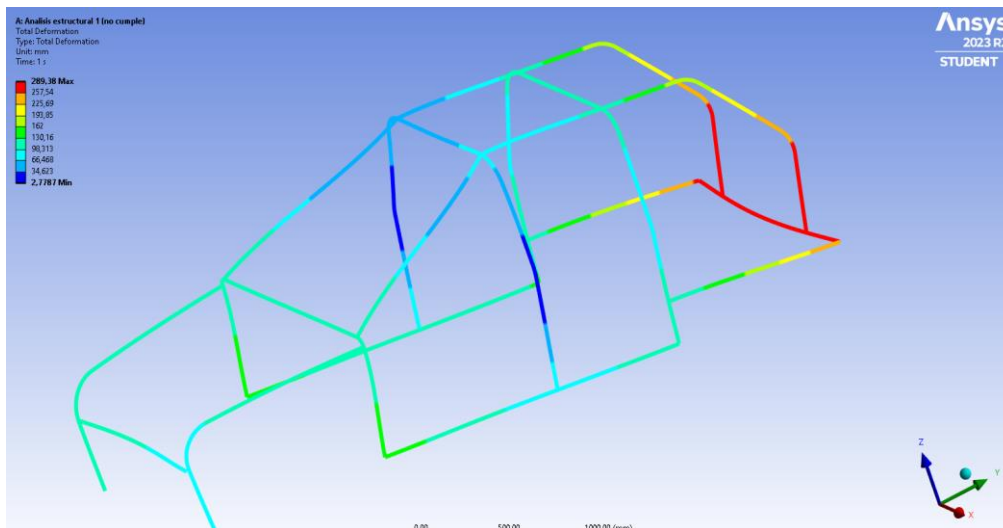


Figura 3.1-3

3.1.2 Análisis según los esfuerzos recibidos

Según los esfuerzos, se puede apreciar como en los arcos, A, B, C y E, las barras que unen todos los arcos y los travesaños, se supera la tensión máxima admisible, en el caso de algunas barras se supera en más de 2400 MPa, llegando a superar los 3000MPa, como se muestra en las figuras 3.1-4 y 3.1-5.

3.1.3 Valoración del diseño

Como conclusión, se obtiene que el diseño no es apto, ya que no cumple con la deformación ni la tensión máxima admitida, así el diseño tiene que ser reevaluado y mejorado.

Debido a que la mayoría de las barras sufren esfuerzos superiores a los admitidos, se aumenta el tamaño de perfil en todas ellas. Se tiene que sustituir el travesaño trasero por un perfil cuadrado de mayor tamaño, pero, dado que el actual es el mayor aportado por el suministrador, se sustituye por un perfil circular, siendo el perfil circular el mismo que el resto de las barras. Se añaden barras auxiliares que unen el arco E con la base del arco B. También en la base del arco B, se establecen uniones con los soportes del travesaño trasero. Cambios apreciables en la figura 3.2-1.

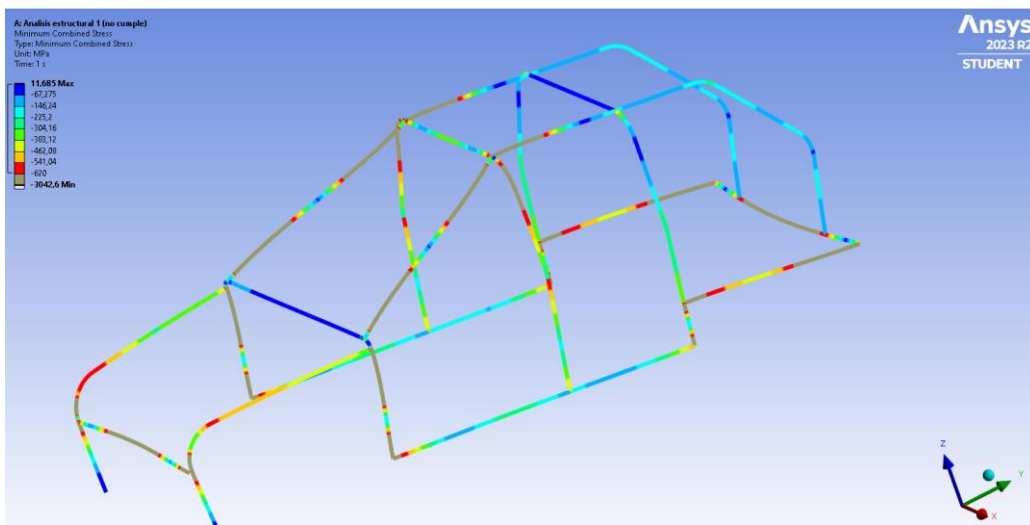


Figura 3.1-4

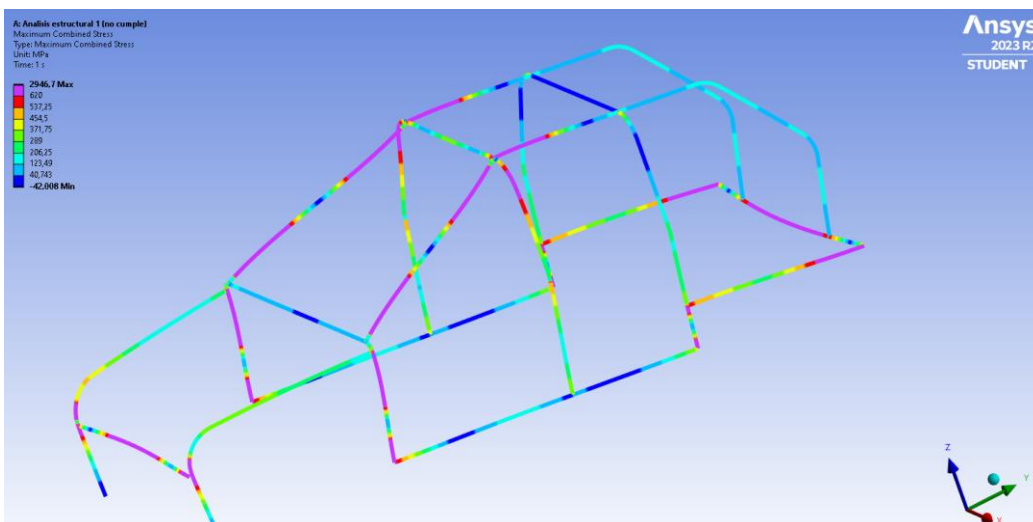


Figura 3.1-5

3.2 Iteración número 1

3.2.1 Análisis según la deformación recibida

Atendiendo a la deformación total sufrida, visible en la figura 3.2-1, se puede observar cómo se ha reducido drásticamente el desplazamiento sufrido en el travesaño trasero ya que, anteriormente era de 289mm mientras que, tras las modificaciones, el centro del travesaño solo se desplaza 93mm. Siendo esta la parte que mayor movimiento presenta del chasis.

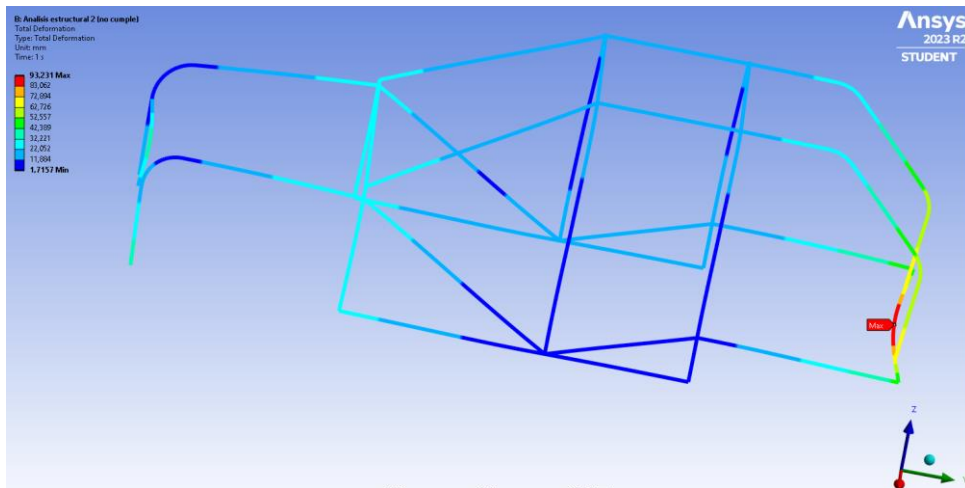


Figura 3.2-1

3.2.2 Análisis según los esfuerzos recibidos

Respecto a la tensión sufrida por la estructura, se comprueba que los cambios realizados mejoran la rigidez y comportamiento de la estructura, que se responde de forma afirmativa, ya que se distribuyen mejor los esfuerzos longitudinales de la estructura. Los siguientes elementos que sufren esfuerzos superiores al límite elástico son ambos travesaños, estando el frontal sometido a 650 MPa, que a su vez provoca un cortante de más de 1000 MPa en el arco E y el travesaño trasero que provoca los mismos efectos en los soportes del travesaño, apreciable en la figura 3.2-2.

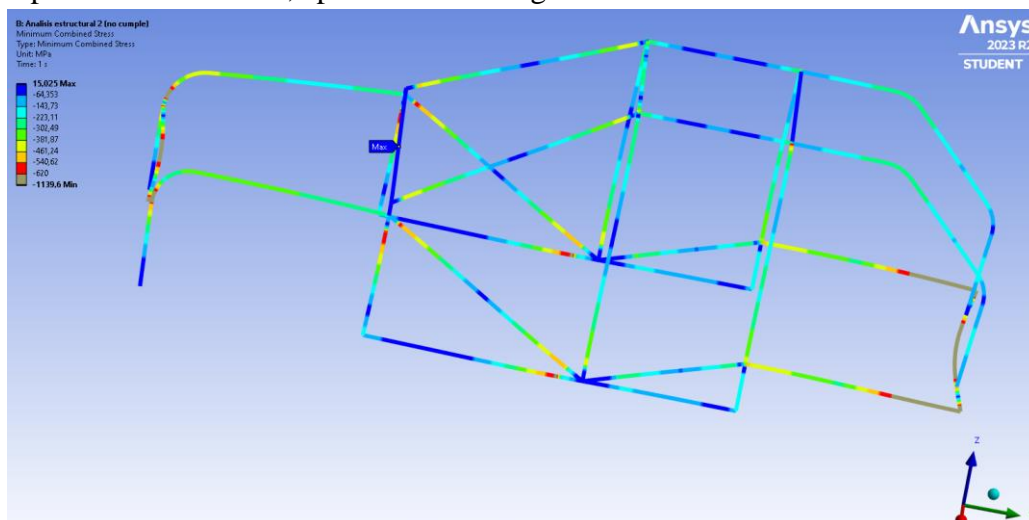


Figura 3.2-2

3.2.3 Valoración del diseño

Tras esta iteración, el chasis sigue sin cumplir con las medidas de seguridad, por lo que se realiza otra iteración para solucionar los problemas encontrados.

Debido a que, en su mayoría, las barras soportan los esfuerzos sin agotarse, se procede sin cambiar el perfil de los elementos estructurales. Respecto a los travesaños, se va a añadir un soporte extra que una el travesaño trasero con el arco C en cada lado. En el extremo frontal se va a añadir un segundo travesaño para aliviar el esfuerzo cortante, por lo que conviene que esté más próximo a las barras más horizontales del arco E.

Como las barras longitudinales entre los arcos A, B y C siguen sin cumplir el criterio, se procede a aumentar su sección, otorgando una propia a estas vigas. La sección es un tubo circular con el diámetro exterior de 60,3mm y un espesor de 5mm.

3.3 Iteración número 2

3.3.1 Análisis según la deformación recibida

Siguiendo el comportamiento apreciado en la iteración anterior, el chasis es cada vez más rígido y presenta desplazamientos menores, concentrados en sendos travesaños. El desplazamiento máximo se encuentra en el travesaño trasero y es de 26mm, como se observa en la figura 3.3-1 Este desplazamiento no supone ningún problema respecto a la seguridad estructural del chasis.

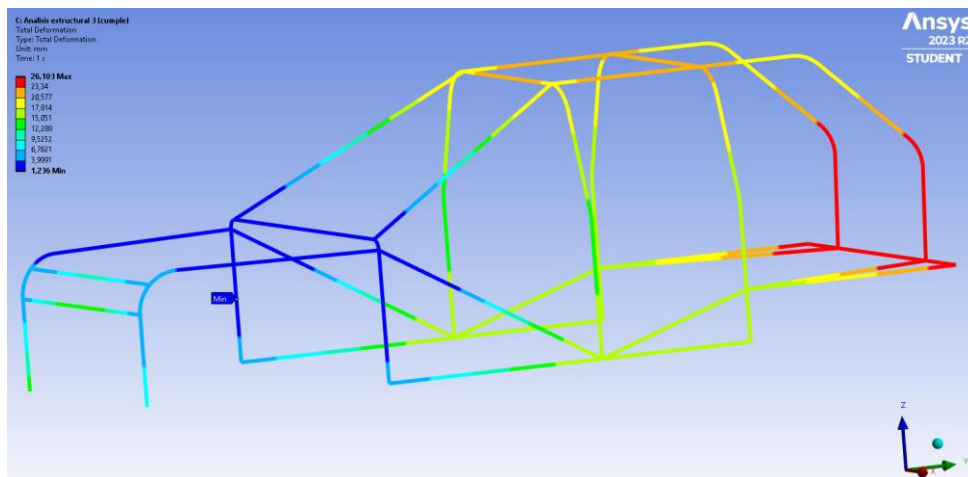


Figura 3.3-1

3.3.2 Análisis según los esfuerzos recibidos

Atendiendo a la tracción en la figura 3.3-2, obtenemos que la estructura cumple con los requisitos en todos los elementos mientras que, atendiendo a la compresión, se observa dentro de la figura 3.3-3, en los arcos E un esfuerzo de más de 600 MPa.

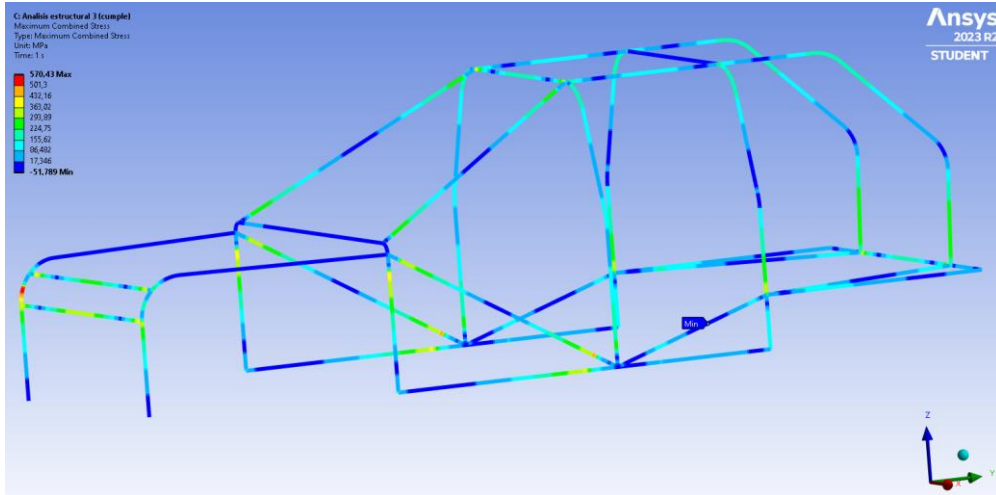


Figura 3.3-2

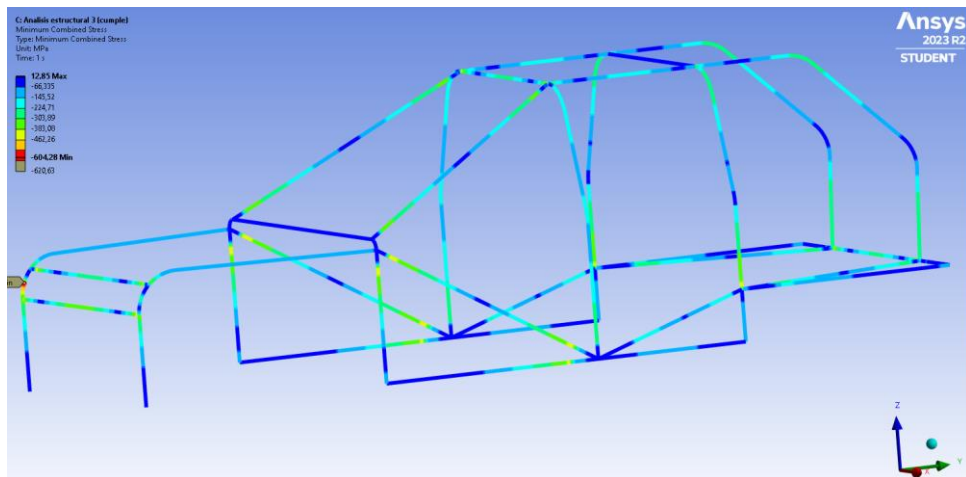


Figura 3.3-3

3.3.3 Valoración del diseño

Estas tensiones resultan en un chasis no apto, ya que obtiene un coeficiente de seguridad de 1,03. Debido a la naturaleza de la tensión obtenida, que sufre una gran variación en una distancia muy corta, se decide realizar un estudio más sin modificar los elementos del chasis, sino realizando un mallado más fino en los arcos comprendidos entre ambos travesaños. Con este estudio se busca una solución más precisa y parecida a la solución real en la zona escogida, ya que, al tener un coeficiente de seguridad inferior al deseado, el error derivado del método utilizado puede suponer un coeficiente menor a la unidad.

3.4 Iteración número 3

3.4.1 Análisis según la deformación recibida

Debido a que la zona en la que se ha cambiado el mallado está alejada de la zona de máximo desplazamiento, no se aprecia un cambio sustancial en este.

3.4.2 Análisis según los esfuerzos recibidos

En la tracción de la figura 3.4-2, se observa un decremento de unos 24 MPa, mientras que, en la compresión, en la figura 3.4-1 se observa de 41MPa, ambos en valores absoluto.

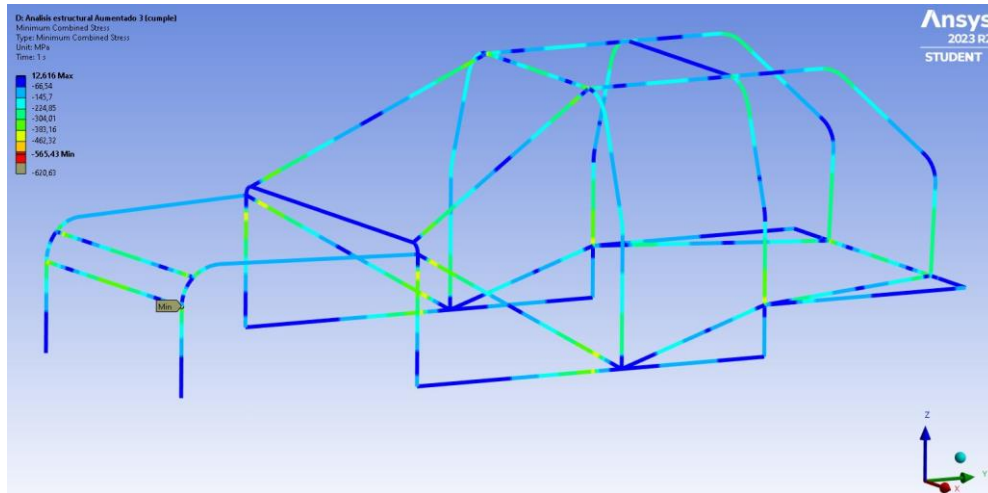


Figura 3.4-1

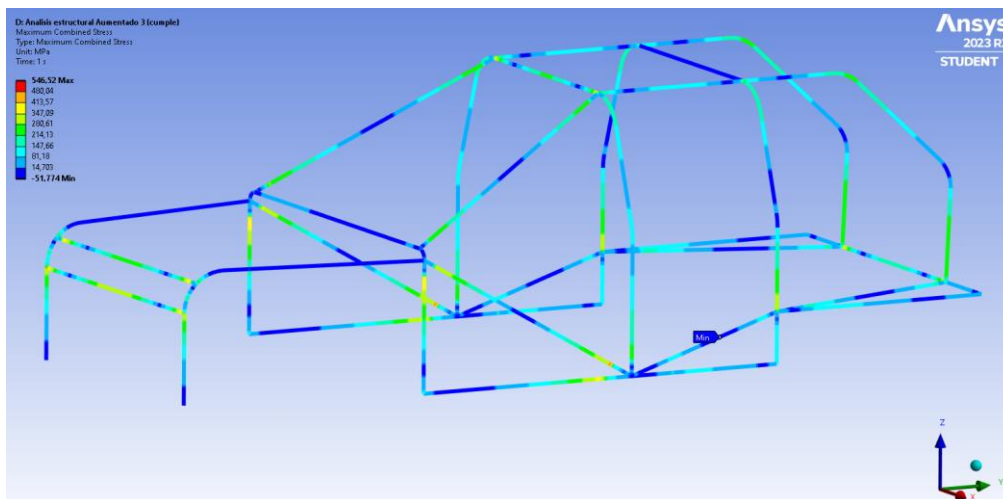


Figura 3.4-2

3.4.3 Valoración del diseño

Tras haber aumentado la precisión de la malla, se aprecia como la sección más solicitada se desplaza hasta la unión del arco E con el travesaño inferior. Este cambio de tensión, junto a un mallado más fino, sugiere que la solución es más aproximada a la solución real respecto a la iteración anterior. El coeficiente de seguridad final que se obtiene es de 1,097, el cual es superior al coeficiente mínimo deseado.

El diseño del chasis se considera apto y adecuado tras la tercera iteración, respecto al análisis de esfuerzos estáticos.

3.5 Análisis de frecuencias modales

Una vez realizado el análisis de las fuerzas es conveniente realizar un análisis de las frecuencias modales naturales del sistema, ya que si coinciden con las frecuencias que puede aportar el motor o con las frecuencias que se puedan transmitir a través de la amortiguación, se generaría un acoplamiento que haría peligrar la integridad estructural del chasis. Para realizar el análisis, se limitan todos los grados de libertad de los puntos más próximos al lugar donde estarían sujetas las columnas de suspensión, mostrados en la figura 3.5-1.

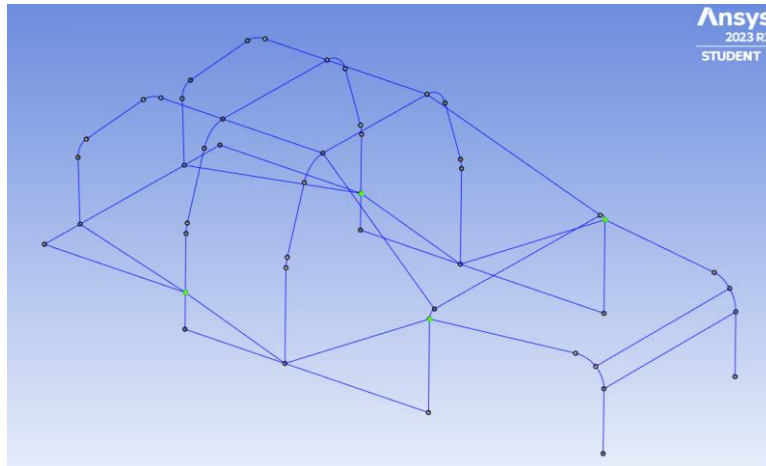


Figura 3.5-1

En la figura 3.5-2 se puede apreciar que los 6 primeros nodos modales se encuentran en frecuencias que podrían transmitirse a través de la suspensión.

Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1,	2,8854e-002
2,	0,20362
3,	0,32436
4,	0,39955
5,	0,7196
6,	1,048
7,	19,391
8,	24,625
9,	26,187
10,	31,122

Figura 3.5-2

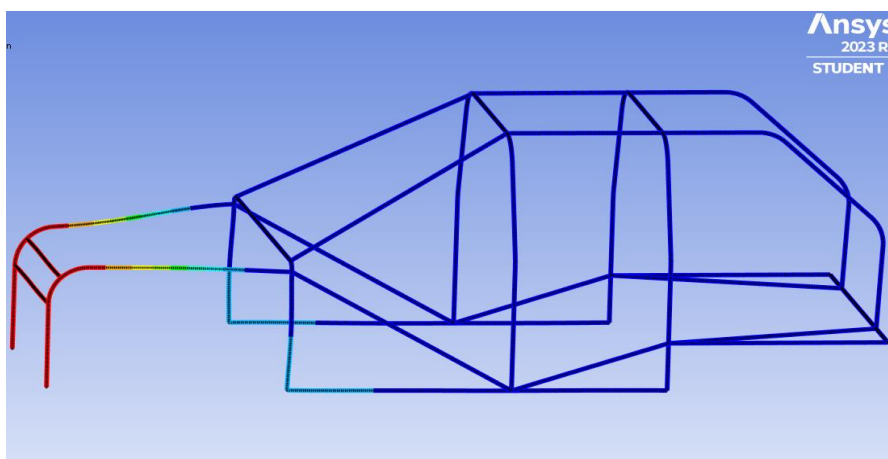


Figura 3.5-3

Tras inspeccionar los desplazamientos generados por estas frecuencias, se aprecia que la totalidad ocurre en la parte frontal del vehículo, como el ejemplo de la figura 3.5-3, por lo que, para mejorar la respuesta ante vibraciones, se decide reforzar el chasis antes de ser sometido a un nuevo análisis modal. Se modifica el chasis tal y como se muestra en la figura 3.5-4, añadiendo una unión adicional entre el arco A y el segundo travesaño frontal. Se obtienen los nodos modales dispuestos en la figura 3.5-5, los cuales se alejan de las frecuencias que puede transmitir la suspensión inferiores a 2 Hz. De esta forma el chasis ya no estaría comprometido por las vibraciones causadas por el terreno, por lo que el diseño se considera apropiado respecto al análisis modal.

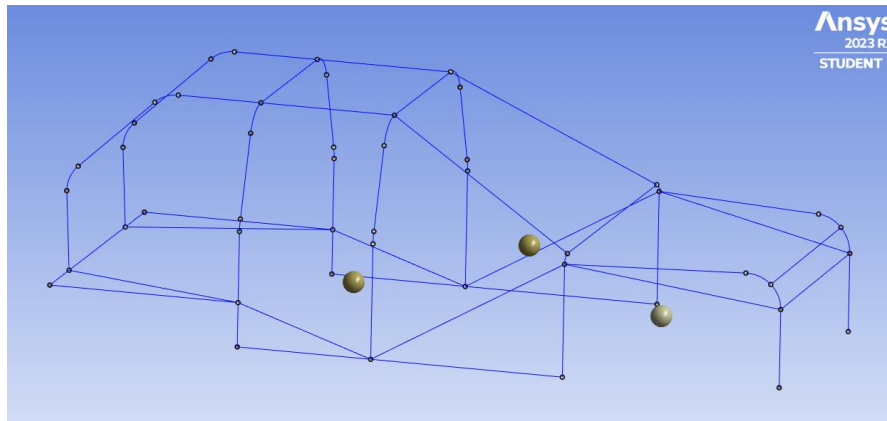


Figura 3.5-4

Al haber sufrido modificaciones, se repite el análisis estático, sin cambios significativos respecto a las deformaciones sufridas y obteniendo esfuerzos tanto de compresión como de tracción de 472,83 MPa, apreciables en la figura 3.5-6. Se consigue un coeficiente de seguridad de 1,31. El diseño se considera apto.

Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1,	3,3824
2,	25,046
3,	31,129
4,	38,103
5,	42,269
6,	49,137
7,	54,555
8,	56,254
9,	76,91
10,	78,498

Figura 3.5-5

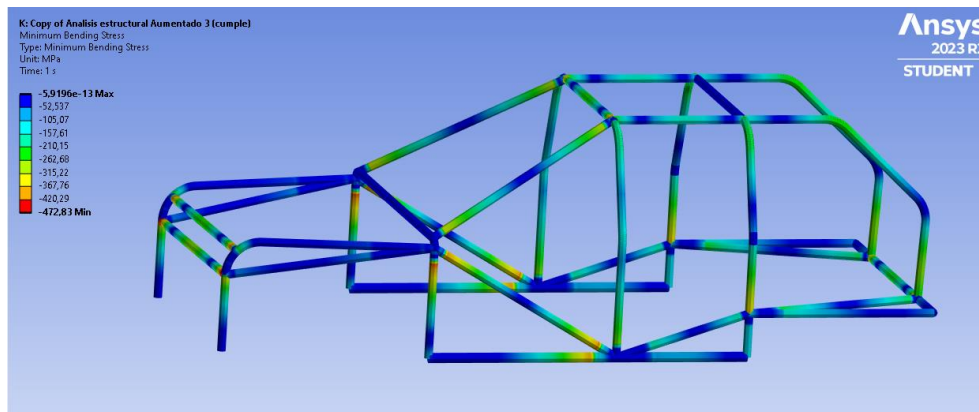


Figura 3.5-6

4 Guía rápida para el análisis de una estructura

En este apartado se va a explicar con mayor detalle los pasos a seguir desde el comienzo de la primera propuesta de estructura hasta un chasis final que cumpla con los criterios propuestos. El primer paso es realizar un primer chasis en el programa de diseño Solid Edge, aunque se puede realizar en otros programas similares, en los que los pasos serán homólogos.

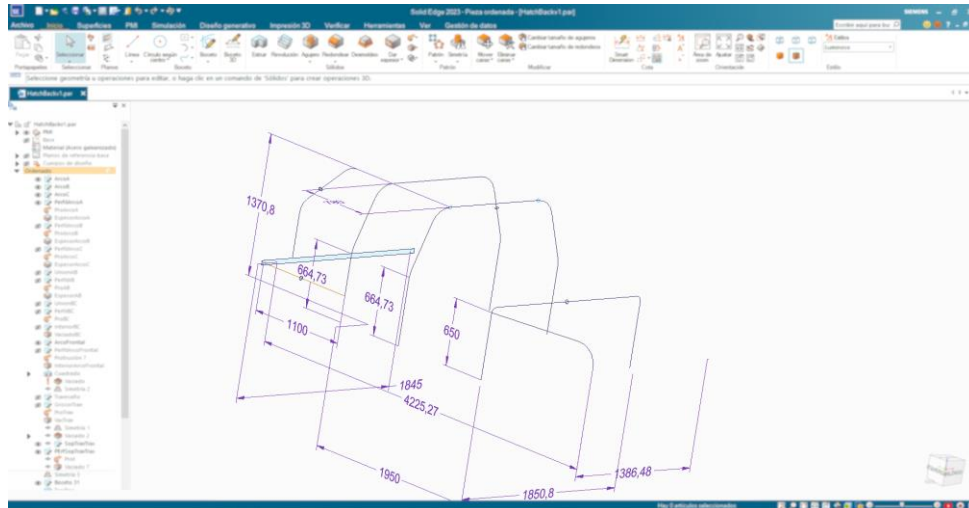


Figura 4.1-1

4.1 Creación mediante software de diseño

Antes de realizar la estructura, es recomendable seguir pautas para poder optimizar el tiempo invertido. Si el chasis tiene que cumplir con valores dimensionales muy estrictos, es aconsejable dejar cierto margen, ya que al analizar la estructura se puede requerir cambiar el tamaño de los perfiles y esto podría alterar las dimensiones totales del producto finalizado. Después, en caso de que se vayan a realizar varias iteraciones, parametrizar los valores dimensionales del prototipo en una hoja de cálculo supone un cambio de estos en caso de necesitarse con mayor celeridad. El primer paso, en este programa concreto, siempre es pasar a ordenado. Después, es realizar un boceto alámbrico del chasis, como se muestra en la figura 4.1-1. En lugar de seguir el desarrollo más simple de realizar una estructura plana, duplicarla y reforzar el espacio entre ambas, se decide realizar un diseño de arcos, realizando la unión mediante barras, adaptándose mejor a los esfuerzos sufridos.

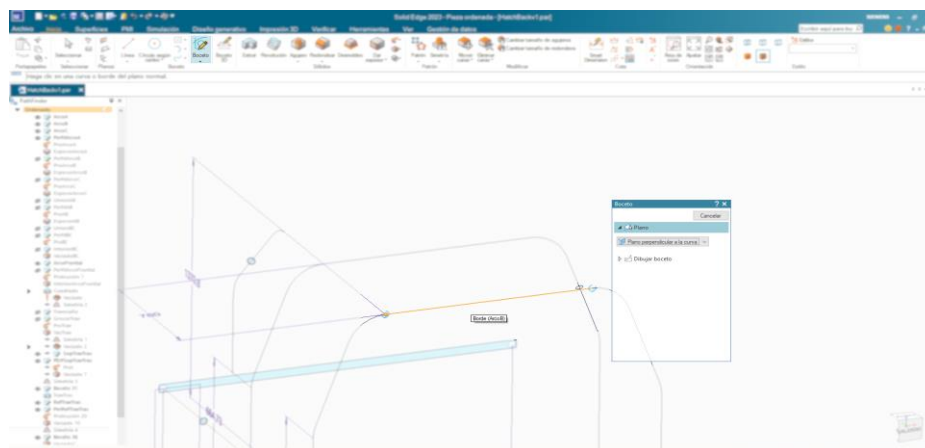


Figura 4.1-2

Este perfil se va a realizar con las herramientas de Boceto en la barra de herramientas de la parte superior del programa. El siguiente paso consiste en dibujar el perfil que se va a usar en cada barra, en este caso son perfiles tubulares, la mayoría circulares, aunque se puede utilizar cualquier tipo de perfil. La mejor forma de realizar esto es mediante un plano perpendicular a la curva explicado en la figura 4.1-2 y se procede a dibujar el perfil. En este momento, es importante realizar el acotamiento del perfil, en sus valores característicos proporcionados por el proveedor para poder tabular los valores. Se tendrían que marcar las flechas y los valores en rojo, indicando que son valores

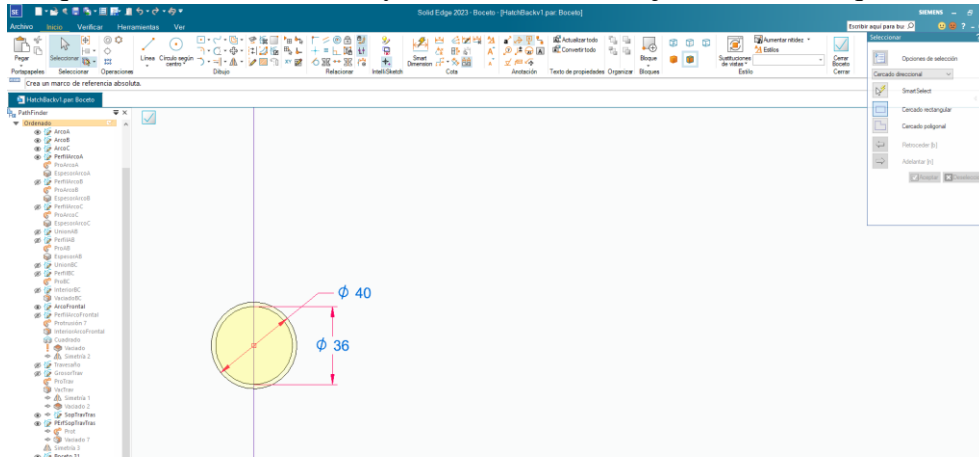


Figura 4.1-3

independientes (tras el siguiente paso los valores cambian a color azul, observable en la figura 4.1-3). Para parametrizar los valores se procede a la pestaña de herramientas, en el menú de variables, donde se encuentra los valores de la estructura. Es importante cambiar los nombres para poder reconocer a que dimensión corresponde cada valor. Se abre una hoja de cálculo, se selecciona la casilla donde se quiere tener el valor parametrizado y se copia. De vuelta en el software de diseño, se selecciona la columna “Fórmula” del valor que se quiere parametrizar y tras clic derecho, se selecciona la opción de “Pegar vínculo”. Se realiza este procedimiento con todos los valores que se quieran parametrizar, según muestra la figura 4.1-4.

Se procede a extruir el perfil realizado. Se puede realizar de diversas formas, la más sencilla es utilizar los arcos como trayectoria a seguir y el perfil de las barras como

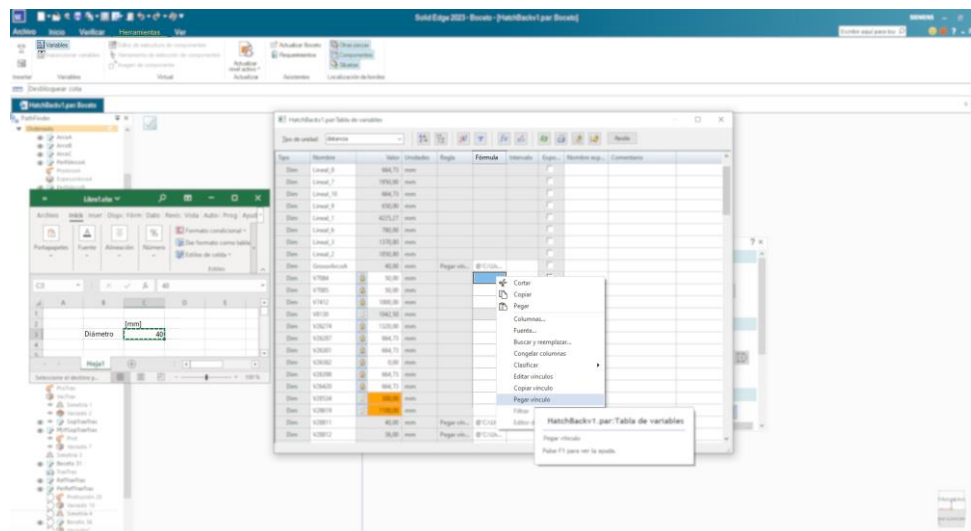


Figura 4.1-4

sección transversal, como muestra la figura 4.1-5. Una alternativa a este método es extruir solo el perfil exterior y realizar un vaciado dando el espesor deseado. Es importante tener en cuenta el orden en el que se realizan las barras porque en caso de que se crucen varios perfiles, el programa prioriza a la primera barra para que se mantenga intacta, mientras que modifica las demás barras para evitar que varios elementos ocupen el mismo espacio físico. Después de realizar este procedimiento con el resto de las barras, la estructura ya está acabada.

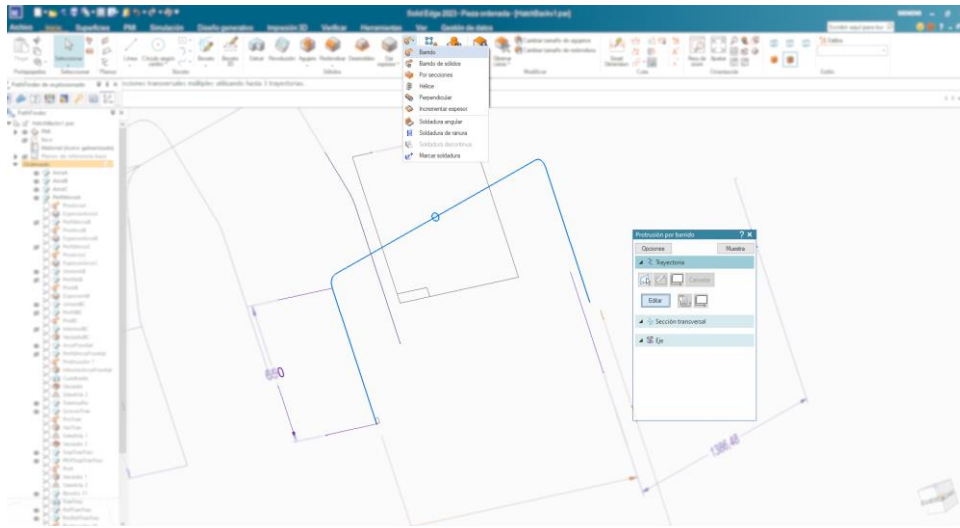


Figura 4.1-5

4.2 Adaptación de la estructura

Con la estructura ya acabada, se va a comenzar a trabajar con el paquete de programas específico para el análisis, en este caso ANSYS. El primer paso es empezar un nuevo proyecto. Después, se selecciona el tipo de análisis que se quiere llevar a cabo, en este caso es un análisis estructural. Cuando ya haya sido seleccionado, se tendrá que mostrar una nueva ventana como se puede apreciar en la figura 4.2-1. El siguiente paso es cargar la geometría. En este paquete de programas es especialmente relevante el proceso, por lo que se detalla paso a paso específicamente para evitar confusión. Es importante saber que

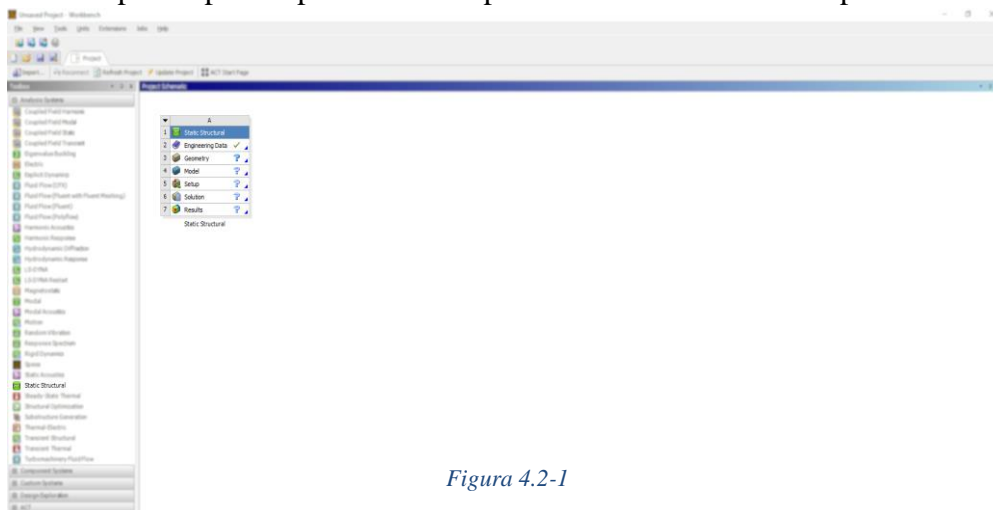


Figura 4.2-1

editor usar, ya que “Discovery” no tiene los medios suficientes para este uso, se utiliza “SpaceClaim”. Para ello, se pulsa clic derecho sobre “Geometry”, para seleccionar “New SpaceClaim Geometry...”. Una vez abierto, se selección “File”, que abre un menú donde se selecciona “Open”, apreciable en la figura 4.2-2. Esto abre la selección que archivos. Se busca la carpeta donde está guardado el archivo del chasis y se cambia la extensión de archivos a “All Files (*.*)”. Al seleccionar el archivo utilizado, este se carga.

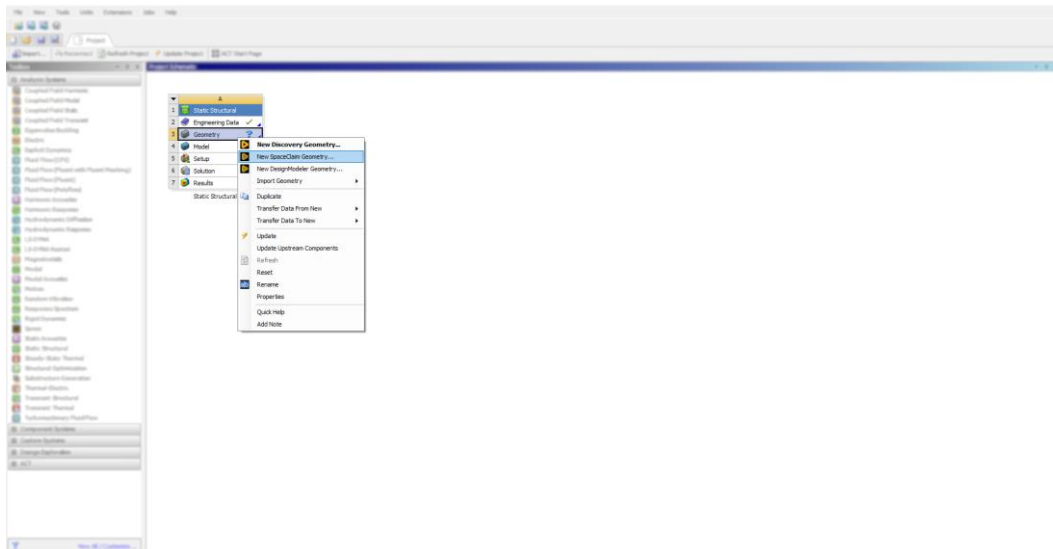


Figura 4.2-2

Tras cargar la estructura, el primer paso es descomponer la figura en los distintos elementos que componen el chasis. Cada elemento cuenta con su propia sección y la trayectoria que sigue esa sección para conformar todo el volumen del elemento. Al seleccionar la imagen para procesarla, debería de verse como en la figura 4.2-3. Tras unos segundos, lo que antes eran cuerpos sólidos, se han transformado en líneas de distintos

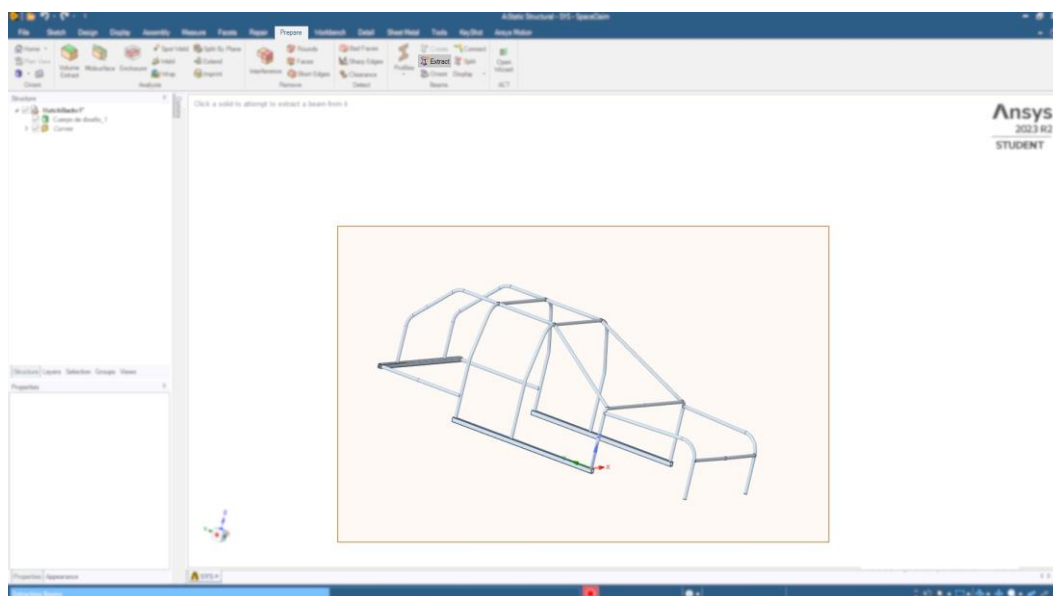


Figura 4.2-3

grosos. Estas líneas pueden no tener los grosos que tenían los perfiles inicialmente, pero es algo que se soluciona en pasos posteriores. Se puede apreciar que en las zonas donde se han dibujado los perfiles de los tubos durante la creación en el programa de

diseño, ahora aparecen estos mismos como líneas, se seleccionan y se eliminan para evitar que interfieran con los elementos que sí existen. Se verifica que todas las líneas están unidas y, en caso contrario, se utiliza una combinación de las diversas herramientas de unión, prolongación y acondicionamiento de los bocetos que se encuentren en el menú de dibujo del programa de análisis que se esté utilizando. Ahora se procede a guardar el archivo, mostrado en la figura 4.2-4 y a cerrarlo, ya que, al estar abierto, a veces el programa tiene problemas para leerlo. Con esto, la estructura ya está preparada para poder ser analizada. Una vez creado el análisis, es conveniente tener esta estructura abierta en el editor en caso de que se realicen pequeñas modificaciones, ya que resulta más conveniente recargar la geometría que cerrar y volver a abrir el apartado de análisis.

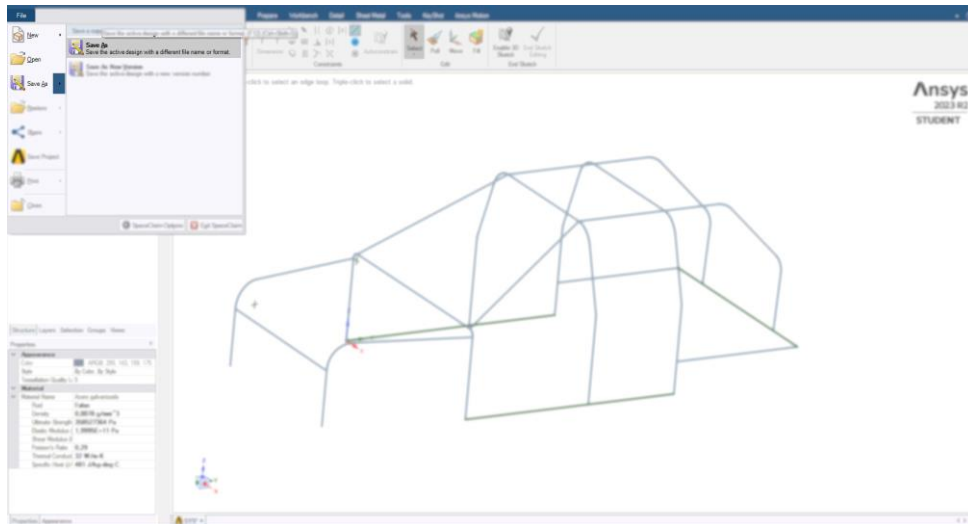


Figura 4.2-4

4.3 Análisis estático de la estructura

El primer paso para el análisis de la estructura es definir el material que se va a usar. Para ello, en el menú del proyecto se va a acceder a los datos del proyecto, donde se encuentra el material. Se escoge el comportamiento que se le quiera añadir, en este caso un comportamiento lineal isotrópico, el cual necesita 2 variables para definirse completamente. Para este material concreto, los valores utilizados son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, como se muestra en la figura 4.3-1, proporcionados por el proveedor de los perfiles de acero seleccionados.

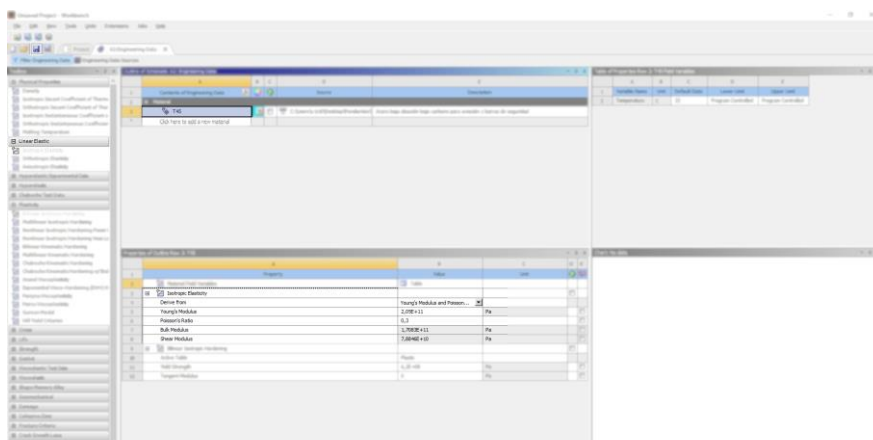


Figura 4.3.1

Se vuelve a abrir la pestaña del proyecto para acceder a la función de cálculo del análisis estructural. Como peculiaridad de este paquete de programas, los perfiles creados en la geometría no se consideran integrables, por lo que es conveniente eliminar los perfiles antiguos y sustituirlos por los perfiles correspondientes para obtener soluciones más completas, corrigiendo los problemas generados al convertir la estructura tridimensional en alámbrica. Para ello se selecciona en el árbol de menús, la sección, se seleccionan todos los elementos y se elimina el perfil asignado. Dentro de esta selección se han activado los posibles perfiles a asignar en los submenús. Se seleccionan los correspondientes y se definen las dimensiones en cada uno de ellos como aparece en la figura 4.3-2.

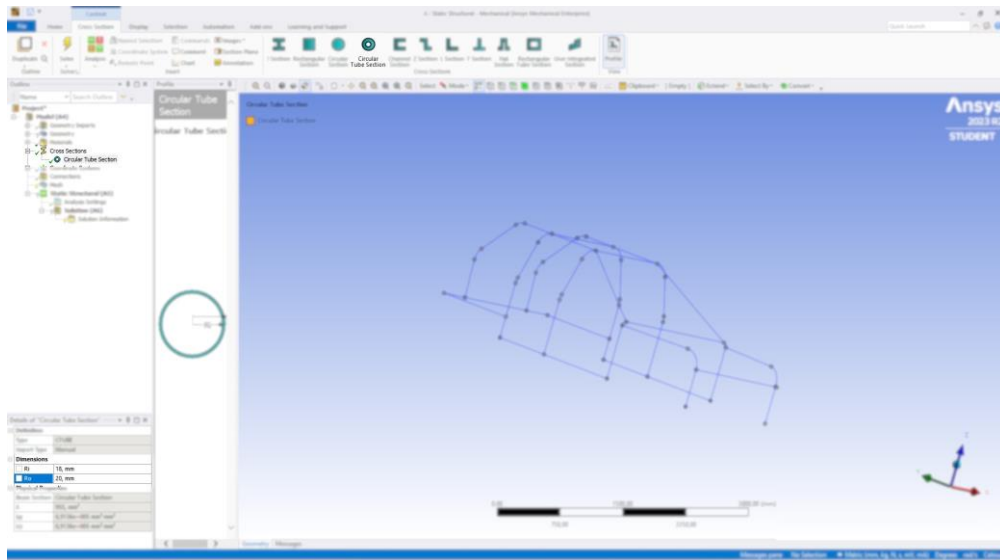


Figura 4.3-2

El siguiente paso es asignar la sección creada a la barra seleccionada, para ello se abre la rama de geometría y se seleccionan las partes que vayan a utilizar el perfil creado, pudiendo seleccionarse varios elementos a la vez para no tener que asignar el perfil individualmente. Tras haber seleccionado todos los elementos correspondientes, se asignan tanto el perfil como el material, viéndose como se indica en la figura 4.3-3. Se repite este proceso tantas veces como combinaciones distintas de materiales y perfiles haya, hasta haber asignado ambas propiedades a todas y cada una de las barras. Con el material y la sección asignada a cada una de las barras, se procede con el siguiente paso.

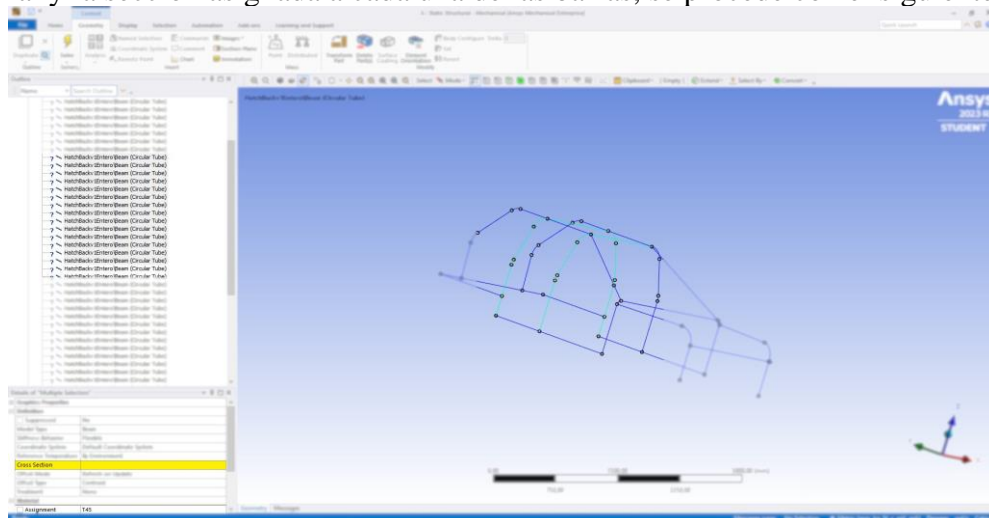


Figura 4.3-3

Debido al proceso utilizado para la obtención de las secciones, cada uno de los tramos en el modelo alámbrico es considerado como un cuerpo independiente, y, de forma predeterminada, cada cuerpo no tiene ningún tipo de contacto con los demás. Para solucionar esto, se busca el apartado de conexiones dentro de los menús que se estén utilizando. En ANSYS es un menú independiente, pero podría incluirse dentro del menú de fuerzas y condiciones de contorno como submenú. La condición de contacto que tienen los cuerpos entre sí, al ser soldados o, en ocasiones, incluso conformar el mismo cuerpo, es una conexión rígida. Por lo tanto, se selecciona la opción que no permita ni deslizamiento, ni penetración ante ningún tipo de fuerza. Con estos ajustes, se selecciona

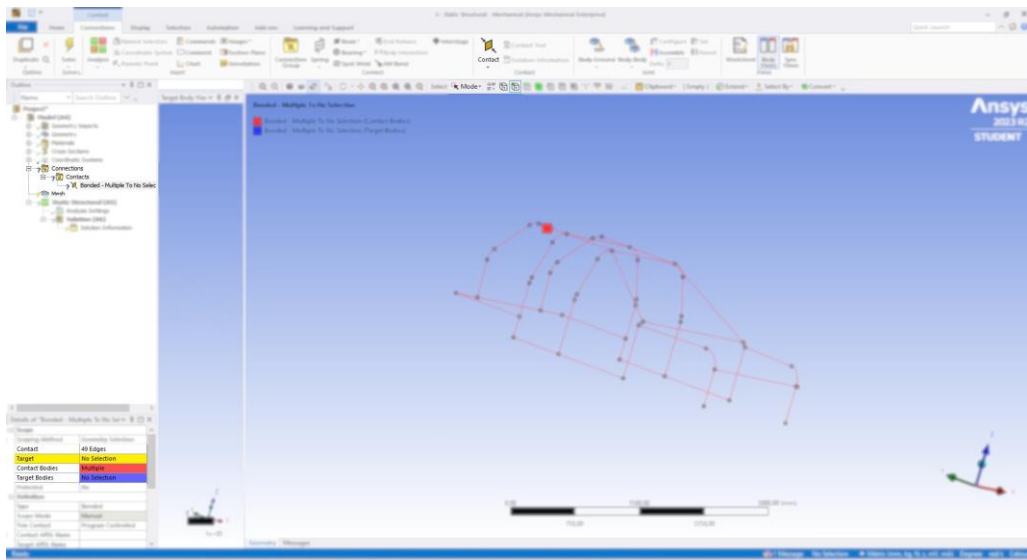


Figura 4.3-4

la estructura entera. Tras haber sido seleccionada, para aplicar las condiciones a la geometría, se selecciona la geometría entera tanto como cuerpo de contacto como cuerpo objetivo, provocando que todos los elementos que estén en contacto con algún otro elemento estén unidos de forma rígida. Como referencia, están indicadas todas las opciones en la figura 4.3-4.

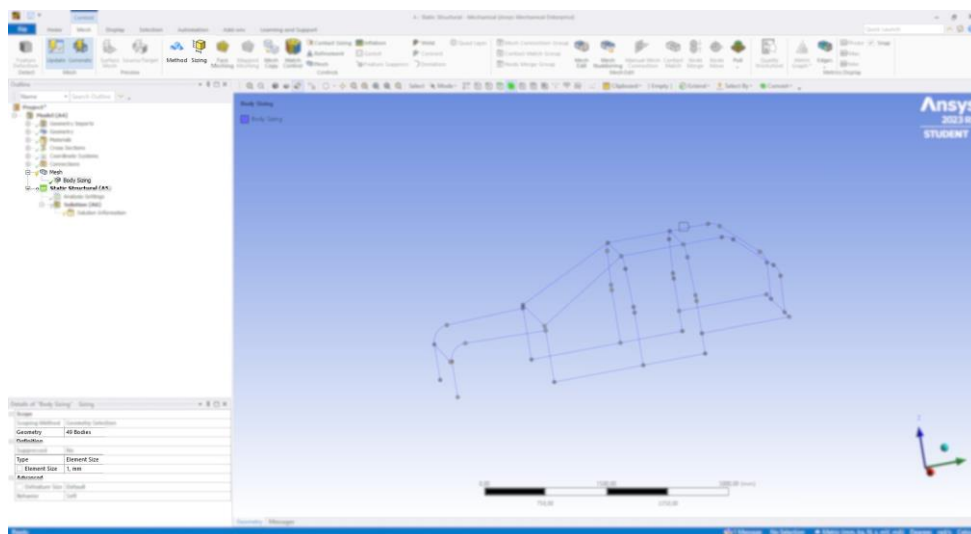


Figura 4.3-5

El siguiente paso que realizar es el mallado. Los dos parámetros más importantes con los que trabajar en el mallado, son el tamaño de malla y el tipo de mallado que se va a utilizar en el análisis, cuyo tipo está ya elegido por trabajar con el método de la sección. Para seleccionar el tamaño de elemento, es común encontrarse una opción directa dentro del menú del mallado. Se accede a las opciones del tamaño de malla, que puede definirse por tamaño de los elementos o por el número de divisiones, como se indica en la figura 4.3-5 y se pone un tamaño razonable respecto a la licencia y a la capacidad de cómputo disponible. Al ser elementos unidimensionales en este tipo de mallado, resulta más fácil saber el número de elementos de antemano que respecto a los otros métodos. Se pueden seleccionar distintos tamaños de mallado para distintas partes, aunque para el primer análisis es recomendable que el tamaño sea el mismo en todos los elementos, ya que no se sabe cuál necesita tener mayor definición de antemano. El mallado se puede generar tras este paso o esperar a generar la solución.

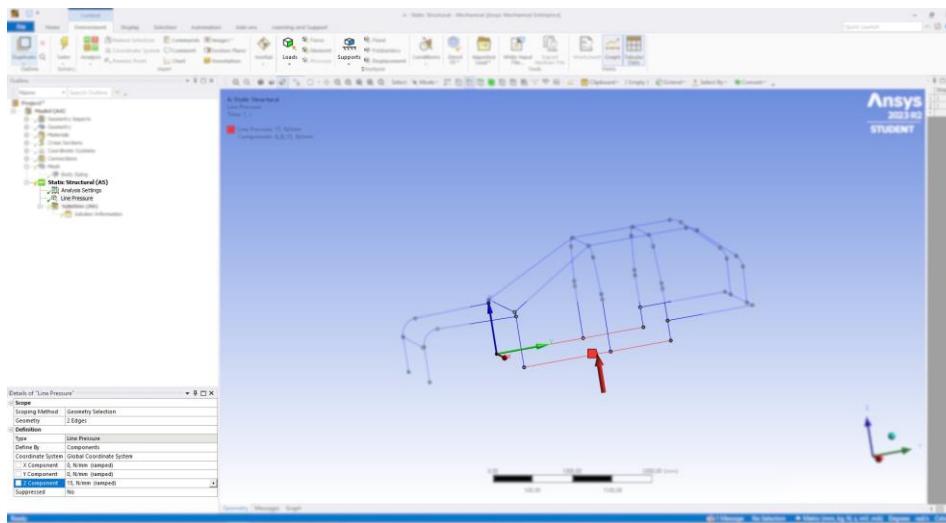


Figura 4.3-6

El siguiente paso consiste en establecer las condiciones de contorno y las cargas externas. La variedad de cargas que se pueden usar está limitada debido al tipo de elemento, lo que puede influir dependiendo del tipo de análisis que se fuese a realizar. En este análisis se van a utilizar cargas distribuidas lineales, ya que al ser elementos unidimensionales se considera que no tienen superficies a las que poder aplicar presiones. Esta opción puede utilizarse para varios elementos, ya que está expresada en N/mm, por lo que se puede utilizar para varias barras a la vez teniéndose en cuenta la longitud total, en caso de querer aplicarse una única fuerza distribuida por todos los elementos que conforman una única superficie, el cual es el caso de estudio de esta guía. Se asigna a los elementos y se introduce el valor en los detalles de la operación tal y como se muestra en la figura 4.3-6. Se puede expresar en coordenadas o introducir la dirección seleccionando una línea del dibujo paralela. Se repite la operación con todas las cargas repartidas del problema. Para la aplicación de las condiciones de contorno, el procedimiento es similar, con la excepción de en lugar de considerar las cargas, se acceden a los apoyos. Como la estructura tiene que ser estática, se recomienda utilizar el menor número de apoyos que acepte el programa para seguir considerando la estructura como estática, utilizando simetrías y puntos similares donde se sepa que las fuerzas y momentos son despreciables respecto a los demás para que no interfieran con los resultados. Es importante realizar una selección correcta de estos apoyos porque influencia de forma drástica como han de leerse los resultados de desplazamientos obtenidos en el análisis.

Una vez se tienen todas las condiciones, falta saber qué resultados se quieren obtener. Los resultados estudiados en este caso son el desplazamiento total, el de cada eje, la tensión axial y la tensión cortante. Para obtenerlos, se accede al apartado de solución y en la barra de herramientas se despliega el primer resultado que se quiere obtener, el desplazamiento, que se diferencia de la deformación porque la deformación es adimensional, mientras que el desplazamiento tiene unidades de longitud. A la hora de obtener los resultados de desplazamiento, se utilizan cuatro distintos, uno de ellos para el desplazamiento total y, del resto, uno para cada uno de los ejes a estudiar. Para obtener las tensiones, se pueden obtener tanto las tensiones descompuestas en sus distintos valores como los valores totales. Aunque los valores totales aporten el resultado final que se va a comparar frente al límite elástico, los valores parciales facilitan sustancialmente el análisis de los esfuerzos implicados, ayudando a identificar los fallos de diseño y las futuras mejoras del modelo. Los valores obtenidos coinciden con los valores establecidos en las ecuaciones (2.1-2) y (2.1-3). También es recomendable obtener los valores de fuerzas y momentos ejercidos sobre los apoyos, ya que, al saber las fuerzas que se ejercen sobre los apoyos se comprueba que no haya ningún grado de libertad de más impedido, y que, el que ha sido impedido, no genera una fuerza suficiente como para que pueda apreciarse en la solución. Al obtener los momentos de los apoyos, se comprueba lo mismo que con las fuerzas, que los grados de libertad que se han impedido no generan cargas lo suficientemente significativas como para influir en la solución del problema. Con todos los resultados que se quieren obtener preparados como se puede apreciar en la figura 4.3-7, se resuelve el problema y, en caso de que no se haya realizado en pasos anteriores, se compone la malla, obteniendo todos los datos necesarios para saber el comportamiento del chasis frente a las solicitaciones a las que se le ha sometido.

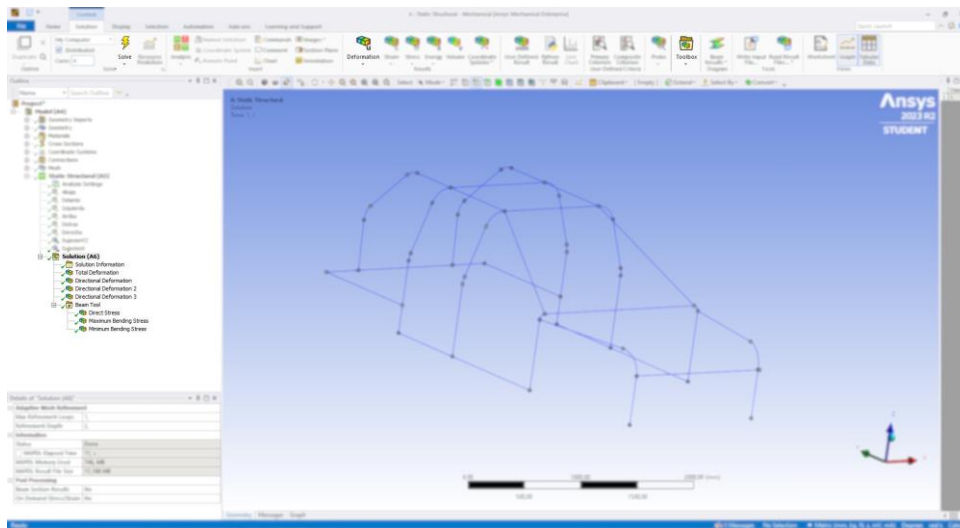


Figura 4.3-7

4.4 Análisis de frecuencias modales

El primer paso para realizar el análisis de frecuencias modales es homólogo al primer paso del análisis de la estructura estático, consiste en abrir una instancia de análisis modal. El siguiente paso, el cual es cargar la estructura, es mucho más sencillo, ya que, en lugar

de tener que adaptar una estructura creada en otro programa, se puede volver a utilizar el chasis obtenido en la última iteración realiza del análisis estructural.

Dentro del apartado de análisis modal, el primer paso es establecer las relaciones entre los distintos cuerpos. En este caso, todos los cuerpos tienen una unión rígida con los que están en contacto, por lo que se establece dentro del análisis según la figura 4.4-1. Se seleccionan los cuerpos pertinentes en cada relación.

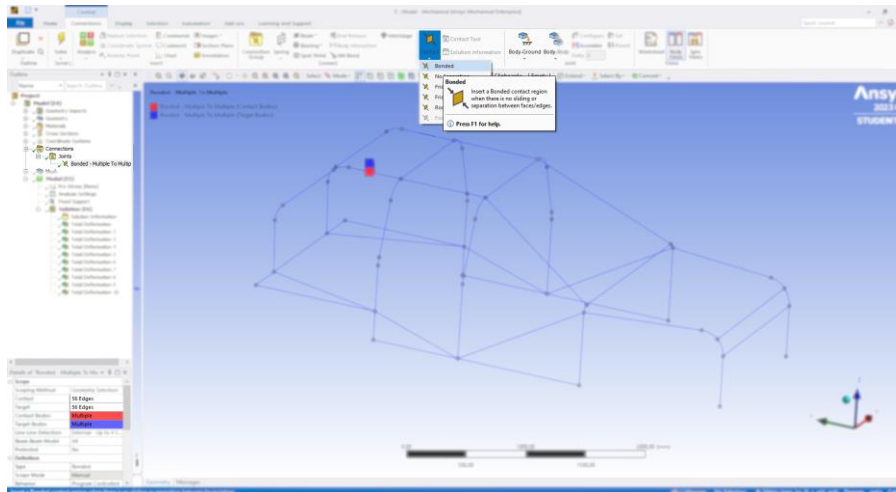


Figura 4.4-1

El siguiente paso consiste en elegir los apoyos con los que va a contar el sistema, siendo en esta ocasión los puntos más próximos a la posición donde estarían unidas las columnas de suspensión al chasis. Estos apoyos cuentan con todos los grados de libertad impedidos, como se puede apreciar en la figura 4.4-2.

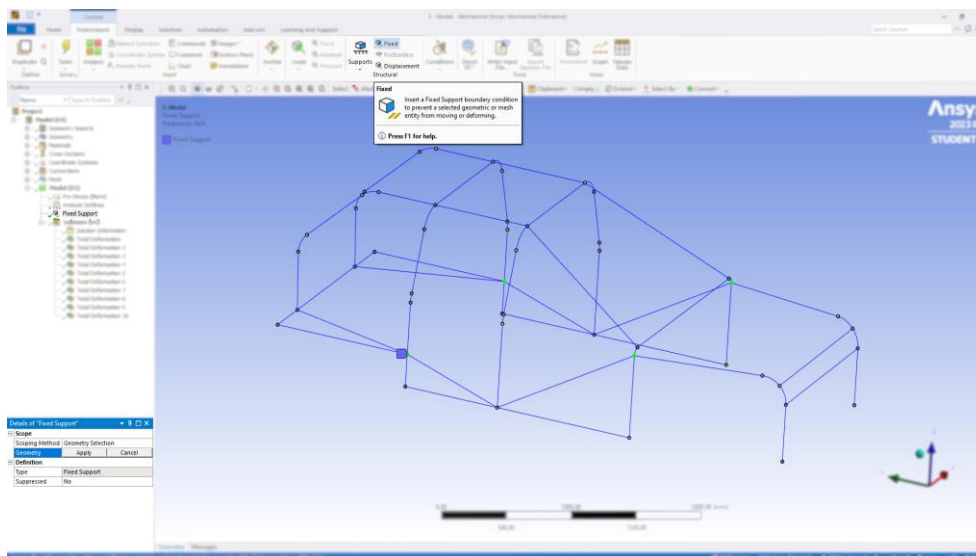


Figura 4.4-2

Una vez finalizados los apoyos, en el caso de que las haya, se añaden las masas que se estimen oportunas para el análisis. En este caso concreto, se van a utilizar los valores de la masa en orden de marcha, que incluye al conductor, los fluidos y todos los componentes con los que cuenta el vehículo para su normal funcionamiento. Se añaden como masas puntuales, las cuales se encuentran dentro de la sección de cuerpos geométricos. Estando

ya añadidas, se seleccionan tanto los elementos a los que van a estar unidas como la propia unión con estos elementos y se introducen la masa y las inercias de sus 3 ejes, como se muestra en la figura 4.4-3. Se repite el proceso con todos los elementos o conjuntos de elementos que se quieran utilizar.

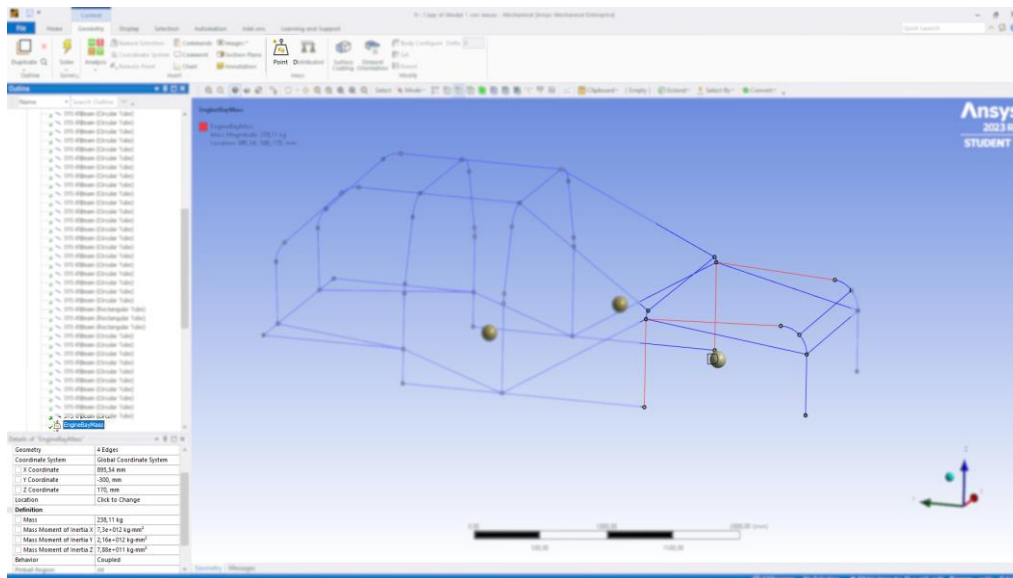


Figura 4.4-3

Se continúa escogiendo los parámetros de la solución, como puede ser el número de nodos que se desea encontrar o el rango de frecuencias que se vaya a barrer para encontrar los acoplamientos, como se puede apreciar en la figura 4.4-4.

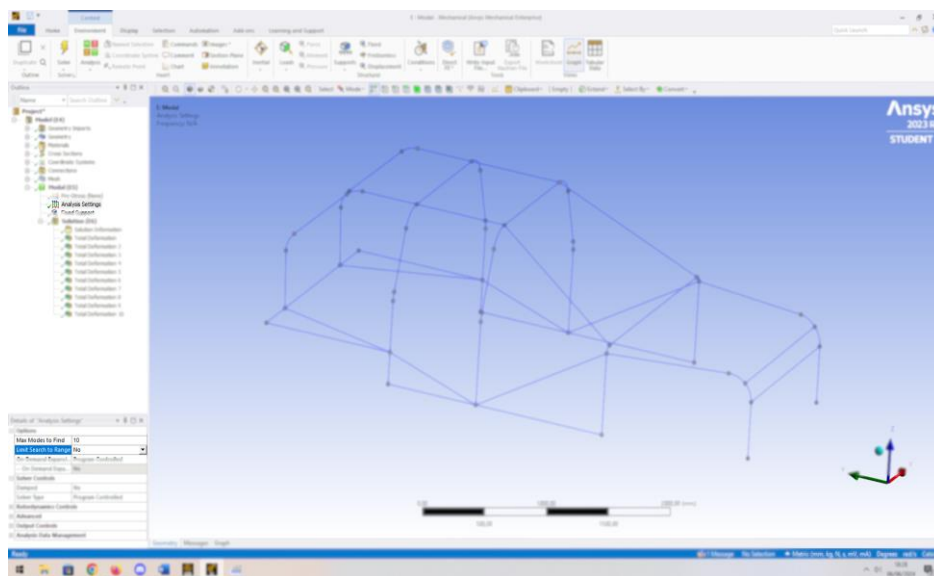


Figura 4.4-4

El último paso consiste en obtener los resultados, en forma de tabla, de las frecuencias en las que se encuentran los modos. También, como información complementaria para mejorar el análisis, se añade información de los desplazamientos sufridos por la estructura en cada uno de los análisis modales. Para ello, se resuelve la estructura y, tras unos instantes de espera a que el programa realice los cálculos necesarios para la obtener la

solución. Con esto, se ha obtenido la respuesta dinámica a las vibraciones sufridas por la estructura, como se puede apreciar en la figura 4.4-5.

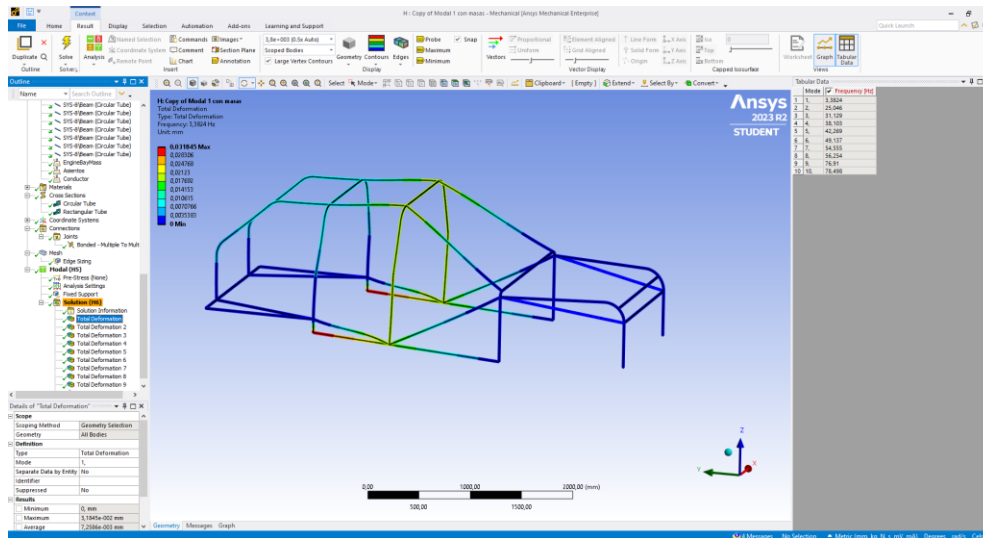


Figura 4.4-5

Una vez comprobada la viabilidad de la respuesta del chasis frente a las vibraciones, es conveniente realizar un estudio estático sobre los cambios realizados para asegurarse de que las modificaciones realizadas no suponen un compromiso ante las fuerzas requeridas, ya que añadir barras altera la distribución de esfuerzos.

5 Experiencias, objetivos y valoración final

5.1 Incidencias, experiencia conseguida y problemas encontrados

Durante la realización del TFG he adquirido una mayor confianza para enfrentarme a los problemas, aunque no se cuentan con todos los datos necesarios para resolverlo desde el comienzo y un mayor criterio a la hora de analizar los datos de los que dispongo, ya que ha sido el trabajo con mayor libertad que he realizado hasta la fecha. Como muestra, durante la elección del material con el que trabajar, el metal óptimo según los requisitos, el acero T45, no sería el mejor material con el que trabajar en caso de querer obtener un chasis físico, ya que, tras una comparación posterior, cuenta con pocos proveedores, tiene un número limitado de perfiles y es bastante más caro que alternativas como el acero 25CRMO4. También he aprendido la importancia de ser metódico, ya que después de estar desarrollando información basada en trabajos previos, descubría errores que había cometido al principio, teniendo que posponer las tareas que estaba realizando para solucionar los fallos recién descubiertos. La falta de método se hizo especialmente notable durante los análisis, ya en varias ocasiones, después de varias iteraciones descubría fallos en los primeros análisis que, tras corregirlos hacían inservibles las iteraciones posteriores.

Además, he conseguido experiencia con el paquete de programa ANSYS, uno de los más usados en el ámbito laboral. En especial la experiencia la he conseguido en la utilización de los elementos de sección para análisis por elementos finitos aplicado a estructuras estáticas. Aunque trabajar con ANSYS también me ha supuesto la mayoría de los problemas encontrados. Uno de los que más me sorprendió es que al utilizar el método de la sección, muchas de las funciones quedan deshabilitadas. Por ejemplo, no se puede realizar ninguna operación relacionada con superficies o, al menos, sin tener que recurrir a caminos alternativos, ya que el programa no tiene en cuenta la superficie que pueda tener la sección que se está utilizando. Inesperadamente, y a pesar de contar con un gran número de tutoriales y ayudas, trabajar con la geometría en ANSYS también contó con sus propios problemas porque los tutoriales suelen estar obsoletos y las ayudas son demasiado genéricas como para ser de utilidad. También cuenta con varias herramientas para la misma función, cada una con diferente alcance, lo cual hace confusa su utilización. Sin embargo, la gran parte de los problemas ocasionadas contaban con fácil resolución porque en la bandeja de mensajes del sistema indicaba posibles causas y donde encontrarlas.

5.2 Cumplimiento de objetivos, mejoras, continuación y aplicación

Con este TFG se ha conseguido realizar una guía para el desarrollo y estudio computacional de un chasis tubular para un vehículo de cuatro ruedas, con capacidad para cuatro ocupantes de diseño propio. Se ha partido de unos requisitos de esfuerzos y materiales obtenidos de la Federación Internacional de Automovilismo y se ha estudiado la viabilidad de las herramientas utilizadas con varios casos teóricos. Tras verificar la exactitud de las herramientas se ha realizado un primer diseño, se ha estudiado su cumplimiento de los criterios que, al ser negativo, se han corregido los fallos de diseño más aparentes y se han repetido en un ciclo iterativo hasta conseguir un resultado positivo respecto a las cargas estáticas. Tras obtener este resultado, se ha sometido a la estructura resultante a un análisis de frecuencias modales naturales para obtener la respuesta ante vibraciones, que, al igual que el análisis estático, se ha repetido mediante un ciclo iterativo

hasta obtener un resultado apto. Tras confirmar que la estructura ha sido capaz de soportar las frecuencias que transmite el suelo a través de la suspensión, se ha realizado un análisis estático adicional con el fin de verificar que el chasis sigue cumpliendo con los parámetros estáticos tras sufrir las modificaciones necesarias para poder superar el análisis de modos con éxito. El estudio de este chasis se ha utilizado como medio para la realización de una guía básica para el diseño del chasis de un exocoche.

Respecto a los resultados obtenidos, considero que los apartados de selección cuentan con las justificaciones suficientes y la utilización de las herramientas cuenta con explicaciones adecuadas para su seguimiento y reproducción, tanto en los casos específicos empleados como para ser extrapolables a programas y paquetes semejantes. Tras ser probada, utilizando solo la guía se consiguió desarrollar y analizar una estructura.

Al ser el objetivo principal de este trabajo la seguridad y, por consiguiente, la sencillez en el diseño para facilitar su posible ensamblaje y elaboración, se deja margen para mejorar, ya que el fin último de un chasis de este tipo es el menor peso posible dentro de los márgenes de seguridad. El ejemplo más claro es la utilización de la mínima cantidad de perfiles distintos para las barras y un mismo material para todos ellos. Se podría optimizar el diseño tanto con distintos perfiles como con el uso de otros metales, lo que supondría un ahorro en peso y en el coste de los materiales, ya que la estructura estaría optimizada para los esfuerzos escogidos.

La ampliación del trabajo cuenta con un camino claro, el cual es seguir desarrollando material pedagógico para el desarrollo de las distintas partes con las que cuenta el vehículo, como puede ser el cálculo de la suspensión con sus soportes, la aerodinámica en caso de querer utilizar un carenado, los puentes delantero y trasero o incluso las uniones mecánicas de determinados elementos, como puede ser el motor.

La aplicación del texto desarrollado también tiene una aplicación concreta, que consiste en servir de guía para asistir en el aprendizaje de la creación de vehículos de chasis tubular para uso en circuito desarrollado por equipos pequeños de competición o empresas especializadas.

5.3 Conclusiones y valoración final

Analizando los resultados obtenidos por el sujeto del TFG, el chasis que ha sido utilizado como ejemplo durante todo el desarrollo, se ha obtenido un vehículo que cumple con los requisitos de integridad estructural establecidos por órganos oficiales. Además, también es capaz de soportar cargas dinámicas, como son las frecuencias modales. El tamaño de las secciones es semejante a las secciones de jaulas de seguridad o, en ocasiones, mayor que estos al ser la estructura mayor y contar con menos elementos. Por lo tanto, el resultado obtenido es una guía con la que se puede desarrollar un chasis que soporta las cargas, cuyas secciones aportan resultados coherentes que no hacen sospechar que no sean capaces de soportar los esfuerzos requeridos. Como medida extra de seguridad, se cuenta con un coeficiente de seguridad para ponderar los posibles errores derivados del procedimiento seguido.

Por los motivos nombrados anteriormente se concluye que la guía es funcional, pero ha de usarse de manera complementaria, ya que no sustituye los conocimientos para estudiar los análisis. Ha de usarse junto a los manuales y requisitos de los órganos oficiales controladores de las vías en las que vaya a usarse, ya que tienen la decisión última respecto a la seguridad, la FIA en caso de querer usarse en circuito.

6 Referencias y bibliografía

6.1 Lista de referencias

- [1] Wikipedia, The Free Encyclopedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Exoskeleton_car, accedido 23 de mayo de 2024.
- [2] Real Federación Española de Automovilismo, <https://ceax.rfeda.es/que-es-el-ceax> accedido el 12 de junio de 2024.
- [3] Henry Ford Y Gregorie Eugene T “Automobile Chassis Construction” Patente US2269452A, 13 de enero de 1942.
- [4] Ariel Motor Company, <https://www.arielmotor.co.uk/our-history/>, accedido 25 de mayo de 2024.
- [5] Rob Stumpf, The Drive, <https://www.thedrive.com/news/20451/man-who-built-death-kart-exocar-killed-after-head-on-accident>, Accedido 25 de mayo de 2024.
- [6] Caterham Cars Ltd <https://caterhamcars.com/en>, Accedido 12 de junio de 2024.
- [7] Ariel Motor Company <https://wwscudw.arielmotor.co.uk/>, Accedido el 12 de junio de 2024.
- [8] DJC Precision Engineering LTD <https://djcsportscars.co.uk/#djc>, Accedido el 12 de junio de 2024
- [9] B-racing <https://www.k1-attack.com/> Accedido el 12 de junio de 2024
- [10] RCB <https://www.rcb7.de/FahrspassimDetail> Accedido el 12 de junio de 2024
- [11] VasilyBuilds, 100hp Offroad Crosskartbuild!, 26 de julio de 2020. Disponible: https://www.youtube.com/playlist?list=PLPKHT_pgivmid9Hh9eIHHOks5HgnpB1fM
- [12] BMW, Armazón de carrocería para Mini JCW ALL4, 41007449397, 2018
- [13] M J Fabela Gallegos, M E Cruz Acevedo, O Flores Centeno, “Efecto de la excedencia de peso en el consumo energético de vehículos de autotransporte”, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, ISSN 0188-7297, 202
- [14] FIA. Anuario de deporte automovilístico. Edición 19 Apéndice J. Artículo 253. p 163. 1986
- [15] Lancaster, J.F. Edición 6 Abington Publishing. p. 464. ISBN 978-1-85573-428-9. 1999
- [16] ProFormance Metals <https://proformancemetals.co.uk/products/t45-steel-tube/>, Accedido 2 de noviembre de 2023

6.2 Bibliografía adicional

Siemens Digital Industry Software, “Solid Edge”, <https://solidedge.siemens.com/es/> Accedido 14 de junio de 2024

Universidad Politécnica de Cartagena, “El método de los Elementos Finitos en Ingeniería” <https://www.upct.es/goe/software/mefi.php> Accedido 11 de noviembre de 2023

CimWorks Lutech, “Abaqus SIMULIA” <https://www.cimworks.es/abaqus/> Accedido 12 de noviembre de 2023

Ansys incorporated “Ansys” <https://www.ansys.com/> Accedido 12 de noviembre de 2023

Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras (2022), “APUNTES DE TEORÍA DE ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIONES INDUSTRIALES” [Libro]

J Abad Blasco, P Canalís Martínez, D Valladares Hernando (2020) “CRITERIOS DE DISEÑOS DE MÁQUINAS” [Libro]

Universidad de Zaragoza, (2020) “Mecánica del Sólido Deformable” [Libro]

M Maza (2022), “PRÁCTICA 4: CÁLCULO DE LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO CON MODELOS SIMPLIFICADOS” [Libro]

M Tejerizo Fernández “Elaboración de fórmulas analíticas y tablas de cálculo para las estructuras metálicas de acero según la normativa Eurocódigo 3 “, Proyecto de Final de Carrera Ingeniero Industrial, Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, España, 2015

Anexos

Anexo 1: Información tabulada de pesos y esfuerzos externos

Líquidos	Peso [kg]
Motor	4,4
Radiador	13
Transmisión	5,7
Frenos	1
Diferencial	2,5
Total [kg]	26,6

Tabla A.1-1 Peso de los líquidos de un automóvil promedio

Pieza	Peso[lb]
Muelle de amortiguador	9,7
Gorrón de eje	12,6
Tornillo con arandela	0,1
Generador impulso ABS	0,1
Tornillo	0
Soporte conducto ABS	0,1
Total [kg]	10,2511792

Tabla A.1-2 Peso de una suspensión ejemplo

Pieza	Peso[kg]	cantidad	Subtotal [kg]
Masa no Suspendida	45	2	90
Motor	112	1	112
Transmisión	70	1	70
Embrague Y Volante de Inercia	13,307472	1	13,307472
Suspensión	10,2511792	4	41,0047168
Asientos Calefactables	17,5	4	70
Dirección	15	1	15
Electrónica	40	1	40
Líquidos	26,6	1	26,6
Depósito	40	1	40
Peso Estructura	59,76	1	59,76
Batería	16,2	1	16,2
Componentes extra	90	1	90
Total [kg]			683,872189

Tabla A.1-3 Peso total del vehículo tras el primer diseño

Aplicación	Fuerza [N]
Lateral	11166,80426
Vertical	55834,02129
Longitudinal	40944,94895

Tabla A.1-4 Esfuerzos externos sobre primer diseño

Pieza	Peso[kg]	cantidad	Subtotal [kg]
Masa no Suspendida	45	2	90
Motor	112	1	112
Transmisión	70	1	70
Embrague Y Volante de Inercia	13,307472	1	13,307472
Suspensión	10,2511792	4	41,0047168
Asientos Calefactables	17,5	4	70
Dirección	15	1	15
Electrónica	40	1	40
Líquidos	26,6	1	26,6
Depósito	40	1	40
Peso Estructura	98,64	1	98,64
Batería	16,2	1	16,2
Componentes extra	90	1	90
Total [kg]			722,750641

Tabla A.1-5 Peso total del vehículo tras la primera iteración

Aplicación	Fuerza [N]
Lateral	11738,90068
Vertical	58694,5034
Longitudinal	43042,63582

Tabla A.1-6 Esfuerzos externos sobre la primera iteración

Pieza	Peso[kg]	cantidad	Subtotal [kg]
Masa no Suspendida	45	2	90
Motor	112	1	112
Transmisión	70	1	70
Embrague Y Volante de Inercia	13,307472	1	13,307472
Suspensión	10,2511792	4	41,0047168
Asientos Calefactables	17,5	4	70
Dirección	15	1	15
Electrónica	40	1	40
Líquidos	26,6	1	26,6
Depósito	40	1	40
Peso Estructura	98,64	1	123,418965
Batería	16,2	1	16,2
Componentes extra	90	1	90
Total [kg]			747,531154

Tabla A.1-5 Peso total del vehículo tras la segunda y tercera iteración

Aplicación	Fuerza [N]
Lateral	12103,54593
Vertical	60517,72963
Longitudinal	44379,66839

Tabla A.1-6 Esfuerzos externos sobre la segunda y tercera iteración

Pieza	Peso[kg]	cantidad	Subtotal [kg]
Masa no Suspendida	45	2	90
Motor	112	1	112
Transmisión	70	1	70
Embrague Y Volante de Inercia	13,307472	1	13,307472
Suspensión	10,2511792	4	41,0047168
Asientos Calefactables	17,5	4	70
Dirección	15	1	15
Electrónica	40	1	40
Líquidos	26,6	1	26,6
Depósito	40	1	40
Peso Estructura	130,1538485	1	130,153848
Batería	16,2	1	16,2
Componentes extra	90	1	90
Total			754,266037

Tabla A.1-7 Peso total del vehículo tras análisis modal

Aplicación	Fuerza [N]
Lateral	12202,64974
Vertical	61013,24869
Longitudinal	44743,04904

Tabla A.1-6 Esfuerzos externos sobre modificación tras análisis modal

Anexo 2: Estudio de divergencia de los distintos métodos: casos

Caso 1: viga biapoyada con carga distribuida lineal

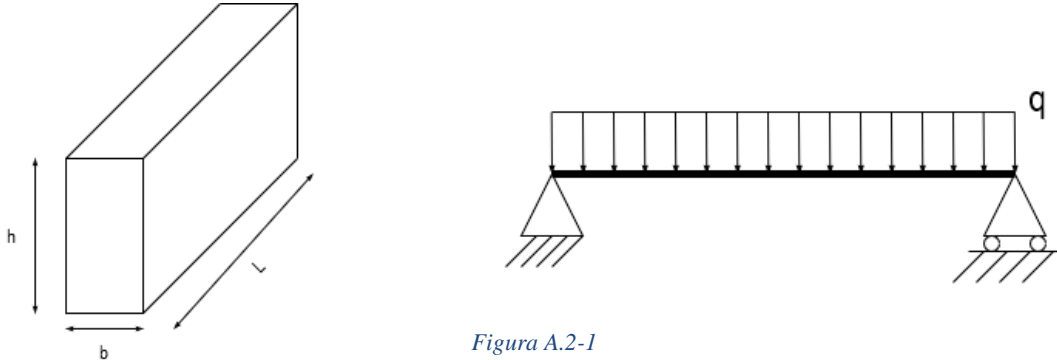


Figura A.2-1

Con $b = 50\text{mm}$; $h = 100\text{mm}$; $L = 2000\text{mm}$; $q = 25\text{N/m}$

Solución analítica

El primer paso es obtener la solución analítica, la cual se puede obtener mediante la ecuación de la elástica, que es la deformación de la línea neutra de una viga. Debido a las características del problema, podemos despreciar los efectos del cortante como se muestra en la ecuación (A.2-1):

$$\frac{M}{EI} = k_z = \frac{d\theta}{dx} \approx \frac{d^2u_y}{dx^2} \quad (\text{A.2-1})$$

Sabiendo la ecuación (A.2-2), que rige el momento de este problema, se integra doblemente la ecuación de la elástica para obtener la ecuación (A.2-3) y la ecuación (A.2-4):

$$M(x) = -\frac{qx}{2}(L-x) \quad (\text{A.2-2})$$

$$\frac{du_y}{dx} = \int -\frac{qx}{2EI}(L-x)dx = \int -\frac{q}{2EI}(Lx-x^2)dx = -\frac{q}{2EI}\left(\frac{x^2L}{2} - \frac{x^3}{3}\right) + C_1 \quad (\text{A.2-3})$$

$$U_y(x) = \int \left[-\frac{q}{2EI}\left(\frac{x^2L}{2} - \frac{x^3}{3}\right) + C_1\right]dx = -\frac{q}{2EI}\left(\frac{x^3L}{6} - \frac{x^4}{12}\right) + C_1x + C_2 \quad (\text{A.2-4})$$

Aplicando las condiciones de contorno en las ecuaciones (A.2-5) y (A.2-6), obtenemos el valor de las constantes. Las condiciones de contorno son flecha nula en sendos apoyos. Tras saber el valor de las constantes, se obtiene la ley que rige el comportamiento de la flecha de toda la barra en la ecuación (A.2-7):

$$u_y(x=0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0 \quad (\text{A.2-5})$$

$$u_y(x=L) = 0 \Rightarrow \frac{q}{2EI}\left(\frac{L^4}{6} - \frac{L^4}{12}\right) + C_1L = 0 \Rightarrow C_1 = \frac{qL^3}{24EI} \quad (\text{A.2-6})$$

$$u_y(x) = -\frac{q}{2EI} \left(\frac{x^3 L}{6} - \frac{x^4}{12} \right) + \frac{qL^3}{24EI} x \quad (\text{A.2-7})$$

Sabiendo que, debido a la geometría del problema, el punto de flecha vertical máxima se encuentra en el punto medio de la viga, la flecha máxima queda definida según la ecuación (A.2-8):

$$u_y \left(x = \frac{L}{2} \right) = -\frac{q}{2EI} \left(\frac{x^3 L}{6} - \frac{x^4}{12} \right) + \frac{qL^3}{24EI} x = -\frac{q}{2EI} \left(\frac{L^4}{48} - \frac{L^4}{192} + \frac{L^4}{96} \right) = -\frac{5qL^4}{384EI} = u_{ym\acute{a}x} \quad (\text{A.2-8})$$

Sustituyendo el momento de inercia (A.2-9), la carga y el módulo de Young (A.2-10), se obtiene la flecha máxima teórica según la ecuación (A.2-11):

$$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Pa} \quad (\text{A.2-9})$$

$$I = \frac{1}{12} bh^3 = \frac{0,05 \cdot 0,1^3}{12} = 4,1667 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \quad (\text{A.2-10})$$

$$u_{ym\acute{a}x} = \frac{5 \cdot 25 \cdot 2^4}{384 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 4,1667 \cdot 10^{-6}} = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (\text{A.2-11})$$

Solución mediante MEFI

Para obtener un método más efectivo para el cálculo de la solución analítica, se calcula también mediante el uso del programa MEFI, como muestran las figuras A.2-1, A.2-2 y A.2-3. Al coincidir la solución proporcionada por el programa con la solución analítica, se decide continuar utilizando el programa para obtener la solución analítica y reducir el tiempo invertido.

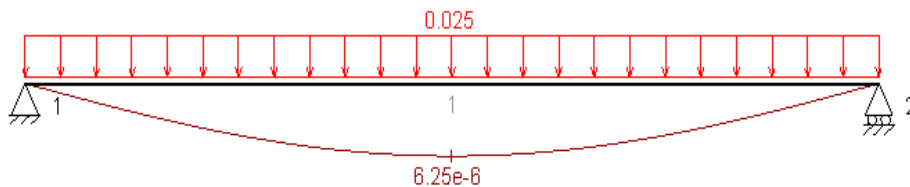


Figura A.2-2

TÍTULO Caso 1: Biapoyado con carga distribuida

PARÁMETROS

```
% par val
L 2.0 % m
H 3.0 % m
E 2e8 % kPa
b 50e-3 % m
h 100e-3 % m
p 25e-3 % kN/m
```

PUNTOS

```
% pun X Y
1 0.0 0.0
2 L 0.0
```

LÍNEAS

```
% lin tipo pun
1 POLINOMIAL 1 2
```

MATERIALES

```
% mat pro1 val1 pro2 val2
1 YOUNG E
```

PROPIEDADES

```
% pro are ine
1 b*h b*h^3/12
```

ELEMENTOS_LÍNEAS

```
% lin tipo mat pro
TODAS RÍGIDO 1 1
```

DESPLAZAMIENTOS_GLOBALES_PUNTOS

```
% pun est DX DY GZ
1 1 0.0 0.0 libre
2 1 libre 0.0 libre
```

CARGAS_GLOBALES_LÍNEAS

```
% lin est tipo pX pY disI disF
1 1 UNIFORME 0.0 -p
```

Figura A.2-3

lín	punIni	punFin	axiIni	axiFin	axiMáx	xAxíMáx	xAxíNu1
			corIni	corFin	corMáx	xCorMáx	xCorNu1
			fleIni	fleFin	fleMáx	xFleMáx	xFleNu1
			desIni	desFin	desMáx	xDesMáx	
1	1	2	0.0000e+00	0.0000e+00			
			2.5000e-02	-2.5000e-02			1.0000e+00
			0.0000e+00	0.0000e+00	1.2500e-02	1.0000e+00	
			0.0000e+00	0.0000e+00	-6.2500e-06	1.0000e+00	

Figura A.2-4

Solución mediante simulación

Para comparar los tres métodos, se realiza la simulación del mismo problema ejemplo mediante un análisis estático en el programa ANSYS para, posteriormente ser comparadas con la solución analítica. De cada método se obtienen soluciones con distintos números de elementos y nodos para estudiar la convergencia a la solución analítica.

Método de tetraedros lineales

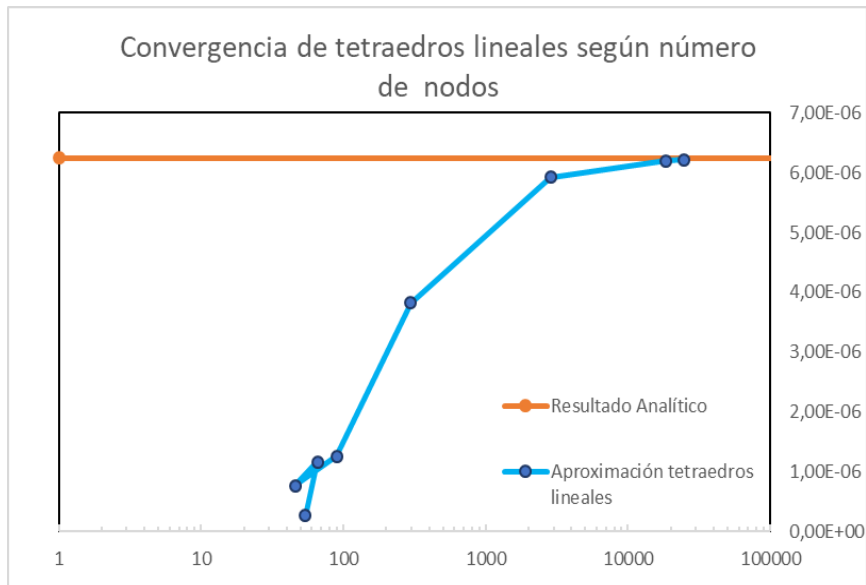


Figura A.2-5

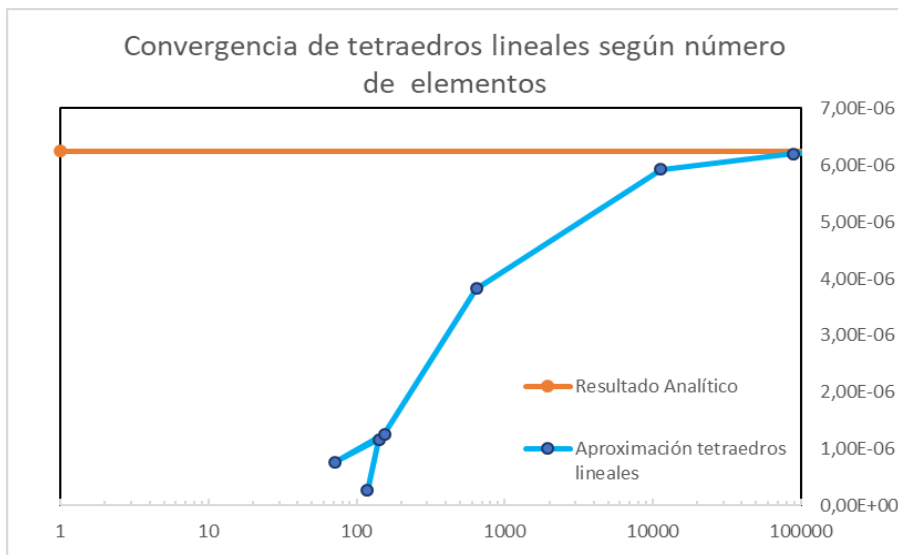


Figura A.2-6

Método de tetraedros cuadráticos

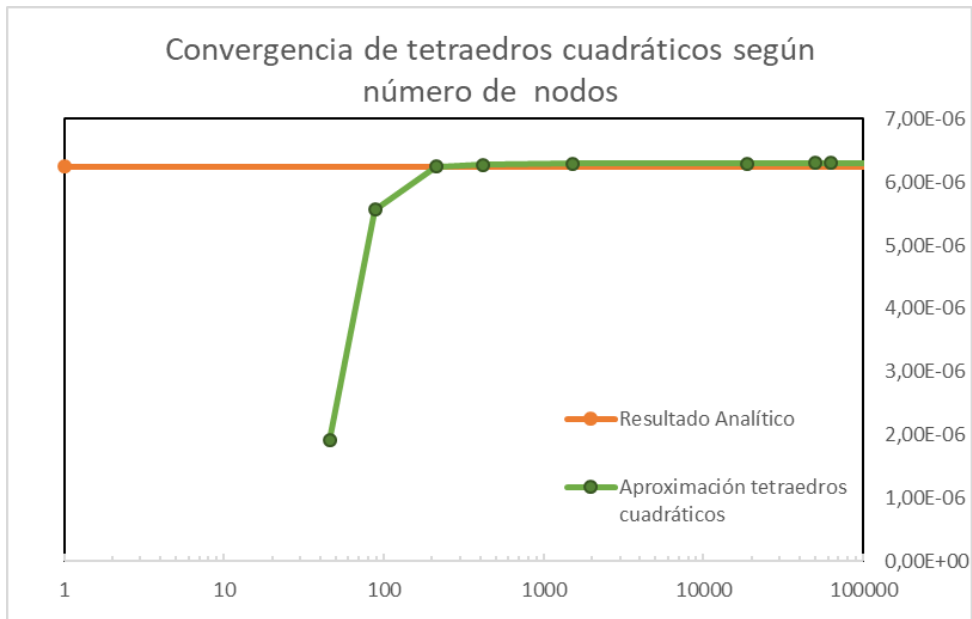


Figura A.2-7

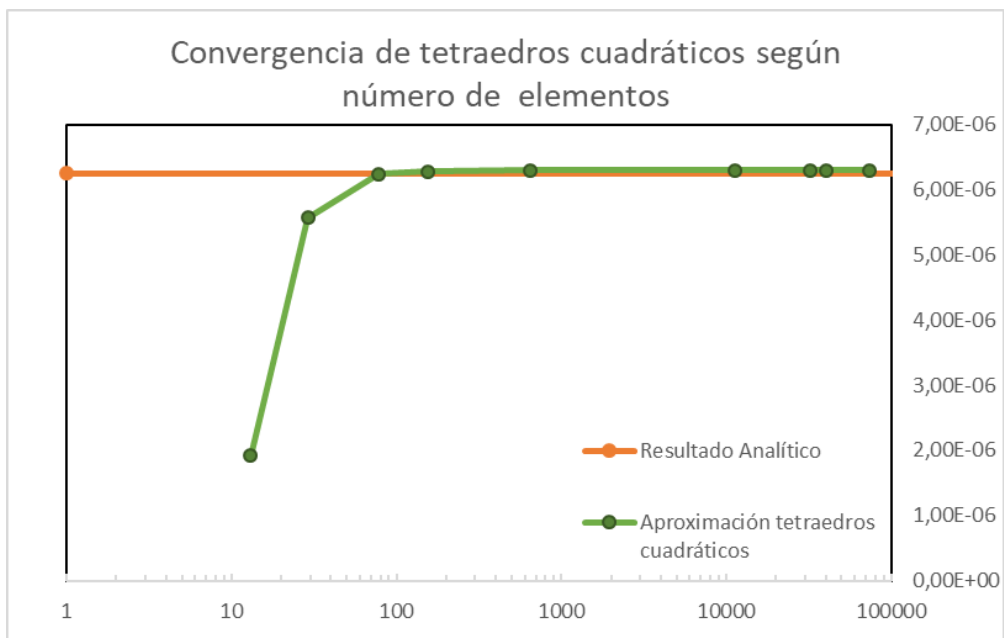


Figura A.2-8

Método de la sección

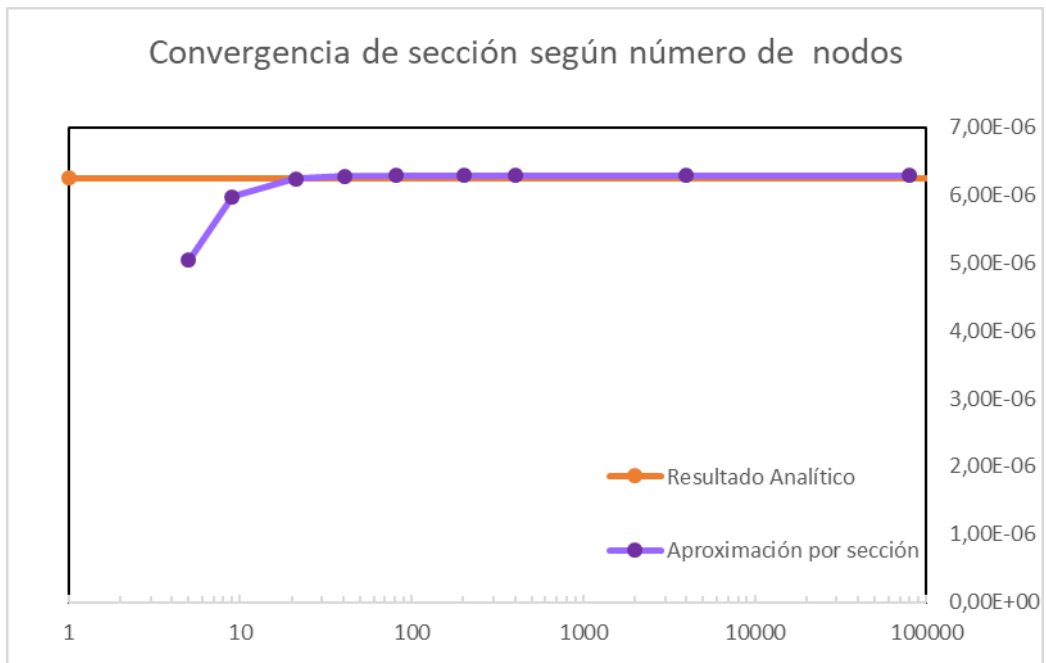


Figura A.2-9

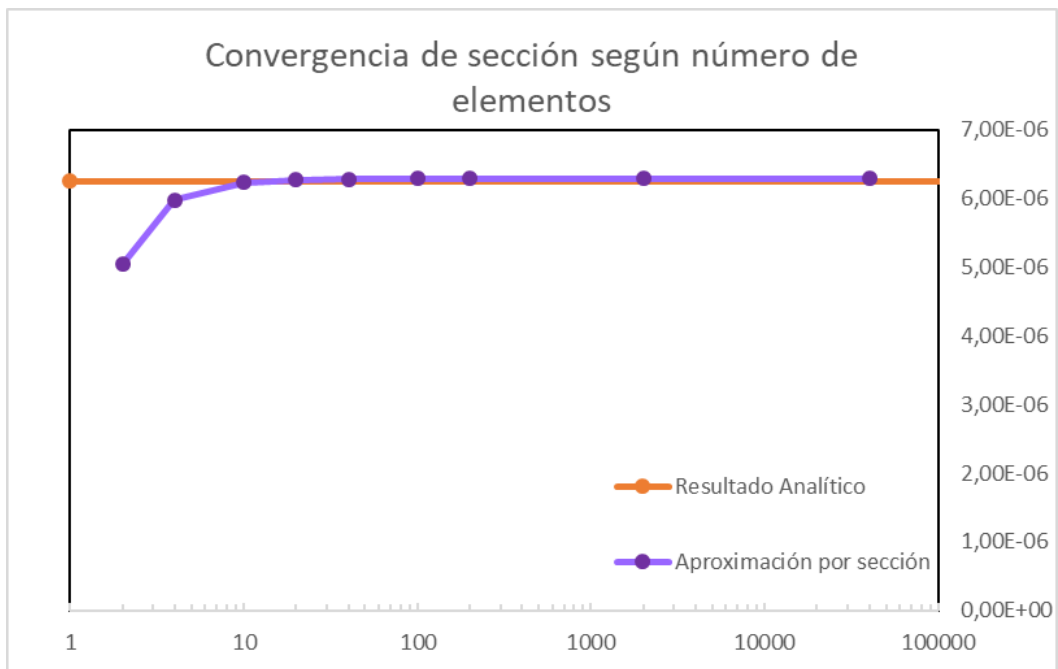


Figura A.2-10

Comparación de error

Para decidir que método usar, se comparan las 3 propuestos, mediante el error respecto a la solución analítica. Primero se define el error como:

$$error_{\%} = \left\| \frac{u_{\text{analítica}} - u_{\text{método}}}{u_{\text{analítica}}} \right\| \cdot 100$$

(A.2-12)

Una vez definido el error se comparan los 3 métodos para el número de elementos y para el número de nodos:

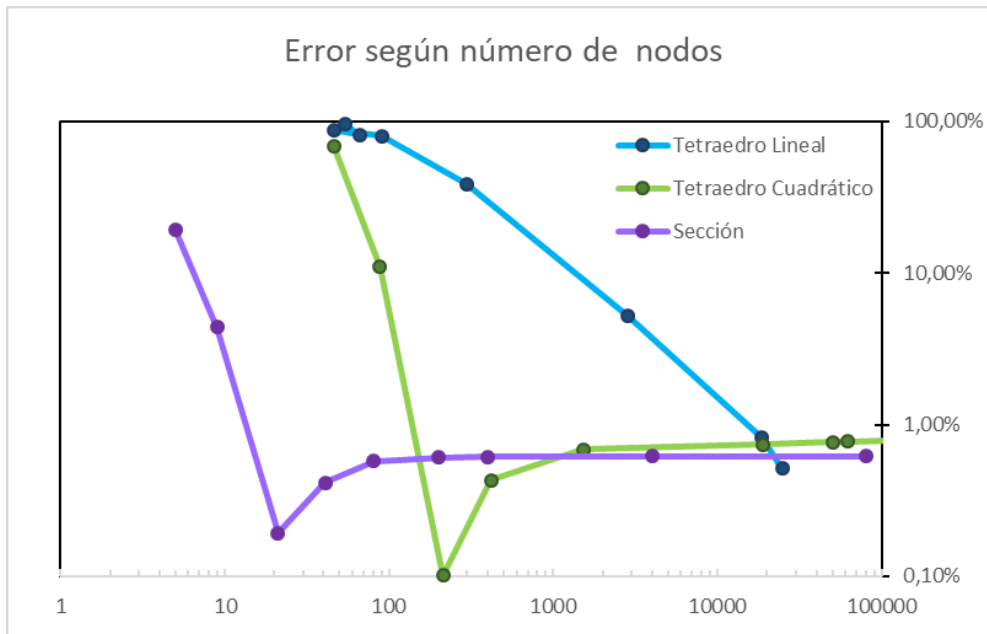


Figura A.2-11

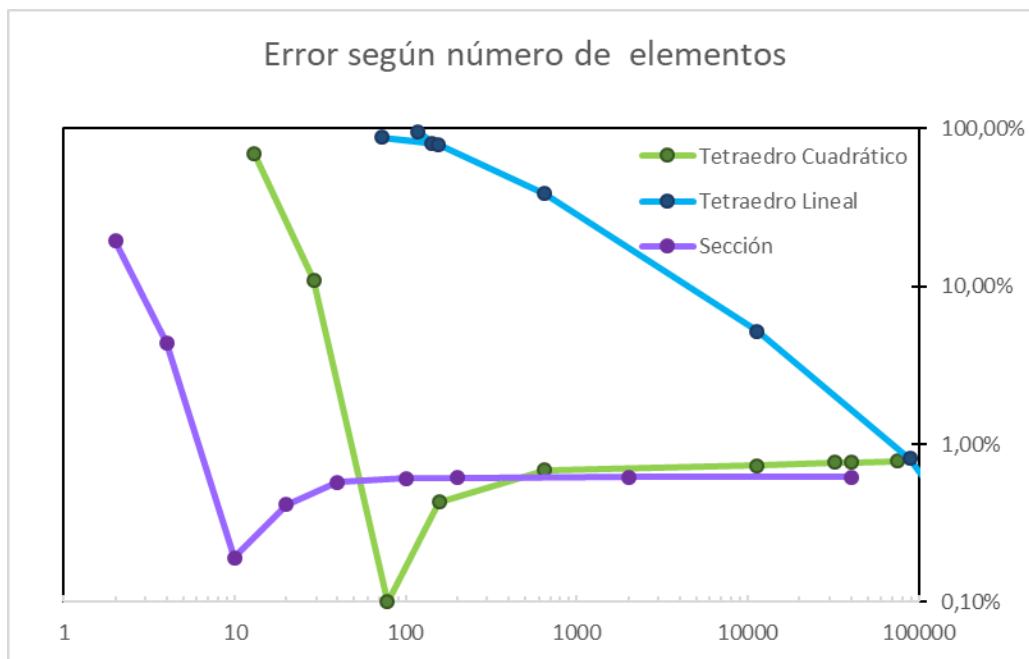


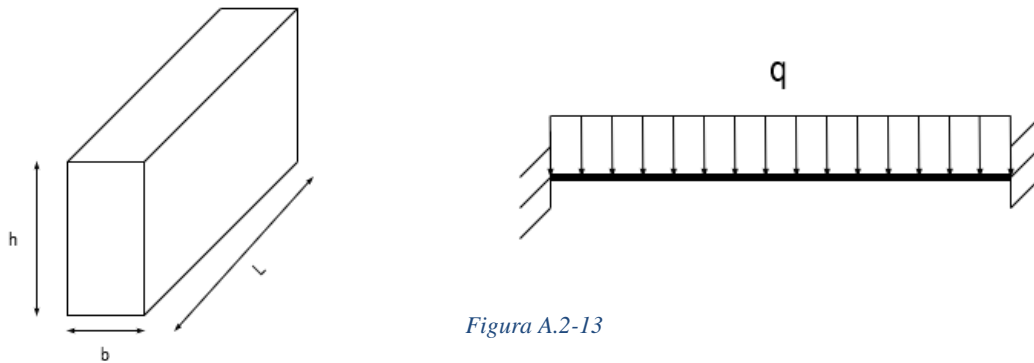
Figura A.2-12

Tabla-resumen de los valores del caso 1

Caso1: viga biapoyada con carga distribuida			Flecha obtenida [mm]			
Número de nodos	Número de elementos	Análítica	Tetraedros Cuadratica	Tetraedros Lineal	Sección	
110262	74203	6,25E-06		6,30E-06		
62227	40333	6,25E-06		6,30E-06		
50167	32289	6,25E-06		6,30E-06		
18745	11322	6,25E-06		6,30E-06		
1525	646	6,25E-06		6,29E-06		
417	156	6,25E-06		6,28E-06		
213	78	6,25E-06		6,24E-06		
88	29	6,25E-06		5,57E-06		
46	13	6,25E-06		1,92E-06		
54	118	6,25E-06			2,67E-07	
66	142	6,25E-06			1,17E-06	
46	72	6,25E-06			7,65E-07	
90	154	6,25E-06			1,26E-06	
296	646	6,25E-06			3,82E-06	
2860	11322	6,25E-06			5,92E-06	
18578	88371	6,25E-06			6,20E-06	
24678	120291	6,25E-06			6,22E-06	
5	2	6,25E-06				5,04E-06
9	4	6,25E-06				5,98E-06
21	10	6,25E-06				6,24E-06
41	20	6,25E-06				6,28E-06
81	40	6,25E-06				6,29E-06
201	100	6,25E-06				6,29E-06
401	200	6,25E-06				6,29E-06
4001	2000	6,25E-06				6,29E-06
80001	40000	6,25E-06				6,29E-06

Tabla A.2-1 Solución tabulada del Caso 1

Caso 2: viga biempotrada con carga distribuida lineal



Con

$$b = 50\text{mm} ; h = 100\text{mm} ; L = 2000\text{mm} ; q = 25\text{N/m}$$

Solución analítica mediante MEFI

Se obtiene la solución analítica mediante un procedimiento homólogo al caso 1, siguiendo las figuras A.2-12, A.2-13 y A.2-14 para obtener la solución analítica mediante el programa de cálculo MEFI.

```
TÍTULO Caso 2: viga biempotrada con carga distribuida
PARÁMETROS
% par val
L 2.0 % m
H 3.0 % m
E 2e8 % kPa
b 50e-3 % m
h 100e-3 % m
p 25e-3 % kN/m
PUNTOS
% pun X Y
1 0.0 0.0
2 L | 0.0
LÍNEAS
% lin tipo pun
1 POLINOMIAL 1 2
MATERIALES
% mat pro1 val1 pro2 val2
1 YOUNG E
PROPIEDADES
% pro are ine
1 b*h b*h^3/12
ELEMENTOS_LÍNEAS
% lin tipo mat pro
TODAS RÍGIDO 1 1
DESPLAZAMIENTOS_GLOBALES_PUNTOS
% pun est DX DY GZ
1 1 0.0 0.0 0.0
2 1 0.0 0.0 0.0
CARGAS_GLOBALES_LÍNEAS
% lin est tipo pX pY disI disF
1 1 UNIFORME 0.0 -p
```

Figura A.2-14

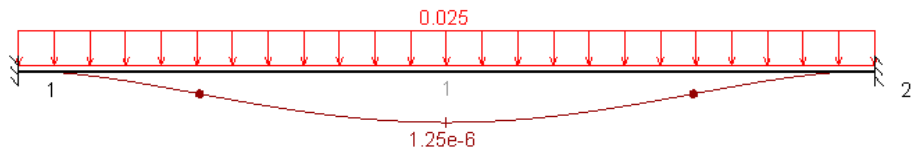


Figura A.2-15

lín	punIni	punFin	axiIni	axiFin	axiMáx	xAximáx	xAxinu1
			corIni	corFin	corMáx	xCorMáx	xCorNu1
			fleIni	fleFin	fleMáx	xFleMáx	xFleNu1
			desIni	desFin	desMáx	xDesMáx	
1	1	2	0.0000e+00	0.0000e+00			
			2.5000e-02	-2.5000e-02			1.0000e+00
			-8.3333e-03	-8.3333e-03	4.1667e-03	1.0000e+00	4.2265e-01
			0.0000e+00	0.0000e+00	-1.2500e-06	1.0000e+00	1.5774e+00

Figura A.2-16

Solución mediante simulación

Método de tetraedros lineales

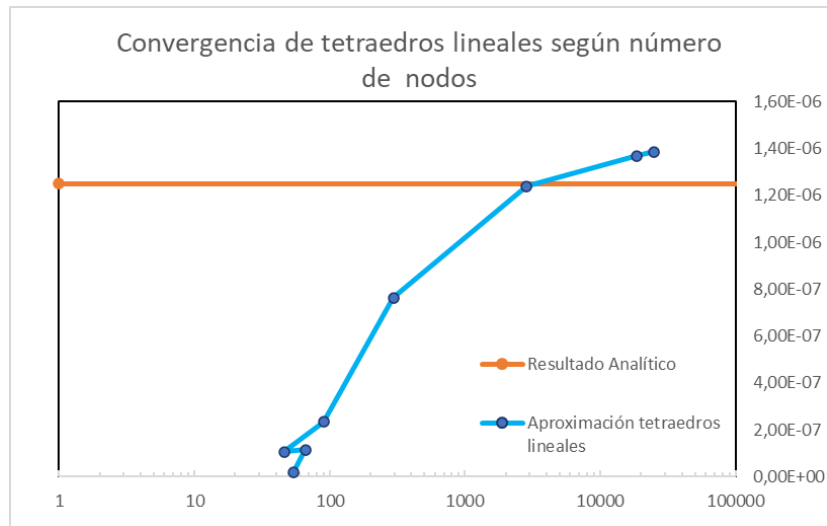


Figura A.2-17

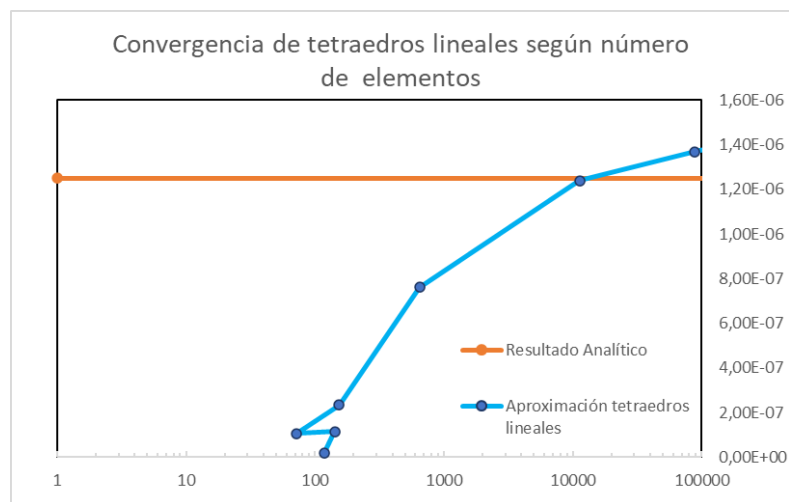


Figura A.2-18

Método de tetraedros cuadráticos

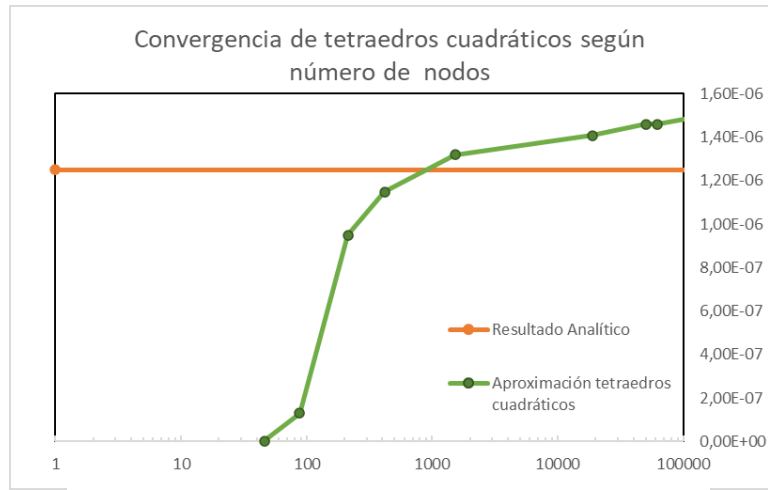


Figura A.2-19

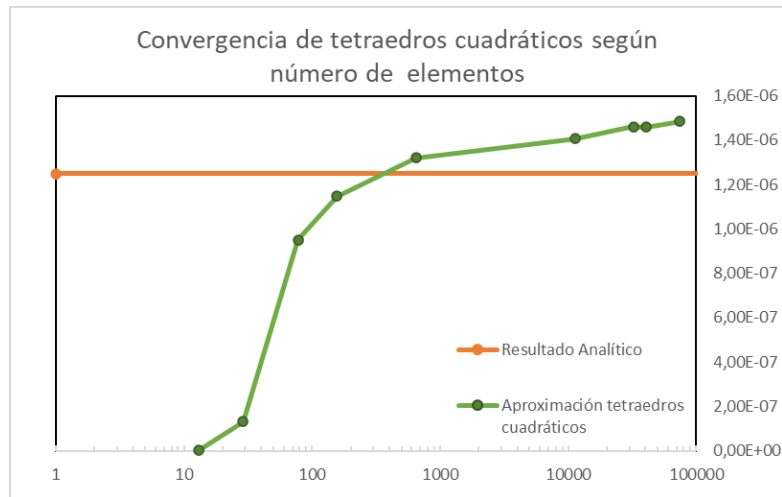


Figura A.2-20

Método de la sección

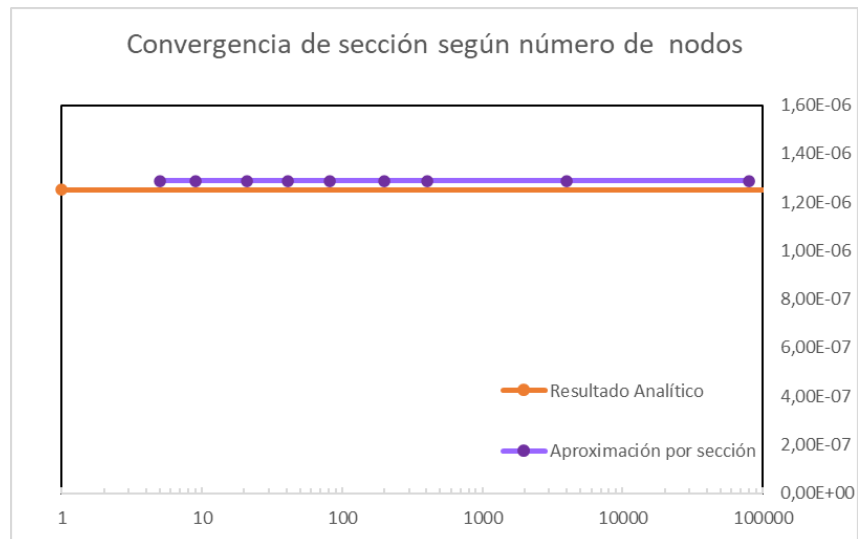


Figura A.2-21

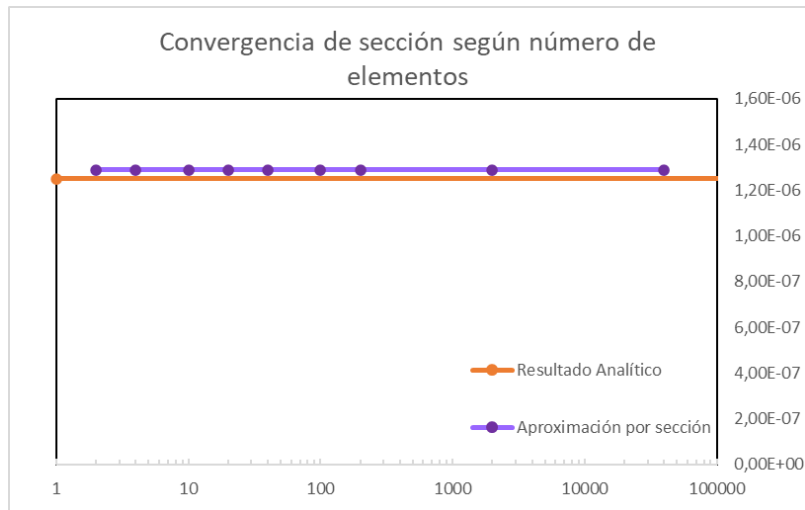


Figura A.2-22

Comparación de error

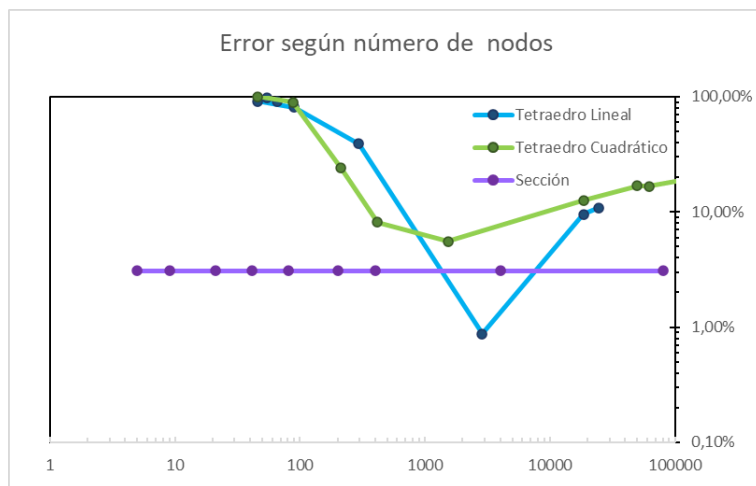


Figura A.2-23

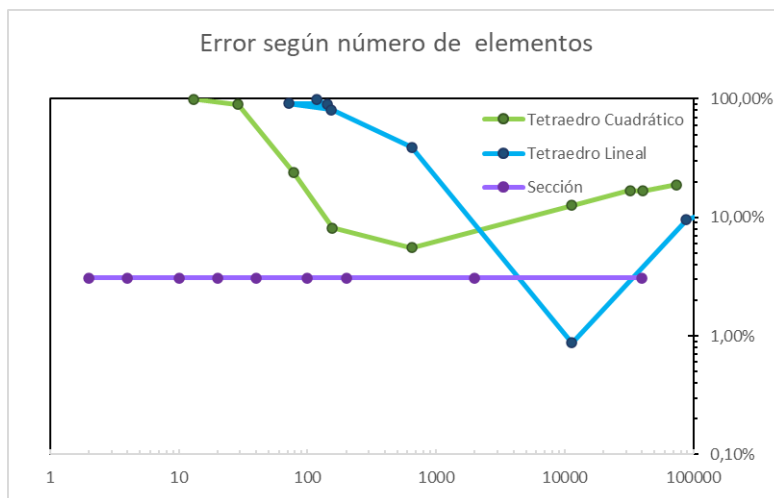


Figura A.2-24

Tabla-resumen de los valores del caso 2

Caso2: viga biempotrada con carga distribuida		Flecha obtenida [mm]			
Número de nodos	Número de elementos	Analítica	Tetraedros Cuadratica	Tetraedros Lineal	Sección
110262	74203	1,25E-06		1,49E-06	
62227	40333	1,25E-06		1,46E-06	
50167	32289	1,25E-06		1,46E-06	
18745	11322	1,25E-06		1,41E-06	
1525	646	1,25E-06		1,32E-06	
417	156	1,25E-06		1,15E-06	
213	78	1,25E-06		9,50E-07	
88	29	1,25E-06		1,31E-07	
46	13	1,25E-06		2,38E-09	
54	118	1,25E-06			1,75E-08
66	142	1,25E-06			1,15E-07
46	72	1,25E-06			1,06E-07
90	154	1,25E-06			2,35E-07
296	646	1,25E-06			7,63E-07
2860	11322	1,25E-06			1,24E-06
18578	88371	1,25E-06			1,37E-06
24678	120291	1,25E-06			1,39E-06
5	2	1,25E-06			1,29E-06
9	4	1,25E-06			1,29E-06
21	10	1,25E-06			1,29E-06
41	20	1,25E-06			1,29E-06
81	40	1,25E-06			1,29E-06
201	100	1,25E-06			1,29E-06
401	200	1,25E-06			1,29E-06
4001	2000	1,25E-06			1,29E-06
80001	40000	1,25E-06			1,29E-06

Tabla A.2-1 Solución tabulada del Caso 2

Caso 3: viga biapoyada con carga puntual en el punto medio

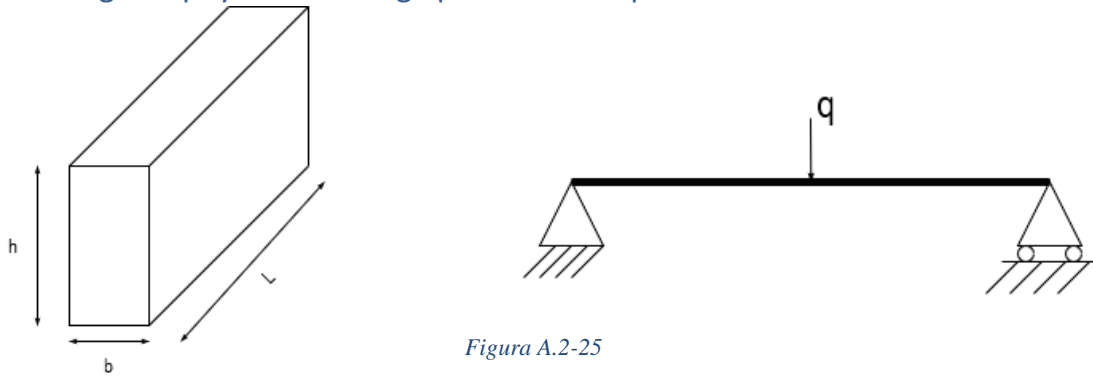


Figura A.2-25

Con

$$b = 50\text{mm} ; h = 100\text{mm} ; L = 2000\text{mm} ; q = 500\text{N}$$

Solución analítica mediante MEFI

Se obtiene la solución analítica mediante un procedimiento homólogo a los casos anteriores, siguiendo las figuras A.2-24, A.2-25 y A.2-26 para obtener la solución analítica mediante el programa de cálculo MEFI.

```

TÍTULO Viga biapoyada con carga puntual|
PARÁMETROS
% par val
L 2.0 % m
H 3.0 % m
E 2e8 % kPa
b 50e-3 % m
h 100e-3 % m
M 0 % kNm
p 0.5 % kN

PUNTOS
% pun X Y
1 0.0 0.0
2 L 0.0
3 L/2 0.0

LÍNEAS
% lin tipo pun
1 POLINOMIAL 1 3
2 POLINOMIAL 3 2

MATERIALES
% mat pro1 val1 pro2 val2
1 YOUNG E

PROPIEDADES
% pro are ine
1 b*h b*h^3/12

ELEMENTOS_LÍNEAS
% lin tipo mat pro
TODAS RÍGIDO 1 1

DESPLAZAMIENTOS_GLOBALES_PUNTOS
% pun est DX DY GZ
1 1 0.0 0.0 libre
2 1 libre 0.0 libre

CARGAS_GLOBALES_PUNTOS
% pun est FX FY MZ
3 1 0 -p 0
    
```

Figura A.2-26

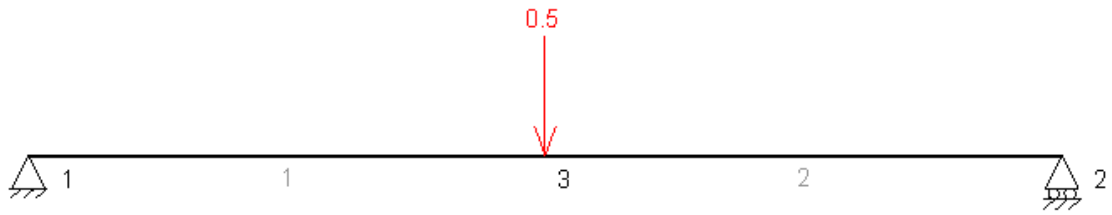


Figura A.2-27

lín	punIni	punFin	axiIni	axiFin
1	1	3	0.0000e+00	0.0000e+00
			2.5000e-01	2.5000e-01
			0.0000e+00	2.5000e-01
			0.0000e+00	-1.0000e-04
2	3	2	0.0000e+00	0.0000e+00
			-2.5000e-01	-2.5000e-01
			2.5000e-01	0.0000e+00
			-1.0000e-04	0.0000e+00

Figura A.2-28

Solución mediante simulación

Método de tetraedros lineales

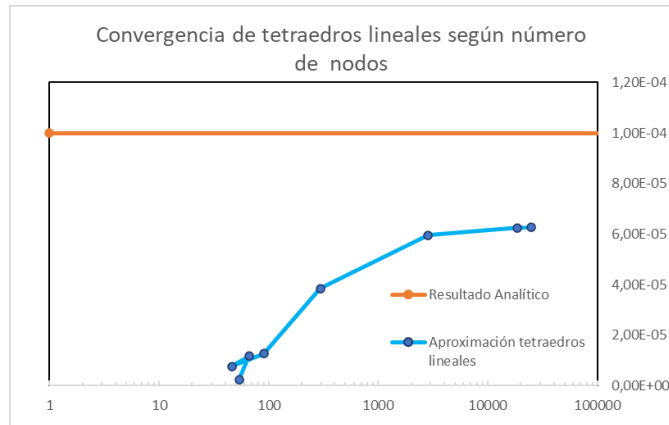


Figura A.2-29

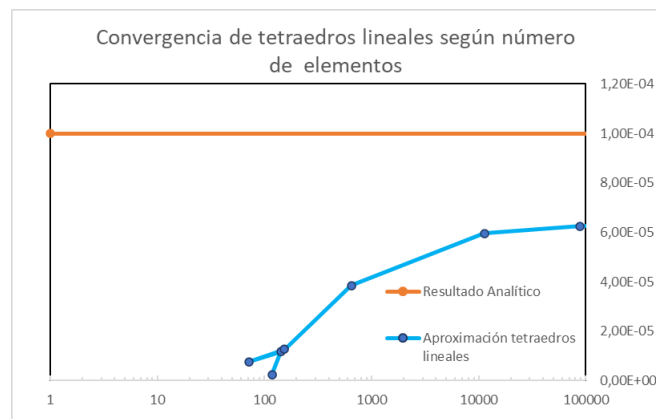


Figura A.2-30

Método de tetraedros cuadráticos

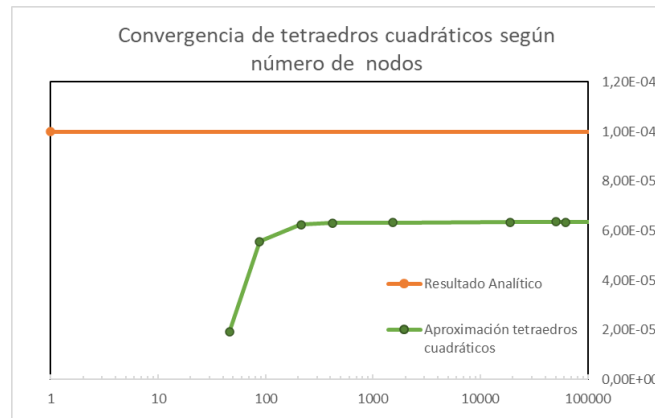


Figura A.2-31

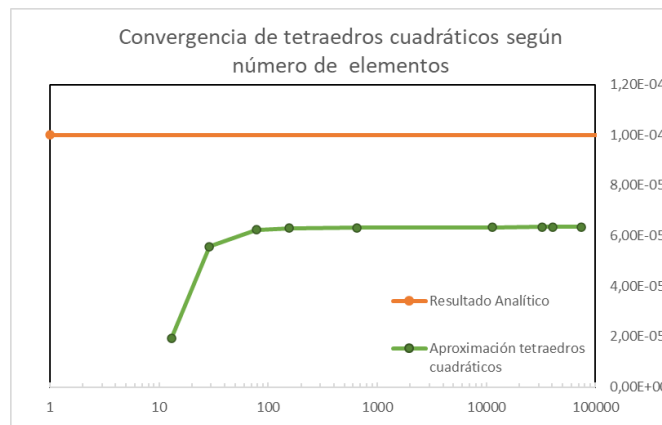


Figura A.2-32

Método de la sección

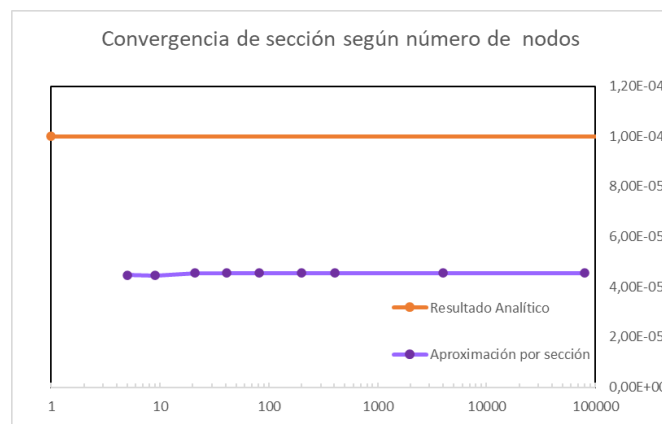


Figura A.2-33

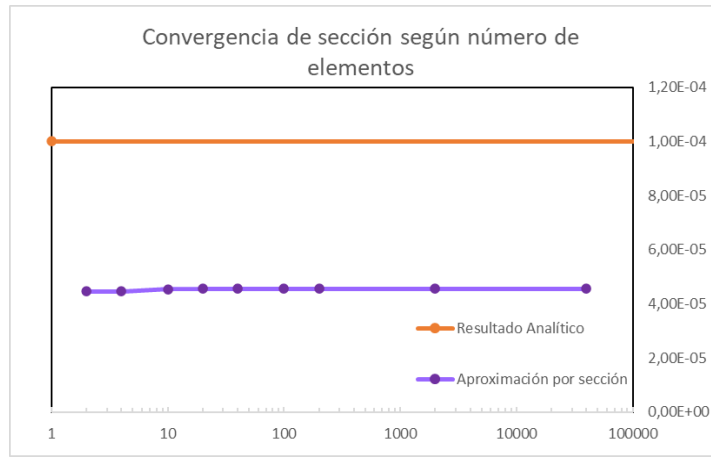


Figura A.2-34

Comparación de error

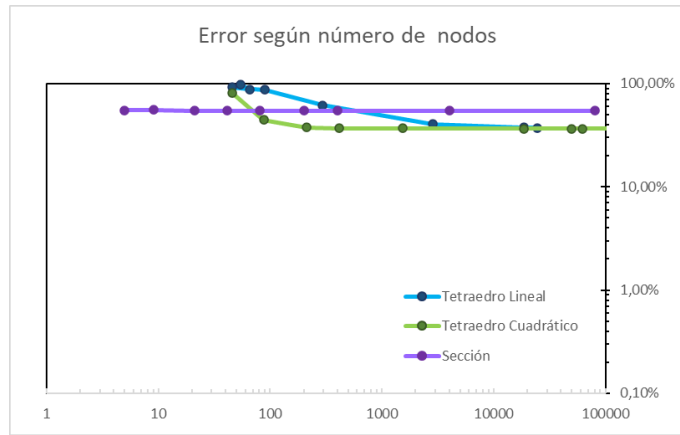


Figura A.2-35

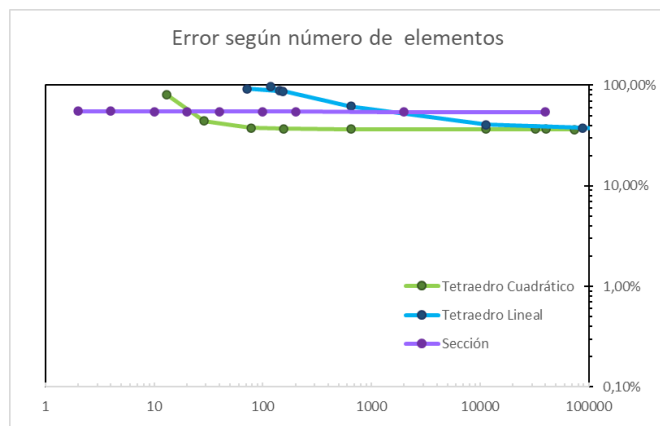


Figura A.2-36

Tabla-resumen de los valores del caso

Caso3: viga biapoyada con carga puntual			Flecha obtenida [mm]			
Número de nodos	Número de elementos	Analítica	Tetraedros Cuadratica	Tetraedros Lineal	Sección	
110262	74203	1,00E-04		6,36E-05		
62227	40333	1,00E-04		6,35E-05		
50167	32289	1,00E-04		6,35E-05		
18745	11322	1,00E-04		6,34E-05		
1525	646	1,00E-04		6,32E-05		
417	156	1,00E-04		6,30E-05		
213	78	1,00E-04		6,24E-05		
88	29	1,00E-04		5,57E-05		
46	13	1,00E-04		1,92E-05		
54	118	1,00E-04			2,49E-06	
66	142	1,00E-04			1,17E-05	
46	72	1,00E-04			7,66E-06	
90	154	1,00E-04			1,27E-05	
296	646	1,00E-04			3,84E-05	
2860	11322	1,00E-04			5,95E-05	
18578	88371	1,00E-04			6,25E-05	
24678	120291	1,00E-04			6,27E-05	
5	2	1,00E-04			4,46E-05	
9	4	1,00E-04			4,46E-05	
21	10	1,00E-04			4,55E-05	
41	20	1,00E-04			4,55E-05	
81	40	1,00E-04			4,55E-05	
201	100	1,00E-04			4,55E-05	
401	200	1,00E-04			4,55E-05	
4001	2000	1,00E-04			4,55E-05	
80001	40000	1,00E-04			4,55E-05	

Tabla A.2-1 Solución tabulada del Caso 2

Anexo 3: Propiedades químicas de los aceros estudiados

Valores máximos de cada elemento en % en peso							
Metal	C	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V
15CDV6	0,18%	1,10%	0,00%	0,00%	1,50%	1,00%	0,30%
T45	0,25%	1,70%	0,00%	0,40%	0,25%	0,10%	0,00%
4130	0,33%	0,60%	0,35%	0,25%	1,10%	0,25%	0,00%
25CRMO4	0,29%	0,90%	0,00%	0,00%	1,20%	0,30%	0,00%

Tabla A.3-1 Propiedades químicas de los aceros estudiados