



Universidad
Carlos III de Madrid

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO MEDIANTE EL MEF DEL COMPORTAMIENTO DEL CHASIS DE UN VEHÍCULO DE CALLE

Autor: Ignacio Mota González.

Tutor: Alejandro Quesada González

Leganés, Octubre de 2015

Resumen.

El presente proyecto define el comportamiento del chasis de un vehículo de calle frente a diferentes situaciones dinámicas a las que se tendrá que enfrentar durante su uso. Se parte del chasis del vehículo sometido a estudio y se representa en el entorno del programa utilizado. Para probar y verificar su correcto comportamiento se hace uso del método de los elementos finitos, introduciendo las restricciones propias de cada situación. Finalmente se valoran y discuten los resultados obtenidos.

Los datos y las simulaciones incluidas en este proyecto están encaminados a la obtención de un resultado lo más próximo posible a la realidad, valorando las posibles simplificaciones sobre el modelo base y justificándolas en los casos en las que han sido realizadas.

Inicialmente se definen una serie de conceptos previos acerca de los chasis y se valora, dentro de los tipos existentes, el más adecuado para su estudio a través de ANSYS.

Se representa en el entorno gráfico del programa el chasis sometido a estudio, poniendo especial atención a la selección del elemento más oportuno. También se presentan los problemas y soluciones llevadas a cabo durante el proceso, y se procede al mallado del modelo.

Finalmente se realizan las simulaciones de los distintos casos que ocupan el proyecto. En primer lugar se expone de forma detallada todo el proceso necesario antes de resolver el caso, justificando cada una de las decisiones tomadas, y en los casos necesarios, comparando las posibilidades presentes. Seguidamente se procede a la resolución de cada caso, realizando un estudio individual y en el que se exponen tanto los resultados obtenidos como una valoración de estos.



Abstract.

The present project defines the behavior of a road-vehicle chassis in different dynamic situations that it will have to withstand when in use. It begins with the representation on the selected simulation software of the vehicle chassis that is under study. The finite element method is applied to test and to verify its proper functional behavior, introducing the specific restrictions for each situation. Finally, the results are assessed and discussed.

The data and the simulations included in this project are intended to yield a result that is as close as possible to reality, evaluating possible simplifications with the basic model and justifying those in cases in which they have been applied.

Initially, a series of previous concepts are defined and the most suitable one from among the existing types is evaluated, for study on ANSYS.

The chassis that is under study is represented in the graphic environment of the simulation software, placing special attention on the selection of the most optimal component. The problems and solutions are also presented that are carried out during the process, and the mesh of the model is then generated.

Finally, the simulations of the different cases under consideration in the project are performed. In the first place, a detailed explanation is given of the whole process that is needed to resolve the case, justifying each decision that was taken, and in each case where necessary, comparing the available possibilities. Subsequently, the solution to each case is established and an individual study is completed, in which the results and their assessment are explained.



Índice

Índice de figuras.....	6
1. Introducción.....	10
1.1 Ámbito y justificación.....	10
1.2 Fases del proyecto.....	11
1.3 Estructura del trabajo.....	12
2. Objetivos.	14
3. El chasis en un vehículo.	16
3.1. Definición	16
3.2 Historia de los chasis.....	17
3.3 Tipos de chasis.....	18
3.4 Materiales empleados.....	20
3.5 Marca y modelo escogido para el estudio	22
4. Modelado del chasis.....	23
4.1. Introducción al software utilizado. ANSYS 15.0.....	23
4.1.1. Representación gráfica en ANSYS 15.0	24
4.1.2. Cálculo estructural mediante MEF en ANSYS 15.0.....	24
4.2. Elaboración del modelo.....	25
4.2.1. Fases en la elaboración del modelo	26
4.2.1.1 Tipo de elemento seleccionado.	26
4.2.1.2 Material utilizado	28
4.2.1.3. Secciones presentes.....	29
4.2.1.4 Representación gráfica.....	30
4.3 Mallado del modelo.....	41
4.3.1. Asignación de secciones.....	41
4.3.2. Mallado.....	42
4.4 Dificultades encontradas.....	44
5. Análisis del modelo.	45
5.1. Datos de partida.....	45
5.1.1. Motor y situación en el chasis.....	45
5.1.2. Piloto y situación en el chasis.....	47
5.1.3. Centro de gravedad y peso del chasis en vacío.....	47



5.2. Justificación de las simulaciones.....	49
5.2.1. Consideraciones previas.....	49
5.2.2 Simulación1: Aceleración.....	56
5.2.3 Simulación 2: Frenada.....	62
5.2.4 Simulación 3: Paso por curva a derecha.....	66
5.2.5 Simulación 4: Paso por curva a izquierda.....	70
5.2.6 Simulación 5: Torsión.....	72
5.2.7 Simulación 6: Fatiga.....	74
5.3 Resultados obtenidos.....	81
5.3.1 Simulación 1: Aceleración.....	81
5.3.2 Simulación 2: Frenada.....	84
5.3.3 Simulación 3: Paso por curva a derecha.....	87
5.3.4 Simulación 4: Paso por curva a izquierda.....	90
5.3.5 Simulación 5: Torsión.....	93
5.3.6. Simulación 6: Fatiga.....	96
6. Fabricación.....	99
6.1 Material utilizado.....	99
6.2 Corte del material.....	99
6.3 Curvado de secciones circulares.....	100
6.4 Soldadura y montaje.....	101
6.5 Granallado e imprimaciones.....	103
7. Presupuesto.....	105
8. Conclusiones.....	108
9. Propuestas de mejora y futuras líneas de trabajo.....	110
10. Referencias bibliográficas.....	112
11. Anexos.....	114



Índice de figuras.

Figura 1: Caterham Seven 360 [4]	10
Figura 2: Chasis Jaguar C-Type y sus componentes mecánicos. [9]	16
Figura 3: Carrocería autoportante Porsche 911 2010 [10]	17
Figura 4: Chasis tipo cercha Mercedes 300SL [11]	19
Figura 5: Bastidor aluminio Audi A8 con la tecnología ASF. [12]	21
Figura 6: Chasis de fibra de carbono empleado en el Porsche 918 Spyder [13]	21
Figura 7: Superposición del chasis en la carrocería.	22
Figura 8: Geometría del chasis sometido a estudio.	25
Figura 9: Elemento BEAM.....	27
Figura 10: Elemento Tipo SHELL.....	27
Figura 11: Ventana de ANSYS para la selección del tipo de elemento.	28
Figura 12: Composición química acero ST52 DIN 2391.....	28
Figura 13: Propiedades mecánicas acero ST52 DIN 2391	28
.....	28
Figura 14: Ventanas de introducción de datos del material.	29
Figura 15: Ventana de creación y modificación de secciones.....	30
Figura 16: Detalle de la parte delantera del chasis.	31
Figura 15: Ventana de creación de keypoints a través de sus coordenadas en el sistema de coordenadas activo.	32
Figura 18: Detalle creación líneas perpendiculares y con un ángulo determinado.	33
Figura 19: Detalle creación perfiles circulares.	34
Figura 16: Detalle de diferentes barras presentes.	35
Figura 21: Comparativa de creación de áreas a través del comando Extrude y el comando Arbitrary.	36
Figura 22: Detalle zona posterior chasis.	37
Figura 23: Comparativa uniones.	38
Figura 24: Problema de múltiples líneas en una unión.....	39
Figura 25: Unión múltiple correctamente modelizada.	40
Figura 26: Diferentes secciones presentes en el modelo de chasis.	41
Figura 27: Número de elementos deformados presentes en la malla.....	42
Figura 28: Detalle del mallado en la zona del puente de transmisión del chasis.	43
Figura 29: Motor DURATEC 2.0 presente en el vehículo escogido.[14].....	45
Figura 30: Situación del motor y sus anclajes en el chasis.[15]	46
Figura 31: Esquema de la posición de los anclajes del motor.....	46
Figura 32: Esquema de la disposición de los anclajes del asiento del piloto en el chasis.....	47
Figura 33: Datos de masa total y centro de gravedad reflejados por ANSYS.	48
Figura 34: Posición centro de gravedad plano YZ	48
Figura 35: Posición centro de gravedad plano XZ.	49
Figura 36: Ejemplo de introducción de restricciones en áreas.	50
Figura 37: Ejemplo de introducción de los componentes de aceleración.	50
Figura 38: Restricción vertical situada en un área.	51



Figura 39: Deformada obtenida con imposición de restricción vertical en área.	52
Figura 40: Deformada obtenida con imposición de restricción vertical sobre línea vertical.....	53
Figura 41: Ventana de elección de elemento MASS21.	54
Figura 42: Ventana de introducción de datos de la RealConstant.....	55
Figura 43: Detalle de la creación de una masa puntual.	56
Figura 44: Dirección y sentido de la aceleración global en el caso de aceleración.....	58
Figura 45: Detalle de las restricciones longitudinales del eje trasero.....	59
Figura 46: Detalle zonas de anclaje de los brazos de la suspensión delantera.....	60
Figura 47: Detalle zonas de anclaje de los brazos de la suspensión trasera.....	60
Figura 48: Restricciones y aceleración presentes en el caso de Simulación1: Aceleración.....	61
Figura 49: Superposición diferentes casos de restricciones longitudinales en el caso de frenada.	62
Figura 50: Detalle de los anclajes de los brazos de suspensión del eje delantero en el chasis.[16]	63
Figura 51: Disposición inicial de las restricciones longitudinales en los puntos de anclaje. (Caso frenada).....	64
Figura 52: Deformada resultante de la imposición de las restricciones longitudinales en los cuatro anclajes.	64
Figura 53: Deformada resultante tras solventar el problema con la última de las soluciones propuestas.....	65
Figura 54: Disposición final de las restricciones y aceleración presentes en el caso Simulación2: Frenada.	66
Figura 55: Detalle de las restricciones laterales iniciales en ambos ejes.....	67
Figura 56: Comparativa de deformadas en paso por curva a derecha.	68
Figura 57: Detalle travesaños en la simulación de frenada con la disposición inicial de restricciones.	69
Figura 58: Detalle travesaños en la simulación de frenada con la solución propuesta.	69
Figura 59: Restricciones y aceleración presentes en el caso de Simulación 3: paso por curva a derecha.....	70
Figura 60: Restricciones y aceleración presentes en el caso de Simulación 4: paso por curva a izquierda.....	71
Figura 61: Restricciones nodales presentes en el caso de Simulación 5: Torsión.....	73
Figura 62: Chasis trabajando a torsión.....	74
Figura 63: Curva S-N característica. [5]	75
Figura 64: Detalle de la ventana de escritura de los diferentes estados de carga.	77
Figura 65: Detalle ventana de solución a través de ficheros .s.....	78
Figura 66: Ventana de introducción de la tabla S-N.....	78
Figura 67: Ejemplo de introducción de localización nodal para su cálculo a fatiga.....	79
Figura 68: Detalle de la ventana de introducción de evento y estado de carga asociado a cada localización.	80
Figura 69: Detalle ventana de cálculo a fatiga en el nodo seleccionado.	81
Figura 70: Representación de la deformada perteneciente al caso de aceleración y el cuerpo del chasis inicial.....	82



Figura 71: Valores de la tensión de Von Mises en el chasis sometido a aceleración.	82
Figura 72: Representación de la componente Z de tensión en el caso de aceleración.	83
Figura 73: Representación del desplazamiento total del chasis en el caso de aceleración.....	84
Figura 74: Deformada del chasis correspondiente al caso de frenada.	85
Figura 75: Representación de la distribución de valores de tensión de Von Mises en el chasis.85	
Figura 76: Representación de los valores de la componente Z de tensión en el chasis en el caso de frenada.	86
Figura 77: Representación del desplazamiento total del chasis en el caso de frenada.....	87
Figura 78: Deformada del chasis en la simulación de paso por curva a derecha. Vista en perspectiva.	88
Figura 79: Deformada y cuerpo inicial del chasis en el caso de paso por curva a derecha.	88
Figura 80: Representación de los valores de tensión de Von Mises en la estructura.	89
Figura 81: Representación del vector global de desplazamiento para el caso de paso por curva a derecha.....	90
Figura 82: Deformada resultante del paso por curva a izquierda. Vista en perspectiva.	90
Figura 83: Deformada resultante del paso por curva a izquierda.....	91
Figura 84: Representación del valor de tensión de Von Mises en el caso de paso por curva a izquierda.....	91
Figura 85: Representación del vector global de desplazamiento del chasis para el caso de paso por curva a izquierda.....	92
Figura 86: Detalle del valor de la reacción vertical del nodo con restricción impuesta.	94
Figura 87: Representación de los desplazamientos verticales UY en el caso de Torsión.	95
Figura 88: Representación de los valores de tensión de Von Mises en el chasis para el caso de Torsión.....	95
Figura 89: Resultado del ensayo a fatiga para la localización 1.	97
Figura 90: Resultado del ensayo a fatiga en la localización 3.	97
Figura 91: Resultado del ensayo a fatiga en la localización2.	98
Figura 92: Resultado del ensayo a fatiga en la localización 4.	98
Figura 93: Resultado del ensayo a fatiga en la localización 5.	98
Figura 17: Máquina automática de corte por aserrado para perfiles de acero.....	100
Figura 95: Máquina de curvado por rodillos para perfiles de acero.....	101
Figura 96: Esquema de la soldadura TIG.	102
Figura 97: Esquema de soldadura MIG/MAG.	102



Índice de tablas.

Tabla 1: Especificaciones del Caterham 360.	22
Tabla 2: Unidades empleadas.	26
Tabla 3: Diferentes secciones presentes en la geometría.	30
Tabla 4: RealConstant para cada masa externa considerada.	54
Tabla 5: Características de fatiga del material.[5]	76
Tabla 6: Tabla de estados de carga para el cálculo a fatiga.	76
Tabla 7: Estados de carga y eventos en fatiga.	96
Tabla 8: Secciones presentes en la geometría y precio por metro.	105
Tabla 9: Coste de materiales del chasis.	106
Tabla 10: Costes de fabricación del chasis.	107
Tabla 11: Costes de ingeniería.	107
Tabla 12: Coste total del proyecto.	107



1. Introducción.

1.1 Ámbito y justificación.

Este proyecto se enmarca dentro del área de ingeniería mecánica, rama del conocimiento y profesión que se ocupa de idear, diseñar, analizar, fabricar, construir y mantener máquinas, instalaciones y plantas industriales, o partes de ellas [17]. Es por tanto un reflejo de la pasión y entusiasmo por esta especialidad, en la cual se han ido adquiriendo conocimientos de forma progresiva durante el grado, y concretamente centrado en el mundo del automóvil, un sector apasionante desde el punto de vista personal y que además juega un papel fundamental en la industria a nivel nacional e internacional.

Son muchas y variadas las distintas áreas en las que se podría profundizar en lo relacionado a la mecánica en un automóvil, todos sus elementos pueden ser objeto de un estudio exhaustivo para su mejora o simplemente análisis. En la actualidad los programas informáticos de simulación son utilizados en una amplia variedad de problemas ingenieriles y su manejo es altamente valorado. Teniendo en cuenta estas dos premisas, se decidió afrontar el análisis de una de las partes más importantes de todo automóvil, su chasis o bastidor.

El diseño y cálculo estructural de los vehículos modernos es complejo y a menudo necesita de software complicado de manejar, y tiene que ser llevado a cabo por usuarios expertos. Por tanto, la decisión de qué automóvil utilizar para su diseño y posterior estudio no fue sencilla.



Figura 1: Caterham Seven 360 [4]

El modelo escogido finalmente es el presentado en la figura 1, permitía afrontar un estudio con herramientas conocidas y a la vez poner en práctica los conocimientos adquiridos durante el grado. El trabajo se centra principalmente en conocimientos puramente mecánicos, y profundiza notablemente en el método de los elementos finitos, el cual es la base del programa de simulación utilizado, no obstante, también es necesaria una labor de investigación para conseguir planos sobre los que posteriormente trabajar, o simplemente conocer la disposición de distintos elementos mecánicos como la suspensión o el motor, pues los diferentes fabricantes no disponen al público en general las dimensiones de los chasis de sus diversos modelos, la situación de los múltiples anclajes, ni por supuesto los resultados de los métodos de estudio estructural de estos.

Es un proyecto que supone una gran cantidad de horas empleadas en un mismo programa, y requiere de la posterior interpretación de los datos que éste refleja. También se necesita un conocimiento extra del modelo escogido, que requiere de investigación o directamente del contacto con algún propietario, lo que a menudo resulta complicado.

No obstante permite una primera aproximación a un estudio más detallado de los automóviles, que unido a la pasión por el tema tratado, hace encontrar la satisfacción en el trabajo.

1.2 Fases del proyecto.

La consecución de los objetivos mencionados, se alcanza completando las siguientes fases:

- 1-Búsqueda de modelos de automóvil y sus correspondientes planos, así como diferente información bibliográfica.
- 2-Interpretación y comprensión de los planos.
- 3-Modelado del chasis con ANSYS.
- 4-Simulación, usando el método de los elementos finitos, de la geometría mediante ANSYS para los diferentes casos propuestos.
- 5-Interpretación de los resultados y conclusiones.



1.3 Estructura del trabajo.

En este documento se presentan once capítulos:

1. **Introducción:** en este primer capítulo se presenta el proyecto realizado, situándolo en su ámbito de trabajo. Finalmente también se disponen las diferentes fases del proyecto llevadas a cabo.
2. **Objetivos:** Se presentan los objetivos que se persiguen con la realización del presente trabajo.
3. **El chasis en un vehículo:** este segundo capítulo pretende, de forma simplificada, establecer una serie de conocimientos generales sobre los chasis, sus tipos y los materiales en ellos utilizados. Además incluye el modelo escogido para el análisis y modelado, donde se detalla de forma esquemática y a modo de referencia rápida para el resto del documento, datos como material, peso y diferentes características geométricas.
4. **Modelado del chasis:** engloba todo lo relacionado con el módulo Preprocessor de ANSYS para representar y caracterizar el chasis sometido a estudio. Comienza con una breve introducción al método de los elementos finitos cuyo objetivo es situar los conceptos básicos de dicho método e introducir alguna de las variables que pueden ser elegidas en el programa. A continuación, se presentan cada uno de los pasos necesarios para representar el modelo a la vez que se indican los errores más comunes y se propone solución para estos. Finaliza con un resumen de las dificultades encontradas durante el proceso y de cómo estas fueron solventadas.
5. **Análisis del modelo:** Es el capítulo de mayor tamaño y por tanto uno de los de mayor importancia en la memoria. Comienza introduciendo una serie de datos de partida que han de ser conocidos y considerados en los apartados que le siguen. Dichos apartados son los siguientes: en primer lugar se sitúa un apartado que presenta un conjunto de consideraciones previas válidas para todas las simulaciones que han sido llevadas a cabo, y en los siguientes se justifican las diferentes simulaciones realizadas, como han sido llevadas a cabo y los problemas que han de ser considerados.
A continuación se presentan los resultados obtenidos de estas simulaciones, valores de tensión, desplazamientos y otras representaciones particulares serán presentadas aquí e igualmente justificadas.
6. **Fabricación:** En este apartado se incluye todo lo relacionado con la fabricación final del chasis. Partiendo del material usado, se presentan los métodos de corte y curvado necesarios para obtener los perfiles requeridos. A continuación se presenta una de las fases más importantes de este apartado, la soldadura, aportando información sobre las dos técnicas más usadas así como una breve reseña sobre métodos de inspección de fallos. Por último se indican una serie de consideraciones a tener en cuenta sobre el montaje final.
7. **Presupuesto:** En este apartado se presenta un presupuesto orientativo sobre los trabajos realizados en la presente memoria.



8. **Conclusiones:** Se presentan las conclusiones generales sobre el presente trabajo
9. **Propuestas de mejora y futuras líneas de trabajo:** Se presentan una serie de propuestas de mejora sobre ese modelo base, que tienen como objetivo alcanzar un mayor grado de perfeccionamiento en el análisis o mejorar características dinámicas del chasis.
Se indican en este apartado también una serie de áreas donde se puede profundizar en futuros trabajos, y que guardan relación con el presente proyecto.
10. **Referencias bibliográficas:** Se enumeran los recursos que han sido usados durante el proyecto y que han servido como apoyo, presentando una lista de libros, y otra de páginas web.
11. **Anexos:** Se adjuntan diferentes anexos.



2. Objetivos.

El objetivo principal consiste en modelar los planos del chasis, y realizar el cálculo estructural de éste en diferentes condiciones, para poder valorar su comportamiento en cada una de ellas. Posteriormente se tomará como objetivo la correcta interpretación de los datos, que permitirá conocer el comportamiento dinámico del vehículo, relacionándolos con el uso del modelo en concreto y con el comportamiento que se espera de él.

Aunque para el análisis en dichas condiciones se tomen ciertas simplificaciones, que serán reflejadas y justificadas en cada caso, el objetivo es realizar el estudio acercándose lo más posible a la realidad, y de forma más concreta imponiendo una situación límite de comportamiento. Para ello será necesario no sólo comprender la geometría del chasis, sino entender el funcionamiento de ciertos elementos mecánicos que van anclados a él, como por ejemplo el sistema de suspensión, que resultará vital para los cálculos propuestos, además de sus características técnicas como potencia, adherencia, reparto de pesos, etc.

Para alcanzar estos objetivos son necesarias varias tareas.

En primer lugar es necesario un estudio y comprensión de los diferentes modelos de chasis que se emplean en el mundo de la automoción y su diferente comportamiento o ámbito de uso, y en concreto del chasis tubular, el cual es nuestro objeto de estudio. Esto delimita las posibilidades de simulación presentes y encamina el tipo de análisis al que se va a someter dependiendo de sus características. En unos casos un análisis torsional resultará innecesario al conocer las pobres características torsionales de un bastidor en concreto, pero en consecuencia podrían plantearse propuestas de mejora.

Es también necesario un estudio de los planos disponibles, para poder conocer a fondo la función de cada segmento y qué esfuerzos tendrá que soportar. A esto se suma el conocimiento de los principales componentes del vehículo que puedan afectar al estudio del chasis, y que por ejemplo necesitarán de la inserción de elementos extra para poder situar apoyos o cargas.

Posteriormente es necesario comprender como trabaja el chasis frente a las distintas sollicitaciones que ha de asumir, como son, aceleración, frenada, paso por curva, etc., a partir de lo cual se imponen las condiciones de contorno necesarias. También permitirá poder filtrar resultados incorrectos, o detectar fuentes de error como dirección de las cargas o desplazamientos impuestos.



En último lugar, analizar y valorar los resultados reflejados por el software utilizado y obtener conclusiones válidas sobre el modelo.

Para poder llevar a cabo estos estudios, se hará uso del programa ANSYS en su versión 15.0, tanto para la representación de la geometría, como el propio cálculo estructural.



3. El chasis en un vehículo.

3.1. Definición

Se denomina chasis a la estructura de sostén en la que se fijan los distintos elementos y grupos mecánicos que componen el automóvil, como son motor, transmisión, dirección, etc. Se puede observar claramente en la figura 2.

Además de ser el encargado de soportar el peso de todos los elementos, debe también hacer frente a las denominadas sobrecargas de uso. Entre ellas distinguimos las debidas al peso de carga y ocupantes, y también aquellas cargas dinámicas originadas por el propio funcionamiento de los componentes del vehículo, así como el movimiento de este.



Figura 2: Chasis Jaguar C-Type y sus componentes mecánicos. [9]

Su diseño y posterior cálculo estructural resultan por tanto vitales, debiéndose centrar en una correcta distribución de masas, y en los puntos de anclaje de la suspensión delantera, suspensión trasera y motor. Estos serán los que más solicitaciones provoquen al chasis, y por tanto los más conflictivos. Se puede ampliar la información sobre este tema en libro [19].

3.2 Historia de los chasis.

El chasis ha constituido desde el comienzo de la fabricación de los primeros vehículos en el siglo XIX hasta nuestros días, el elemento fundamental de sujeción y ensamblaje en un automóvil.

En los primeros automóviles, los bastidores o chasis de los vehículos, eran construidos en madera y siguiendo las líneas de los carruajes de la época, posteriormente algunos fabricantes comenzaron a introducir el uso de bastidores metálicos. Estos chasis estaban compuestos en su forma fundamental de largueros y travesaños.

Le siguieron los chasis tipo cercha (independientes), como por ejemplo el empleado en el Mercedes 300 SL, y las carrocerías autoportantes, como la presentada en la figura 3.



Figura 3: Carrocería autoportante Porsche 911 2010 [10]

Ya en 1980, se ha seguido usando el chasis independiente de forma paralela a las carrocerías autoportantes, para su uso en vehículos ligeros, todoterreno o simplemente en aquellos que buscan un concepto marcadamente deportivo y además pretender establecer un diseño propio y vanguardista, como es el caso del modelo escogido en este trabajo. Si se quiere ampliar información sobre este apartado, se puede consultar el libro [18].

3.3 Tipos de chasis.

Existen principalmente dos grandes tipos de bastidores, el bastidor clásico o independiente y la carrocería autoportante o bastidor monocasco. Cada uno de ellos presentan ventajas e inconvenientes, y sus diferentes usos así lo contemplan.

El bastidor independiente, es decir aquel que puede ser diferenciado de la carrocería del vehículo, puede dividirse a su vez en tres grupos, los de tipo escalera, multitubular y el tipo cercha. [27]

El chasis tipo escalera se caracteriza por el uso de travesaños y largueros como elementos de construcción. Los largueros, situados longitudinalmente, suelen construirse con perfiles en forma de U, reforzando los puntos críticos con perfiles en L. Por su parte los travesaños, también mayormente contruidos con perfiles en U, se encuentran remachados a los largueros, y están dispuestos en forma transversal. En este tipo de chasis, es frecuente el uso de travesaños formando una cruz, lo cual aumenta la rigidez de estos

Su diseño sencillo, permite una gran facilidad de acceso a los componentes. No obstante resulta pesado, y su rigidez torsional ha de incrementarse con diferentes soportes rígidos. Esto último se debe a que al tratarse de una estructura en dos dimensiones, la rigidez de torsión se ve afectada, especialmente en el caso de cargas verticales o golpes.

Los chasis multitubulares presentan como principales características el uso de perfiles tubulares, y la formación de estos por cuatro elementos laterales con escasa triangulación entre ellos. El principal inconveniente por tanto, es la necesidad de uso de perfiles con espesores grandes y un mayor cuidado en las soldaduras para compensar su fragilidad.

Por último dentro del apartado de chasis independientes, encontramos el de tipo cercha como el presente en la figura 4. La propia definición de cercha permite hacernos una idea de las características de este chasis. Su diseño esta formulado, de manera que la carga se reparta entre las uniones de los distintos elementos, esto permite el empleo de secciones menores, lo que permite un ahorro de peso.

Dentro de esta familia, supone el tipo de chasis más eficiente por su buena resistencia a flexión y torsión, y su elevada durabilidad. Sus principales inconvenientes residen en la mayor complejidad de diseño, y una mínima reducción de la accesibilidad en sus componentes.

Por tanto, pueden resumirse las principales ventajas de los bastidores independientes, en su mejor acceso a los distintos componentes y su mayor sencillez de fabricación, no obstante cuentan con los inconvenientes de ser generalmente más pesados y de encarecer el vehículo.

Los diferentes usos que contemplan son por ejemplo en vehículos comerciales, autocamiones, vehículos todoterreno o vehículos con carrocería de fibra.[27]





Figura 4: Chasis tipo cercha Mercedes 300SL [11]

El otro gran tipo de bastidor es el conocido como chasis monocasco o carrocería autoportante. Supone, sin ninguna duda, el tipo de chasis más usado en la actualidad para la fabricación de automóviles. Surge como consecuencia del deseo de integrar las funciones estructurales de los chasis independientes, con la propia carrocería del vehículo. Esto permite, que el conjunto de cargas y solicitaciones a las que está sujeto, van a poder repartirse por todo su contorno.

Aporta una mayor rigidez a la estructura, al eliminar la carrocería flexible que se anclaba al bastidor independiente, mejorando así las condiciones de habitabilidad al aprovechar mejor el espacio y anchura interior y permitiendo también una reducción de las vibraciones, además incrementa las características dinámicas del vehículo.

También presenta una mayor seguridad frente a colisión, al presentar en la zona frontal y posterior, elementos deformables capaces de absorber una gran parte de la energía producida en el choque, y que no permiten la intrusión de elementos mecánicos como el motor dentro del habitáculo de los pasajeros.[27]

No obstante, también presentan ciertos inconvenientes, derivados del ruido de la transmisión y de su mayor tendencia a la corrosión. Ambos problemas han sido ya ampliamente superados, mediante el uso de aisladores acústicos en el primer caso, y con los baños de cataforesis entre otros métodos para el segundo de ellos.

Se encuentra amplia información acerca de este tema en el libro [19].

3.4 Materiales empleados.

En la actualidad los bastidores de los vehículos están compuestos de uno de los siguientes materiales, o en ocasiones una combinación de estos, acero, aluminio y fibra de carbono. La elección del material dependerá de los requerimientos de resistencia y peso estimados por cada fabricante.

Existe un gran abanico de aceros empleados en la construcción de chasis (SAE 4130, SAE 1010, etc.), incluso en el mismo vehículo es común la utilización de diferentes aceros teniendo en cuenta la responsabilidad de las piezas y buscando rebajar el peso del conjunto. [2]

Para la elección del material empleado en un chasis independiente, se ha de tener en cuenta que se necesitarán aceros más resistentes para los chasis tipo escalera, mientras que en los de tipo cercha, los aceros al carbono son una decisión ya aceptable.

No obstante, en estos últimos, es recomendable recubrir con chapas delgadas de acero la superficie exterior del mismo. Estas chapas se situarán remachadas a la estructura principal, y su misión es la de incrementar la rigidez global. [25]

En lo referente a los chasis autoportantes, existen diferencias acusadas entre los materiales empleados para los vehículos de calle, y los usados en competición. En los primeros el material más comúnmente usado vuelve a ser el acero, usando aceros desde Bake-Hardening (aceros tratados para conseguir un aumento de límite elástico), aceros microaleados(que consiguen mejoras en diferentes propiedades como dureza o resistencia a fatiga) hasta aceros martensíticos(con límites de hasta 1400 MPa, y usados para piezas que impiden la penetración de elementos como el motor en el interior del vehículo).

Sin embargo, los esfuerzos de los fabricantes por reducir el peso de sus vehículos, propiciaron la aparición de un sustituto del acero, el aluminio. La principal ventaja del aluminio es una reducción de peso en torno al 20%, no obstante presenta mayores dificultades en su proceso de producción y tiene un coste mayor al acero. La variedad más usada en los bastidores es la aleación Al-Si-Mg, su uso hace posible el diseño y construcción de estructuras con hasta un 40% más de rigidez torsional que el acero, pero también requiere mayor cuidado en su soldadura y presenta mayores problemas de prensado.

Algunos fabricantes, como Aston Martin, han optado por usar de forma combinada acero y aluminio, consiguiendo mejoras dinámicas sin encarecer ni complicar demasiado el proceso productivo, otros como Audi optan por un bastidor completo de aluminio como el de la figura 5. [2]





Figura 5: Bastidor aluminio Audi A8 con la tecnología ASF. [12]

En el mundo de la competición, las mayores exigencias dinámicas y los esfuerzos por reducir el peso de los componentes y del conjunto, unidos a las pocas unidades fabricadas de cada modelo, permiten la introducción de materiales de coste elevado y técnicas de producción que no se puede permitir la fabricación en serie. [2]

Si bien existen competiciones donde se ha de respetar el chasis del modelo de serie (que usa los materiales anteriormente indicados) como puede ser el caso de WTCC, CER, S200 etc. si se usan posteriormente, y en función del presupuesto, diferentes refuerzos o bien estructuras de protección que permiten en un caso mejorar la efectividad y rigidez del vehículo, o bien proteger al piloto en caso de accidente.[23]

En la más alta competición, como es el caso de F1, Categoría LMP1 en Lemans o DTM, el material usado es la fibra de carbono. Esta tecnología también se reserva para vehículos de altas prestaciones, tal y como muestra la figura 6.[23]



Figura 6: Chasis de fibra de carbono empleado en el Porsche 918 Spyder [13]

De nuevo su principal ventaja es un menor peso, manteniendo unas propiedades mecánicas semejantes o superiores al acero. Su construcción es lenta y laboriosa, teniendo que intercalar de forma ordenada capas de fibra con resina, y poniendo especial atención a la dirección de la fibra. En el caso del acero y el aluminio, sus propiedades podían verse mejoradas con el empleo de aleaciones, en el caso de la fibra de carbono influye la calidad de los materiales, la adición de kevlar, o el proceso de secado en autoclave. [1]

3.5 Marca y modelo escogido para el estudio

El modelo escogido para el estudio, presenta un chasis que se puede incluir dentro del tipo cercha, descrito con anterioridad. Se optó por buscar un modelo con este tipo de chasis, por la dificultad de analizar estructuralmente uno autoportante, debido al complicado acceso a sus planos.

Se trata del modelo Seven 360 del fabricante Caterham Cars. El marcado carácter deportivo es una seña de identidad de la marca, y sus modelos están pensados para su uso en circuito, no obstante pueden ser homologados para su uso en calle. [4]

Estos modelos fueron inicialmente concebidos para su propio ensamblaje, comprando así un kit con todas las piezas necesarias pero sin estar ninguna de ellas montadas. Esto permite por tanto una mayor sencillez constructiva, que nos permite diferenciar mejor todos los componentes que lo forman, y en última instancia la parte a la que todos ellos van anclados y el cual es el objeto de estudio del trabajo, su chasis.

Las especificaciones del modelo son recogidas en la tabla 1: [4]

Velocidad máxima (km/h)	222
Aceleración 0-100 km/h (s)	4.8
Potencia máxima cv/rpm	180/7200
Par máximo Nm/rpm	182/6000
Tracción	Trasera
Caja de cambios	Manual, 5 velocidades
Largo/Ancho/Alto (mm)	3530/1685/1140
Batalla/ vía delantera-trasera (mm)	2305/1446-1446
Peso (kg)	560

Tabla 1: Especificaciones del Caterham 360.



Figura 7: Superposición del chasis en la carrocería.

4. Modelado del chasis.

Supone el primer bloque en el estudio del chasis mediante el método de los elementos finitos. Todo lo correspondiente a este apartado, se engloba en el módulo Preprocessor de ANSYS, y tiene como objetivo representar y caracterizar el chasis para su posterior aplicación de cargas y solución.

4.1. Introducción al software utilizado. ANSYS 15.0.

El modelado y posterior cálculo estructural de cualquier componente mecánico a través de una herramienta informática, se ha convertido en un paso fundamental para casi cualquier proyecto que se pretenda llevar a cabo.

Esto ha permitido que el mercado de software destinado a este objetivo crezca fuertemente, existiendo una amplia variedad de programas que pueden resolver el problema, y siendo por tanto necesario discernir cual es el más indicado para cada caso.

En este trabajo, como en la gran mayoría de proyectos de ámbitos profesional, se pueden distinguir dos partes claramente diferenciadas y que precisan de software distinto, una primera parte de representación gráfica del elemento diseñado (CAD), y una segunda parte correspondiente a la simulación o cálculo estructural de este a partir de unas determinadas condiciones impuestas, y que de forma general hace uso del método de elementos finitos (MEF) para su solución.

El software CAD, presenta herramientas destinadas específicamente a la representación gráfica y por tanto simplifica esta primera fase. No obstante estos programas, a menudo no cuentan con un módulo de simulación, o si bien lo tienen, no permiten grandes posibilidades o bien están limitados. Un problema parecido presentan los programas destinados a la simulación de elementos, que permiten amplias posibilidades de resolución pero comúnmente carecen de un módulo propio de CAD, o este resulta demasiado básico.

Es por tanto necesario llegar a un equilibrio, que teniendo en cuenta las características de diseño del proyecto, permita representar en su totalidad o bien de forma simplificada el elemento estudiado y posteriormente sea capaz de aportar la solución de las simulaciones pertinentes.

El software que finalmente se usa es el programa informático ANSYS en su versión 15.0, que está indicado para la simulación ingenieril de estructuras, y a la vez presenta un módulo CAD que permite representar de forma cercana a la realidad el chasis sometido a estudio.

ANSYS dispone de tres grandes módulos de trabajo. En primer lugar se encuentra el pre-processor, que engloba la representación del modelo, elección del tipo de elemento y material, y mallado del modelo. El segundo de los módulos, solución, es el encargado del



cálculo mediante MEF. Por último el post-procesador, permite la visualización de los resultados directos e indirectos.

Este tema es ampliamente tratado en el libro [21], donde se puede encontrar más información.

4.1.1. Representación gráfica en ANSYS 15.0

Existen dos alternativas para la primera fase correspondiente a la representación del elemento que se pretende simular. En primer lugar cabe la posibilidad de importar una geometría que previamente ha sido realizada en un programa CAD, a través de un formato de archivo compatible; la otra alternativa es representar el elemento a través del propio módulo CAD de ANSYS.

El principal problema de importar la geometría desde otro programa, es la inusual compatibilidad geométrica de la pieza en el entorno ANSYS, es decir, piezas de forma compleja a menudo han de ser simplificadas geoméricamente para su estudio en ANSYS. Esto no supone un grave problema desde el punto de vista del cálculo final, pero sí provoca incompatibilidades y errores muy comunes al importar geometrías desde otros programas. Además, en este caso la representación del chasis no presenta geometrías complejas o difíciles de llevar a cabo con el módulo de ANSYS, por lo que se opta por este último.

La herramienta CAD que incorpora el programa se basa en la creación de puntos, líneas y áreas, que definen la geometría de la pieza estudiada. Estos deben de presentar una cierta correspondencia entre ellos, de forma que definan la pieza de forma completa, y también sobre estos se situarán los elementos de cálculo en posteriores pasos.

Además, hay que tener en cuenta que ANSYS no trabaja con unidades, debe de ser el usuario el que se preocupe de la coherencia de estas durante todo el proceso, debiendo adecuar aquellas que sean necesarias.

De nuevo puede ampliarse la información acerca de este apartado en el libro [21]

4.1.2. Cálculo estructural mediante MEF en ANSYS 15.0

En primer lugar conviene introducir el método de los elementos finitos, el cual se ha situado como punto clave en muchos de los problemas ingenieriles que se presentan. Permite realizar un modelo matemático de un sistema real de forma más barata y sencilla que modificar repetidas veces un prototipo. Sin embargo, su principal característica es que otorga la solución exacta únicamente en los nodos, por lo que se presenta una solución aproximada del conjunto. El método consiste en la división de un conjunto en una serie de elementos, los cuales a su vez están interconectados por nodos. Las mismas ecuaciones que gobiernan el comportamiento del conjunto, son las usadas en los elementos. Con esto se consigue pasar de un sistema de ecuaciones diferenciales (sistema continuo), a un sistema con un grado de libertad finito y gobernado por ecuaciones lineales o no.

La aplicación de este método a menudo es compleja y laboriosa, por lo que llevarla a cabo de forma manual solo es posible para geometrías sencillas. Si se pretenden obtener tiempos de cálculo razonables se necesitará de un programa como ANSYS.



Como se ha comentado anteriormente, el método de elementos finitos otorga una solución aproximada, por lo tanto resulta vital una correcta selección de los diferentes parámetros y opciones que nos permite la herramienta informática.

Existen una serie de puntos que se deben analizar antes incluso de que se comience la representación gráfica del modelo, y que de lo contrario nos podrían alejar de una solución correcta.

En primer lugar se deben concretar los resultados que se esperan obtener, esto va a determinar el tipo de análisis. También se debe estudiar y comprender la geometría del problema, y como trabaja cada una de las partes, pues a menudo muchos detalles son superfluos y pueden ser eliminados. Una vez se hayan superado estos dos puntos, se pasará a concretar el tipo de elemento o las distintas secciones o propiedades del material.

A continuación se deben valorar las diferentes condiciones de contorno presentes en el problema, este es sin duda uno de los puntos más complejos a la hora de aplicar el método de elementos finitos. Por último, también se debe conocer cómo va a comportarse el modelo frente a la situación simulada, esto permite detectar posibles errores.

En la referencia [3] se encuentra información sobre lo anteriormente expuesto.

4.2. Elaboración del modelo.

Una vez introducidas las principales características del programa utilizado para la simulación, se presentan los pasos dados para la elaboración del modelo del chasis previo a su mallado, imposición de restricciones y a su posterior simulación en diferentes situaciones. A continuación se presenta en la figura 8 una primera aproximación de la geometría del chasis sometido a estudio, para poder entender alguno de los razonamientos que se van a exponer.

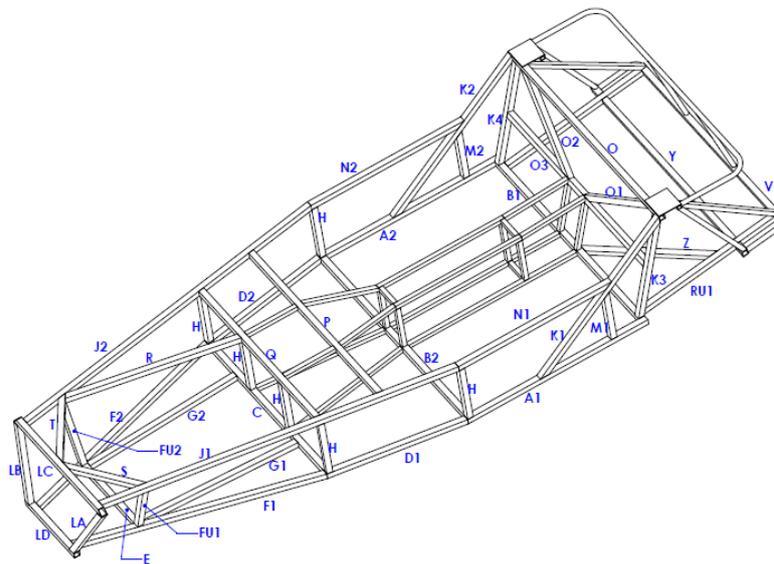


Figura 8: Geometría del chasis sometido a estudio.

Además, como se ha comentado anteriormente, ANSYS no dispone de diferentes unidades que se puedan seleccionar, es el usuario quien debe de adecuar todos los datos de forma coherente e interpretar los que devuelve el programa de forma correcta. En la tabla 2 se presenta el sistema de unidades escogido para la elaboración del modelo, y el cual se respetará durante todo el proceso. Las soluciones por tanto, también se calcularán siguiendo estas unidades y así serán debidamente consideradas.

Longitud	mm
Masa	T
Fuerza	N
Aceleración	mm/s ²
Densidad	T/mm ³
Tensión	MPa

Tabla 2: Unidades empleadas.

4.2.1. Fases en la elaboración del modelo.

Este apartado se enmarca dentro del módulo pre-procesador anteriormente mencionado y engloba la elección del tipo de elemento utilizado, elección del material, determinación de las secciones necesarias y representación gráfica del modelo.

4.2.1.1 Tipo de elemento seleccionado.

El primer paso para comenzar a representar gráficamente el modelo es la elección del tipo de elemento, ANSYS cuenta con tres familias de elementos seleccionables, BEAM, SHELL y SOLID.

Cada una de estas se compone a su vez de diversos elementos, que guardan características comunes como geometría (plana, bidimensional o tridimensional), número de nodos (afectará a los puntos en los cuales se realizará una aproximación de la solución, así como a las funciones de forma empleadas para obtener la solución) o grados de libertad.

De entre las tres grandes familias de elementos, se descarta de forma directa al elemento SOLID, el cual generará volúmenes, complicando la solución y no permitiendo un tiempo de cálculo asumible. Conocida la geometría de partida se describen a continuación las principales características de las otras dos familias de elementos con el fin de justificar la decisión tomada.

La familia de elementos tipo BEAM (figura 9) está compuesta por elementos uniaxiales, que pueden estar sometidos a tensión, compresión y flexión, y que comúnmente son usados en estructuras de barras. Se definen a partir de dos nodos, cada uno de los cuales presenta tres grados de libertad, traslaciones en X e Y, así como rotación en Z. Requieren de la posterior especificación de su área transversal, momento de inercia, deformación inicial (si existiese) y altura de sección transversal.



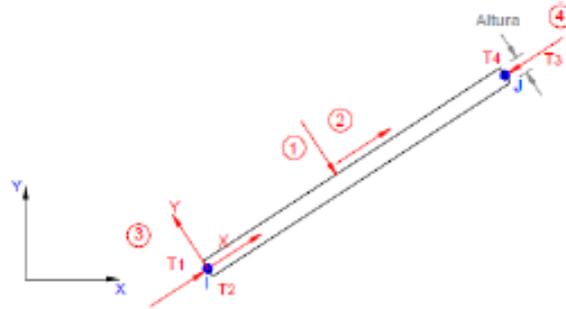


Figura 9: Elemento BEAM

Finalmente se eliminó la posibilidad de utilizar este elemento, pues como se detallará a continuación la geometría presentaba placas de espesor delgado, difícilmente representables con este elemento, no obstante llevando a cabo una simplificación de la geometría, hubiera sido posible su uso, pero se presentarían problemas en las uniones entre otros.

Por esta razón el elemento que finalmente se escogería sería el tipo SHELL (en concreto el SHELL 181), elementos pensados para su uso en casos de estructuras con láminas o paredes de espesor delgado, como es el caso de estudio. Se definen mediante cuatro nodos, cada uno de los cuales presenta seis grados de libertad, tres de traslación y tres de rotación y será necesario posteriormente definir su espesor, a través del tipo de sección que se presente. Además presentan una característica, que si bien no afecta a la solución obtenida, si cobrará importancia en el cálculo por fatiga. ANSYS define para este tipo de elementos, una cara superior (Top) y otra inferior (Bottom), esto además de doblar el número de nodos, hace que haya que tener especial cuidado en las uniones, donde se presentarán la cara inferior y superior del nodo de una superficie, y su semejante en la otra superficie, todo ello en un mismo nodo.

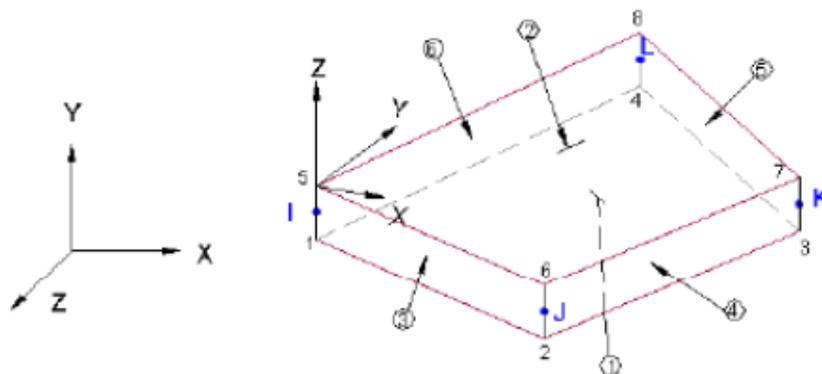


Figura 10: Elemento Tipo SHELL

En la figura 10, se puede observar el nodo de la cara Top (2) y el de la Bottom (1), así como la mejor disposición de este elemento para la geometría presente en el caso estudiado (figura 8).

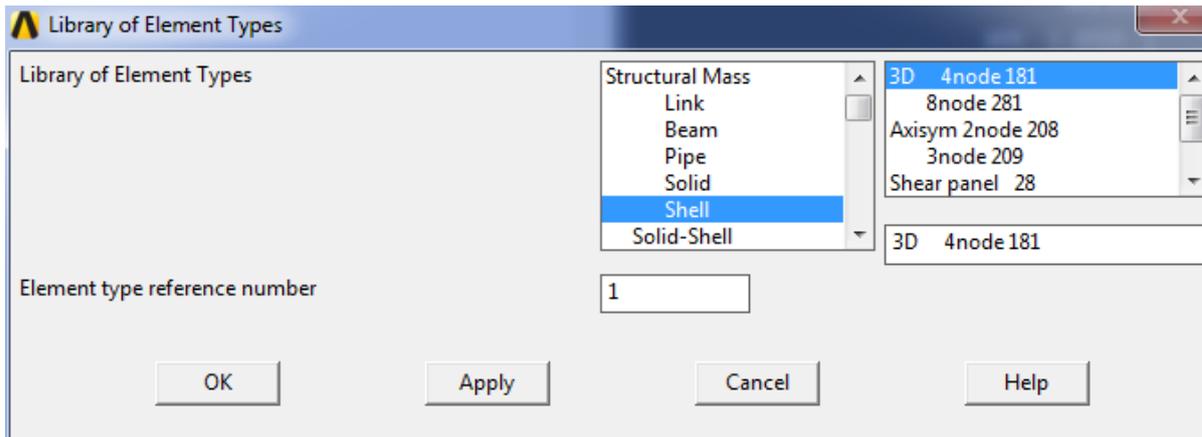


Figura 11: Ventana de ANSYS para la selección del tipo de elemento.

En la figura 11, se presenta la ventana del programa que permite acceder a la librería de elementos, y seleccionar el más adecuado, a la cual se accede clicando en Element Type>Add/Edit/Delete desde el menú principal. El siguiente paso una vez decidido el modelo, es la elección del material que se va a usar.

En la referencia [3], se puede ampliar información sobre los tipos de elementos presentes en ANSYS.

4.2.1.2 Material utilizado.

Tal y como se expuso en el apartado 3.4 de la presente memoria, el material más ampliamente utilizado en la construcción de chasis es el acero. El catálogo de aceros existentes es muy amplio, y son muchos los que pueden servir para un mismo caso, la decisión final por tanto se tomará en función de criterios económicos o de disponibilidad.

De entre todos ellos finalmente se decidió escoger un acero de calidad ST-52 DIN 2391. El principal motivo es el uso extendido de este acero en este tipo de chasis, incluso en el ámbito de la competición, así como su gran disponibilidad. La composición química de este acero se presenta en la figura 12:

C(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Si(%)
0.16-0.21	1.3-1.6	<=0.04	<0.05	0.15-0.45

Figura 12: Composición química acero ST-52 DIN 2391

Sus principales características mecánicas son:

Módulo de Young	205 GPa
Coefficiente de Poisson	0.3
Tensión de rotura	655 Mpa
Límite elástico	515 Mpa

Figura 13: Propiedades mecánicas acero ST-52 DIN 2391

Presenta una densidad de 7850 Kg/m³.



De acuerdo a las unidades seleccionadas para el modelo y presentadas en la tabla 2, después de ser convertidas se introducen en el programa (Material Props>Material Models), en primer lugar se introduce el módulo de Young y coeficiente de poisson (Structural>Linear>Elastic>Isotropic) y posteriormente la densidad(Structural>Density).

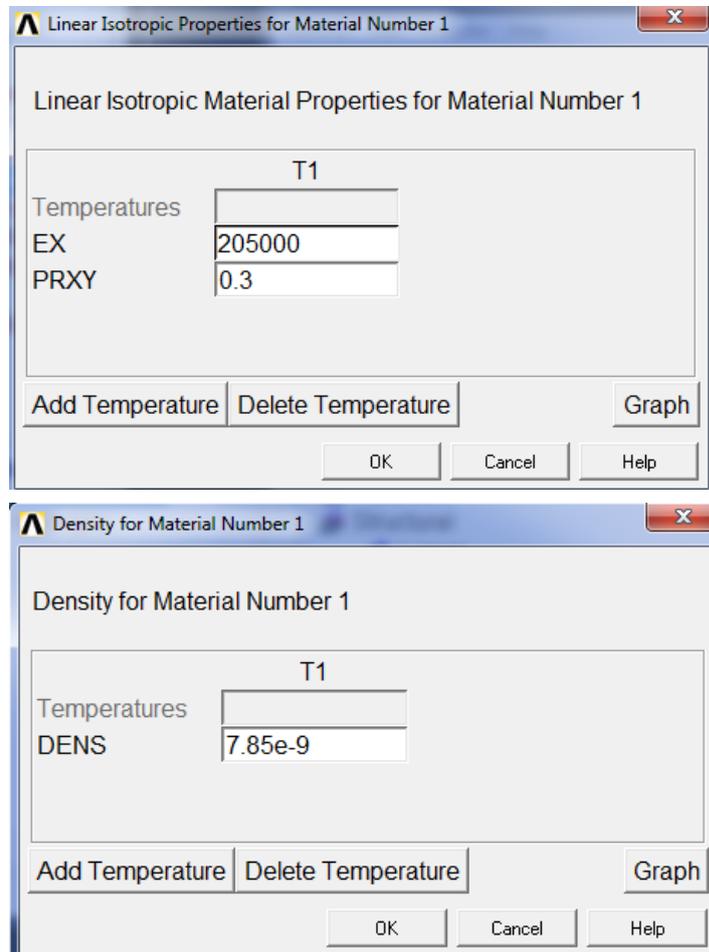


Figura 14: Ventanas de introducción de datos del material.

4.2.1.3. Secciones presentes.

Los elementos tipo SHELL, además de la definición de cuatro nodos para su creación, necesitan también de la indicación de su espesor, característica que se les atribuye a través de las diferentes secciones. En la geometría estudiada se encuentran tres secciones distintas, barras, tubos y placas de espesor delgado, que se detallan en la tabla 3:

	Barra de espesor 1.626 mm
	Tubo de espesor 1.651 mm
	Placa de espesor 3 mm
	Placa de espesor 4.626 mm

Tabla 3: Diferentes secciones presentes en la geometría.

Para la introducción en ANSYS de esta información se siguen los siguientes comandos Sections>Shell>Lay Up> Add/Edit . En la ventana se introducen los espesores de cada sección, un nombre identificativo y un número identificador de sección

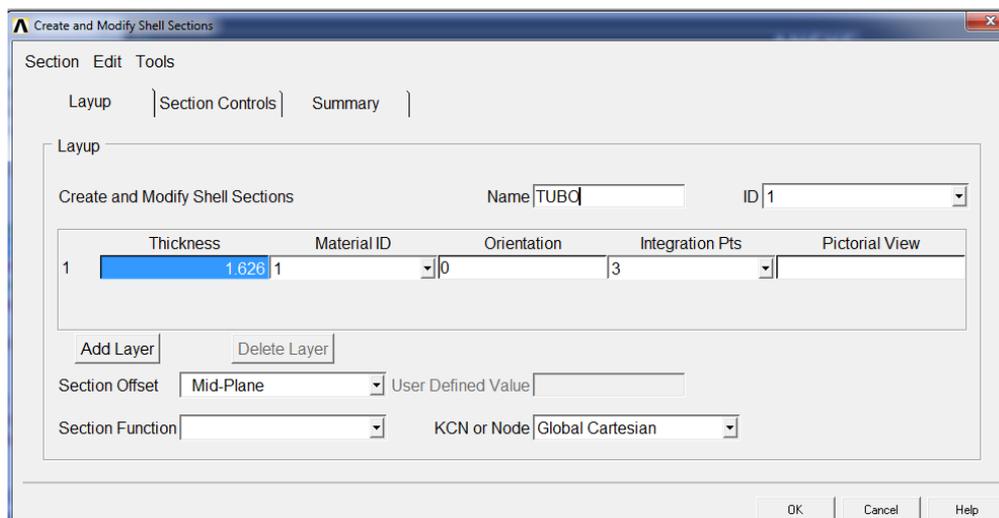


Figura 15: Ventana de creación y modificación de secciones.

Una vez introducidas las cuatro secciones diferentes, se pueden comprobar en List>Properties>SectionProperties donde aparecerá un listado con todas las secciones presentes y sus características. Una vez completado este paso ya podemos comenzar la representación gráfica del modelo sometido a estudio.

4.2.1.4 Representación gráfica.

La representación gráfica del modelo se ha llevado a cabo mediante la herramienta CAD de ANSYS, mediante keypoints, líneas y áreas. El tipo de elemento utilizado (SHELL 181) crea áreas de espesor cero, a las cuales posteriormente se las definirá un espesor asignándolas una sección como se ha visto con anterioridad.



En primer lugar, y con el fin de reducir el tiempo de representación así como el tiempo de cálculo, se ha de considerar la posibilidad de representar únicamente una de las mitades del chasis sometido a estudio. No obstante, en el caso que nos ocupa carece de sentido, al situarse el piloto descentrado con respecto al eje longitudinal del chasis. Por esta razón se ha optado por efectuar una representación completa del chasis.

Los comandos necesarios para la representación gráfica se encuentran dentro del apartado Modeling , en el menú principal. Dentro del cual se encuentra Create, donde encontraremos los comandos necesarios para crear de diferentes formas los keypoints, líneas y áreas que componen nuestro modelo; Operate, necesario para las operaciones de extrusión (operación muy usada para la creación de tubos y barras), división de áreas (como se detallará a continuación el modelo está correctamente unido solo si se realizan con cuidado este tipo de operaciones) y otras menos comunes como extender una línea; y por último Delete, indicada para borrar todos los errores que se hayan cometido durante el proceso.

Otro comando también muy usado es CheckGeom, el cual nos permite conocer distancias entre puntos, y así poder identificar errores sobre plano.

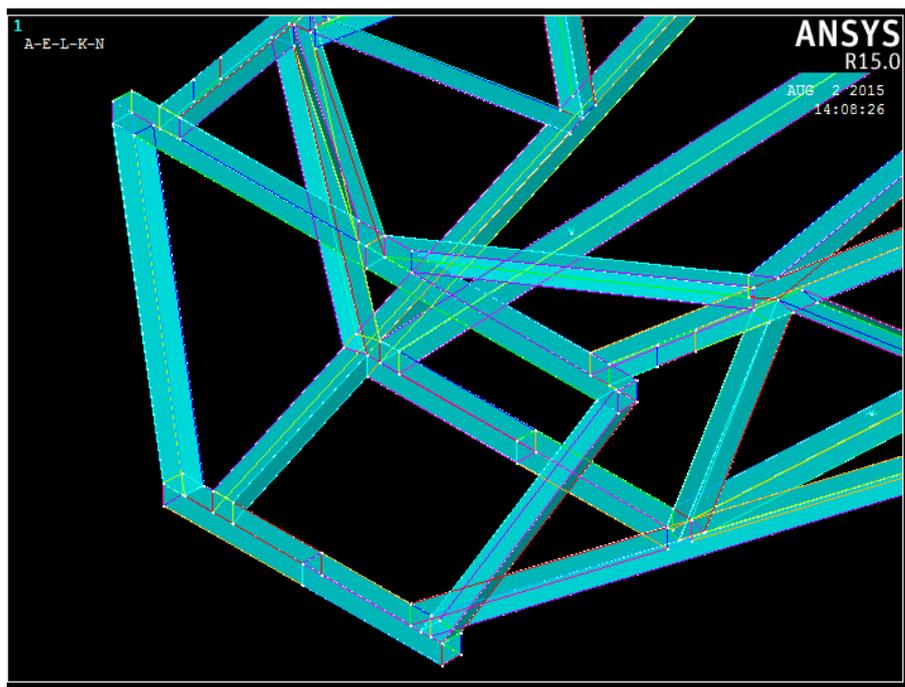


Figura 16: Detalle de la parte delantera del chasis.

En la figura 16, se presenta un detalle de la zona delantera del chasis, en el cuál se pueden observar los diferentes keypoints presentes (puntos blancos generalmente situados en los vértices de las barras), líneas (en distintos colores para poder diferenciarlas y siguiendo las aristas de las barras) y por último las áreas (representadas en color azul celeste). La dinámica que ha ido siguiendo para la representación del chasis, es ir realizándola por zonas, en función

de la disposición geométrica, y con el objetivo de detectar errores y poder solventarlos o aprender de ellos al seguir con la representación del chasis.

A continuación se presentan y detallan las principales operaciones necesarias para obtener la geometría final, así como las distintas consideraciones y posibles errores que se pueden cometer en cada una de ellas y que se han presentado durante el proceso de creación, estas son:

- Creación de keypoints.

La creación de los keypoints supone el primer paso en la representación gráfica, debiendo considerar las unidades que se hayan establecido previamente (en el caso de estudio mm) para introducir las dimensiones correctamente, pues los keypoints van a ser definidos mediante sus coordenadas. Estas coordenadas a su vez pueden hacer referencia al sistema activo de coordenadas, que por defecto es el global (Create>Keypoint>InActiveCS) o a un Working plane(Create>Keypoint>On Working Plane).

Conviene explicar el uso del Working plane(que a partir de ahora se denominará de forma indistinta como WP), un plano cualquiera que puede ser definido por keypoints, líneas, etc., y que puede simplificar la creación de nuevas geometrías, al situarlo en zonas problemáticas (como zonas con cierto ángulo respecto al sistema de coordenadas) para así reducir la complejidad al situar los keypoints.

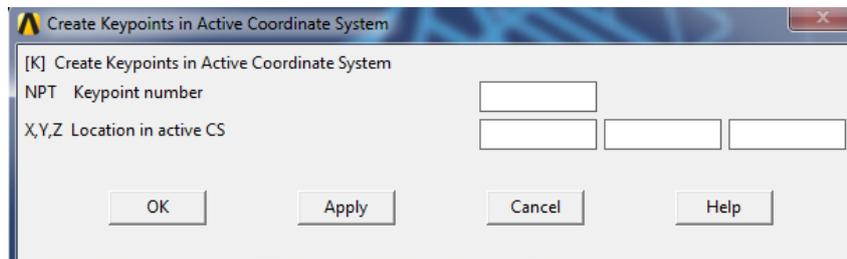


Figura 1: Ventana de creación de keypoints a través de sus coordenadas en el sistema de coordenadas activo.

En la figura 17, se presenta la ventana de creación de keypoints. En primer lugar se sitúa un cuadro que permite introducir el número de keypoint que deseemos, esta opción está pensada para soluciones con bajo número de keypoints , donde se desee cambiar la numeración por cualquier motivo. En soluciones como la estudiada, donde se presentan más de 180000 keypoints, puede resultar una fuente de errores. ANSYS numera por defecto los keypoints en orden creciente de creación, de forma que el usuario no tenga que preocuparse por ese problema. Si trascurridos varios keypoints se introduce manualmente de nuevo un identificador de keypoint ya creado, el programa elimina el anterior de forma inmediata. Esto genera problemas posteriores para creación de líneas o áreas, y podrá generar un error en el módulo solución.

Los otros tres cuadros de introducción de datos, son los que permiten, siempre siguiendo el sistema de unidades que se haya escogido previamente, definir las diferentes coordenadas del keypoint, para poder crearlo finalmente.

Por último, para la creación de keypoints sin necesidad de introducir sus coordenadas, se puede hacer uso del comando Create>KP Between KPs , el cual permite crear keypoints entre otros ya creados, bien dando una distancia determinada entre ellos, o una fracción que calculará el punto de creación a partir de la longitud inicial entre los keypoints.

- Creación de líneas.

La creación de líneas es el siguiente paso constructivo, una vez creados los diferentes keypoints, estos podrán ser unidos mediante líneas, que o bien formarán las aristas de las posteriores áreas, o podrán servir como herramienta para crear extrusiones.

El módulo Create>Lines , engloba tanto líneas rectas, como arcos o círculos completos. Para la creación de líneas se pueden escoger múltiples opciones, desde líneas rectas entre dos keypoints a líneas perpendiculares o con un cierto ángulo sobre otras.

Estos dos últimos comandos son usados con frecuencia, por ejemplo para lanzar los distintos largueros y travesaños que conforman el chasis. Necesitan de una línea base, sobre la cual se medirá el ángulo deseado para la creación de la nueva línea, y d un keypoint donde esta finalice. Otra ventaja es que no se necesita de la creación de un keypoint para el comienzo de la línea, el programa genera de forma automática este keypoint de inicio.

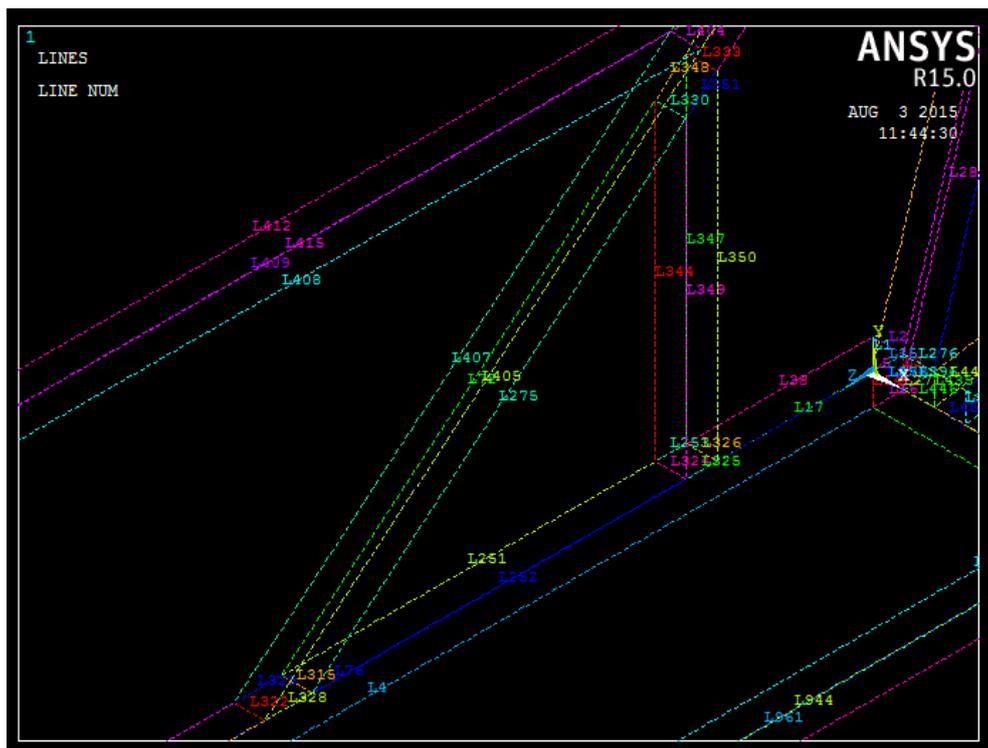


Figura 18: Detalle creación líneas perpendiculares y con un ángulo determinado.

En la figura 18, se puede observar un ejemplo de una zona del chasis construida mediante estos comandos. La línea L344 (color rojo), ha sido creada mediante el módulo Normal To Line,



definiendo como línea de referencia la L251 (color amarillo). Mediante el módulo At Angle To Line, han sido creadas las líneas que conforman el elemento de triangulación propio de los chasis tubulares (L275, L276, L407 y L408) y que otorga mejores cualidades dinámicas.

Comandos similares a los dos presentados son Normal To 2 Lines y At Angle To 2 Lines, la única diferencia radica en la definición de dos líneas de referencia.

En ocasiones ANSYS generará un mensaje de error, que nos indica que la imposibilidad geométrica de creación de la línea. Una de las razones por las que se puede dar, es la confusión del sentido del ángulo de la nueva línea que se pretende generar, se deberá de poner especial atención en este apartado.

Como se ha mencionado anteriormente, el módulo Lines engloba tanto líneas rectas como arcos o círculos completos. Para la creación de tubos, el método que se utiliza es la extrusión de un círculo a través de las líneas deseadas que definen la forma de este, por lo que es necesario definir los círculos que vayan a generar esos perfiles.

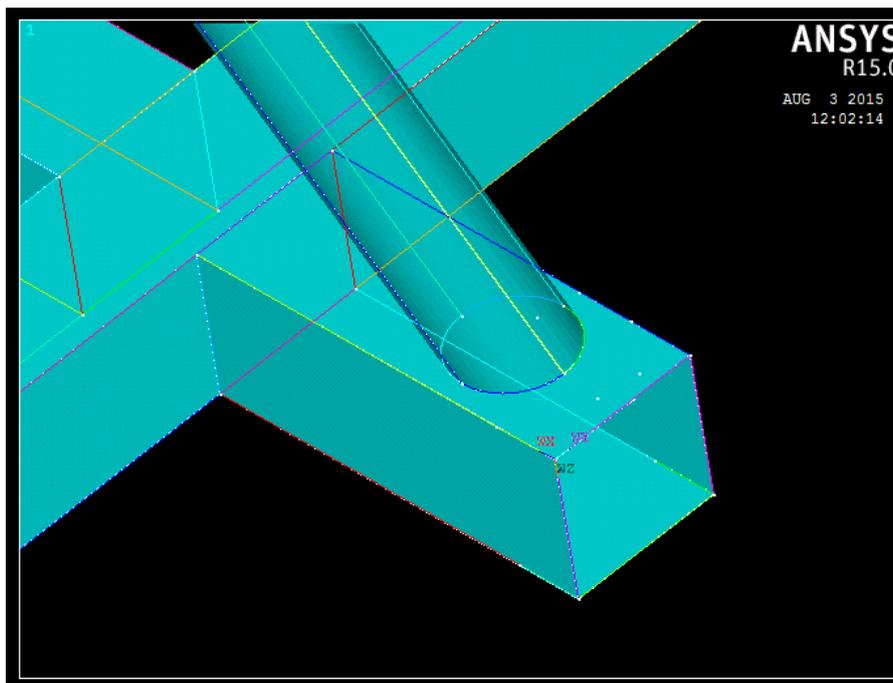


Figura 19: Detalle creación perfiles circulares.

Para generar el círculo que después definirá la barra deseada (presentada en la figura 19), el primer paso necesario es alinear un Working Plane(WP) de forma que se defina el plano de creación deseado para ese círculo. Si no se hiciese este paso, el círculo se crearía sobre el sistema global de coordenadas, lo cual no es un problema siempre que se trabaje en planos paralelos a este.

No obstante cuando se trabaja en planos con un cierto ángulo respecto al global, como es el caso de la Figura, es obligatorio. Una manera sencilla de definir este Working Plane , es hacerlo



a través de líneas WorkPlane>Align WP whit> Lines, en este caso mediante las líneas amarilla y lila , queda definido el WP tal y como se ve en la imagen.

Una vez definido el plano de creación del círculo, basta con dar dos localizaciones de keypoint (centro y un punto cualquiera del círculo) para ser creado. ANSYS genera de forma automática cuatro sectores circulares en lugar de un círculo completo, este detalle deberá tenerse en cuenta a la hora de realizar la extrusión, siendo necesario seleccionar los cuatro sectores.

Otra singularidad del programa, es que cuando sean creados esos perfiles circulares y estemos moviendo el chasis, estos perfiles desaparecerán, pues al carecer de aristas la herramienta gráfica de ANSYS no los detecta. Esto no afecta en ningún caso a la solución.

- Creación de áreas.

Las diferentes áreas que componen la geometría del chasis, son el paso final en la representación de este, recordemos que hemos escogido un elemento tipo SHELL, el cual definido a partir de keypoints, crea superficies de espesor cero, posteriormente se definirá su espesor a través de la sección correspondiente, pero en ningún caso observaremos espesor alguno en la pantalla de ANSYS. A pesar de que el comando Extrude, el cual nos permite hacer extrusiones con la forma deseada, es un método que puede ser usado para la creación de áreas, se ha decidido no incluirlo en este apartado, y otorgarle uno propio, debido en parte a su singularidad (crea varias áreas en un mismo paso) y también siguiendo la línea del menú principal de ANSYS que lo sitúa en submenús distintos.

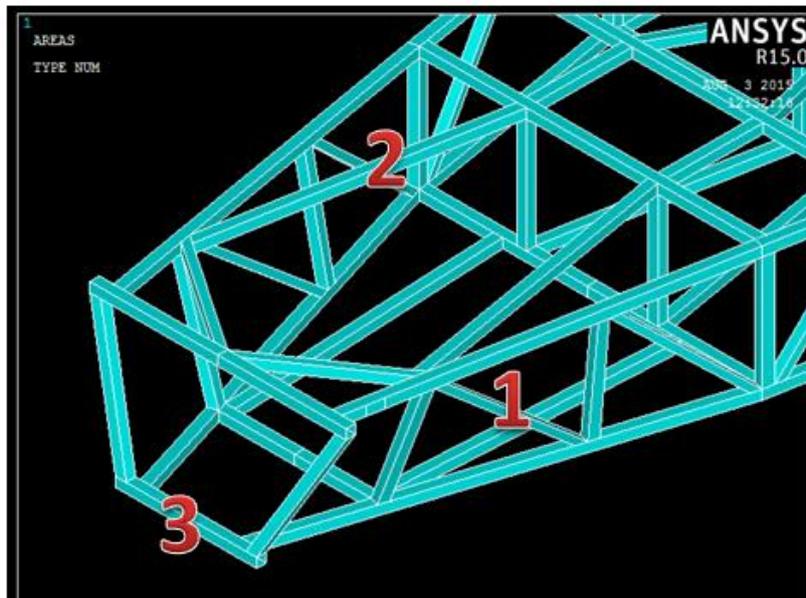


Figura 2: Detalle de diferentes barras presentes.

En la figura 20 se observa como a lo largo de la representación del chasis, se encuentran perfiles más indicados para su representación a través de la extrusión, como es el caso del indicado con el número 3, y otros que por su geometría y ángulos, como los indicados por el número 1 y 2, son más sencillos de realizar a través de Create>Areas>Arbitray>By Keypoints o

bien Create>Areas>Arbitray>By Lines. Por lo general, travesaños y largueros serán zonas indicadas para realizar mediante extrusión, mientras que los elementos de triangulación que le confieren rigidez serán los que se reserven para el comando Arbitrary.

A través de este comando se pueden crear áreas siguiendo unos keypoints, o a través de unas líneas dadas. En el primer caso, el propio programa genera de forma automática las líneas que unen los distintos keypoints.

Una de las mayores dificultades encontradas en la representación del chasis, radica en la continuidad de sección de todos los perfiles de barra presentes, la cual se ve mínimamente distorsionada mediante el uso de los comandos mencionados.

El uso de este comando Extrude permite mantener esa continuidad, pero a menudo genera problemas adyacentes mayores que complican de forma notable todo el proceso, además no permite realizar uniones completamente selladas, quedando pequeños huecos que generan comportamientos dinámicos no deseados.

En la construcción del chasis de forma física, apartado que se trata en el punto sexto de esta memoria), estos huecos son tapados mediante el cordón de soldadura necesario para la unión de los diferentes perfiles por lo que no presentan problema. Teniendo en cuenta todo lo mencionado, se decide en estos casos hacer uso del comando Arbitrary comentado, el cuál modificando mínimamente la geometría permite realizar unas uniones limpias que no darán problemas al solucionar el modelo.

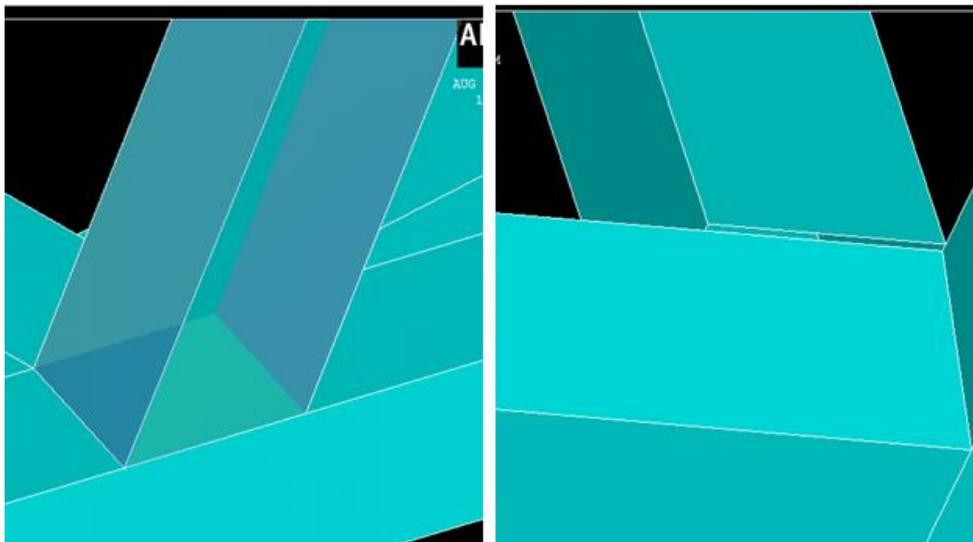


Figura 21: Comparativa de creación de áreas a través del comando Extrude y el comando Arbitrary.

La figura 21 refleja lo dispuesto anteriormente. A la izquierda de la imagen se presenta un perfil seleccionado generado a través de cuatro áreas mediante el comando Arbitrary, y se observa la limpia y correcta unión con la barra al que va unida. A la derecha, se ha hecho uso

del comando extrude, que al continuar con la sección dada inicialmente, genera en la parte inferior un hueco milimétrico, que será causante de problemas.

En el chasis sometido a estudio, las placas presentes en su zona posterior, únicamente pueden ser representadas de esta manera.

- Comando extrusión.

Se encuentra dentro del submenú Operate, y para la creación de áreas se necesita de Extrude>Lines >Along Lines. Como se ha comentado, este comando genera un perfil con la forma dada inicialmente, siguiendo una línea o líneas, y generando tantas áreas como sean necesarias de acuerdo al perfil definido. En el chasis estudiado nos encontramos con dos tipos de perfiles diferentes, tubos y barras, que pueden ser representadas con este comando.

En el primer caso se seleccionan los cuatro segmentos circulares, y posteriormente la línea que se desee seguir. En el caso de las barras, dada la geometría del chasis, existirán casos en los que el perfil sea cuadrado, y otros en los que sea rectangular con el objetivo de mantener la sección constante de las barras en aquellas que están dispuestas formando un cierto ángulo.

En la figura 22 , se observan los perfiles de tubo realizados mediante este comando, así como algunos travesaños y largueros que también han sido realizados de este forma. Para la zona de la curva se usa el comando Line Fillet, el cual seleccionando dos líneas y el radio de acuerdo que se requiera, genera la curva deseada. Si ANSYS detectará un radio de acuerdo muy pequeño, generaría un error al interponerse unas áreas con las otras.

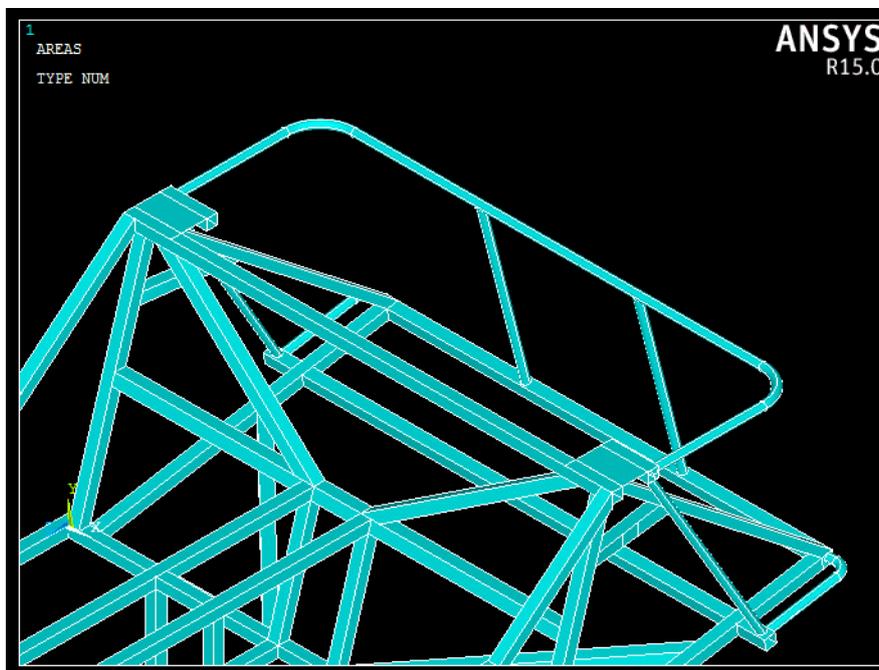


Figura 22: Detalle zona posterior chasis.

- Comando división de áreas.

El proceso de unión de las diferentes barras y tubos que conforman el chasis sometido a estudio, es un punto de tremenda importancia y debe de ser estudiado convenientemente. Este proceso, que comúnmente hace uso de las soldaduras, será detallado en capítulos posteriores dedicados a la fabricación del chasis.

No obstante en el estudio del chasis a través de ANSYS, este es un apartado igualmente importante puesto que una vez se han representado todas las áreas existentes, se deben establecer relaciones de unión entre estas si queremos que el modelo se comporte de forma correcta o no genere errores.

Cualquier área que no esté convenientemente unida será causa o bien de una deformación exagerada, que puede llegar a generar un error en la solución, o del consecuente error de solución si al aplicar el campo de fuerzas no se encuentra unida o impedida en ciertos desplazamientos.

Para modelizar las uniones de barras y tubos a través de ANSYS, se recurre a los comandos Divide Area by Line y Divide Area by Area, estos se encuentran en Modeling>Operate>Booleans>Divide.

En el primero de los casos, un área seleccionada será dividida por una línea que se sitúe en su mismo plano, generando una división del área original en dos partes. La unión originalmente presentará sus líneas en forma discontinua, advirtiendo así de la falta de unión entre las diferentes áreas, una vez unidas, las líneas presentaran forma continua y podremos seleccionar el nuevo área creado.

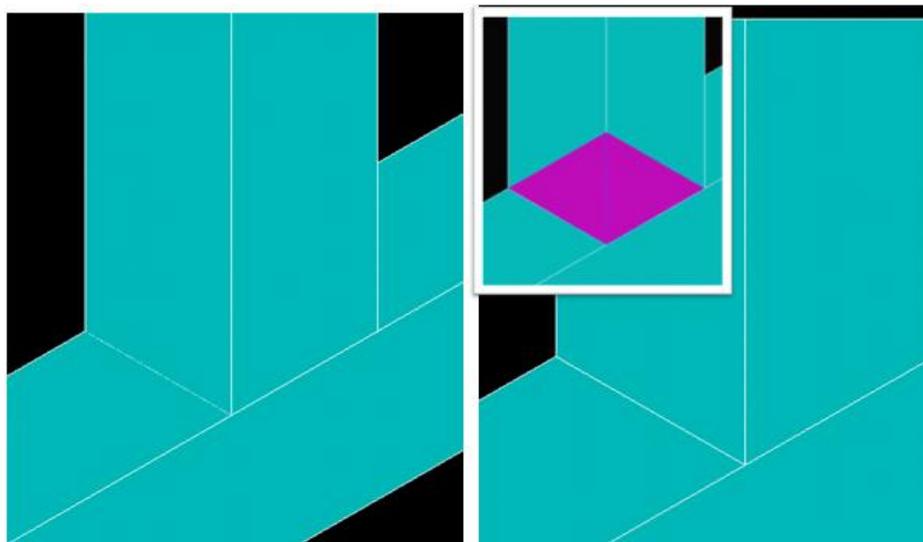


Figura 23: Comparativa uniones.

En la parte izquierda de la figura 23 se presenta la unión antes de emplear el comando explicado, se puede observar como la recta transversal a la barra inferior está presentada de forma diferente al resto (leve discontinuidad). Después de modelizar la unión de forma correcta adopta la misma forma y contorno que el resto, y el nuevo área puede ser seleccionado (área morada) para verificar la unión.

A menudo en los chasis tubulares, existen uniones entre más de dos barras o tubos, se deberá tomar especial atención a estas a la hora de realizar las uniones por el método que se ha explicado. Puede ocurrir que durante el proceso de unión, se generen varias líneas coincidentes, pero no unidas, fruto de keypoints coincidentes pero de distinta numeración, lo que resulta en una unión mal planteada. El siguiente ejemplo ofrecido en la figura 24 muestra este problema.

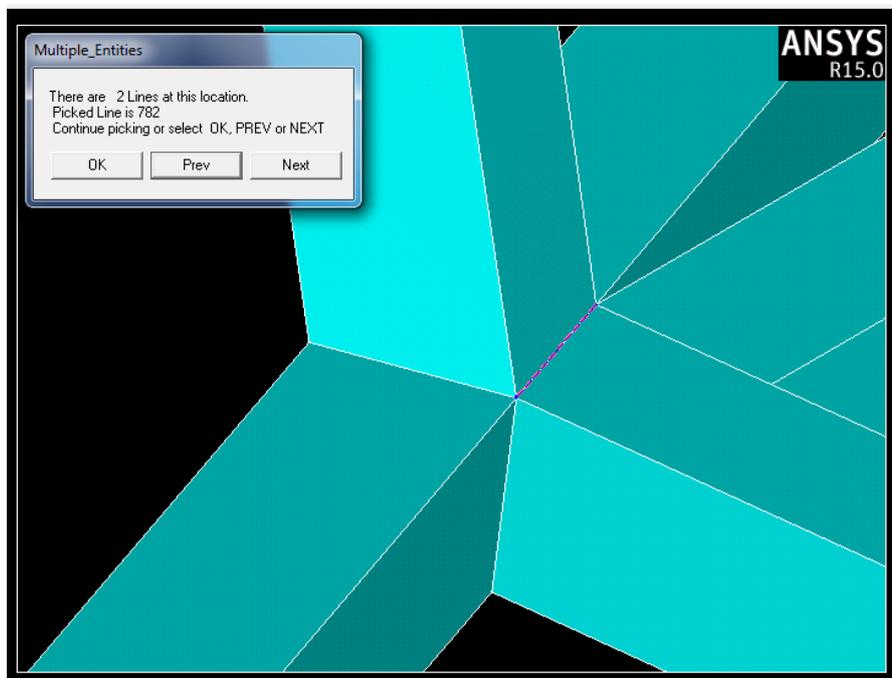


Figura 24: Problema de múltiples líneas en una unión.

Se trata de una unión entre cuatro barras, la barra principal es la dispuesta de forma que entra hacia el papel. Al generar las uniones en las diferentes caras de esta barra (una en la parte superior y la otra en un lateral) se han creado dos líneas coincidentes pero no unidas y que por lo tanto hacen que la unión no esté trabajando de la forma correcta. La solución pasa por borrar una o las dos áreas divididas así como ambas líneas coincidentes y sus keypoints, y comenzar de nuevo la representación asegurando ahora el proceso correcto. La forma de esta misma unión una vez solventado el problema, es la que se muestra en la figura 25.

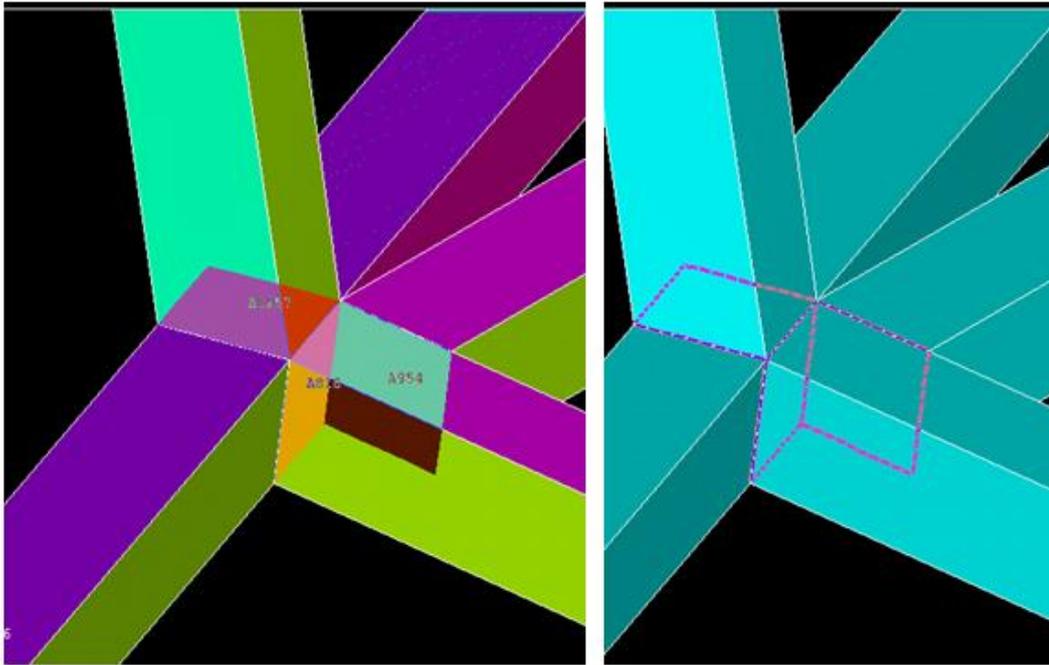


Figura 25: Unión múltiple correctamente modelizada.

Se puede observar como no se genera el problema de líneas múltiples, y las tres áreas de división necesarias para asegurar la unión, comparten dos a dos líneas iguales. En la parte izquierda de la imagen se presentan las tres áreas que definen por completo la unión entre las cuatro barras.

En el caso de utilizar el comando Divide Area by Area, el elemento divisor es también un área, con la particularidad de que esta se borra una vez efectuada la división.

Para solventar este problema, debemos acceder a Divide>Settings y seleccionar la casilla que pone Keep Input Entities, esto hace que no se borren ni las áreas originales de división ni las originales divididas, pero será necesario posteriormente borrar el área original a dividir, dejando así la intersección correctamente modelizada. No obstante es conveniente volver a deseleccionar esta opción para trabajar con Divide Area by Line, pues dejaría las áreas originales que deberían ser posteriormente eliminadas.

- Otros comandos usados.

En los puntos anteriores se han presentado los comandos que han sido mayoritariamente usados para la representación del chasis. Sin embargo existen otros, que también han servido de ayuda en casos excepcionales.

El comando Add>Areas, permite sumar áreas que se encuentren en un mismo plano por lo que resulta interesante para deshacer las divisiones creadas por los métodos anteriormente explicados, en lugar de tener que borrar todas las áreas y comenzar de nuevo. Este comando borra automáticamente las áreas originales, dejando una única área suma de todas ellas.

El otro comando que también simplifica en ciertos casos la creación del chasis es ExtendLine. Este permite extender una línea original una cierta distancia, lo que permite en el caso de las extrusiones, extender la línea auxiliar necesaria para la operación, de forma que posteriormente sea más sencilla la división de las áreas haciendo uso de los comandos mostrados.

4.3 Mallado del modelo.

Una vez correctamente representado en el entorno ANSYS el chasis estudiado, el siguiente paso es el mallado de este para su solución a través del método de los elementos finitos, que ya ha sido explicado en apartado 4.1.2. Para ello es necesario acceder al módulo Meshing, en el cual encontraremos las herramientas necesarias para ello.

4.3.1. Asignación de secciones.

La asignación de las diferentes secciones presentes en el chasis, y que ya han sido detalladas con anterioridad, es el paso preliminar al mallado del modelo. Por defecto ANSYS asigna la sección identificada con el número uno a todo el modelo, en nuestro caso se presentan cuatro tipos de secciones distintas que deberán ser asignadas convenientemente. Para ello, dentro del módulo Meshing, seleccionaremos Mesh Attributes>Picked Areas.

Como por defecto ANSYS ha seleccionado la sección 1 a todo el modelo (correspondiente en nuestro caso con la sección barra), únicamente deberemos seleccionar manualmente las áreas de secciones correspondientes a tubo y las dos placas distintas. (Ver apartado 4.2.1.3)

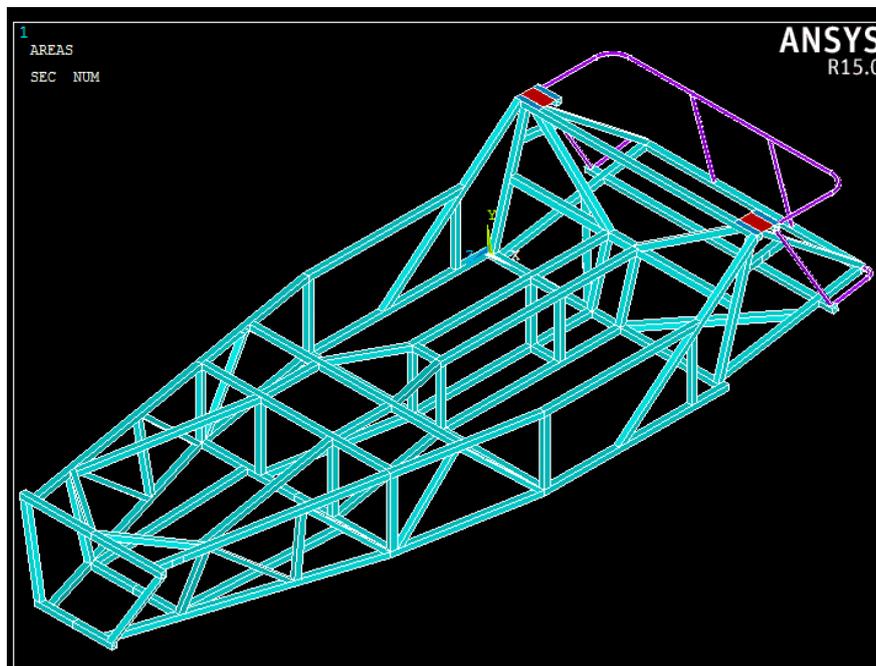


Figura 26: Diferentes secciones presentes en el modelo de chasis.

Encontramos en la figura 26 en azul celeste la sección de las barras, en azul marino la placa de espesor más grueso, en rojo la placa fina, y en morado la sección de los tubos. Una vez asignadas las secciones podemos proceder a mallar.

4.3.2. Mallado

El mallado del modelo es el último de los pasos dentro del módulo Preprocessor. A menudo el software no destinado al estudio de los elementos finitos presenta una herramienta que permite, muchas veces de forma automática, realizar un mallado del modelo y obtener soluciones sobre este. Muchas de estas soluciones son erróneas, debido a restricciones dispuestas incorrectamente, o basadas en una malla mal planteada.

Esta malla deficiente puede ser fruto de múltiples factores, como elección del elemento o tamaño de este. [3] Factores que el programa escoge de forma automática en base a sus propios criterios. Sin embargo, en el entorno ANSYS, todos los pasos que se han ido dando hasta aquí, han sido escogidos por el usuario, lo que redundará en un proceso más laborioso pero más preciso.

Para el mallado final, se utiliza la herramienta MeshTool de ANSYS, en la que lo único que deberemos de seleccionar será el tamaño de elemento y el tipo de malla. Deberemos de seleccionar estas opciones con cuidado para conseguir una malla adecuada.

El tipo de malla, hace referencia a la forma de los elementos que van a ser creados. ANSYS permite elegir entre elementos de forma triangular o elementos cuadrados. Esto en ningún caso quiere decir que todos los elementos que vayan a ser creados posean esta geometría de forma exacta, sino que se tratará de crear una malla con elementos que se aproximen a esa forma. Existirá por tanto, un número de elementos deformados, que no guarden esa forma seleccionada, y que han de ser considerados. Un número elevado de estos elementos produce un mallado poco eficaz, en el que la solución (recordemos que es aproximada) poco tendrá que ver con lo que está sucediendo en la realidad. Como norma general, puede aproximarse que el número de elementos deformados no debe de superar el 5% del número total de elementos. Cuanto menor número de elementos deformados tengamos, más eficaz será la malla.

La decisión de usar elementos triangulares genera una malla menos eficaz, por lo que se reservará para casos en los que no sea posible hacer uso de elementos cuadriláteros. En el caso de estudio se hace uso de estos últimos, obteniendo una malla eficaz con un bajo porcentaje de elementos deformados. Para ello se accede a la herramienta MeshTool y se seleccionan los botones Quad y Free.

```

*** WARNING ***                      CP =      154.035   TIME= 14:09:33
Shape testing revealed that 13 of the 191558 new or modified elements
violate shape warning limits. To review test results, please see the
output file or issue the CHECK command.

PRODUCE ELEMENT PLOT IN DSYS = 0

```

Figura 27: Número de elementos deformados presentes en la malla.

Como se puede observar en la figura 27, el número de elementos deformados es 13, de los 191558 presentes, lo que supone un 0.006% del total. Se dispone de una malla eficaz, que reflejará resultados correctos.

La otra opción que puede ser escogida por el usuario es el tamaño del elemento. Es una decisión que se debe de considerar desde dos puntos de vista, una malla con densidad suficiente y un tiempo de cálculo razonable. Esta puede variarse accediendo a Global>Set, dentro de la herramienta MeshTool.

En primer lugar, y también más importante, se debe escoger un tamaño de elemento que garantice una densidad de malla suficiente. Como se ha explicado con anterioridad, el método de los elementos finitos únicamente aporta la solución exacta en los nodos, aproximando la del resto del conjunto, una densidad de malla insuficiente puede dar lugar a una solución sesgada, donde no se estén ofreciendo los valores máximos o mínimos reales del chasis.

En segundo lugar, se debe de tener en cuenta el tiempo de cálculo de la solución del modelo. Si se escoge un tamaño de elemento muy pequeño no tendremos problemas de densidad de malla, pero el cálculo de la solución puede tardar demasiado. En modelos industriales donde los resultados obtenidos son de gran importancia y se cuenta con un equipo potente, se pueden establecer valores de tamaños de elemento pequeños. En el caso que ocupa esta memoria, es necesario llegar a un equilibrio entre ambos factores, pues no es factible esperar horas o días el cálculo de una solución.

Finalmente la decisión fue escoger un tamaño de elemento de 5mm, con el cual se lograba una malla con buena densidad (ver figura 28) y un tiempo de cálculo aproximado de unos siete a diez minutos.

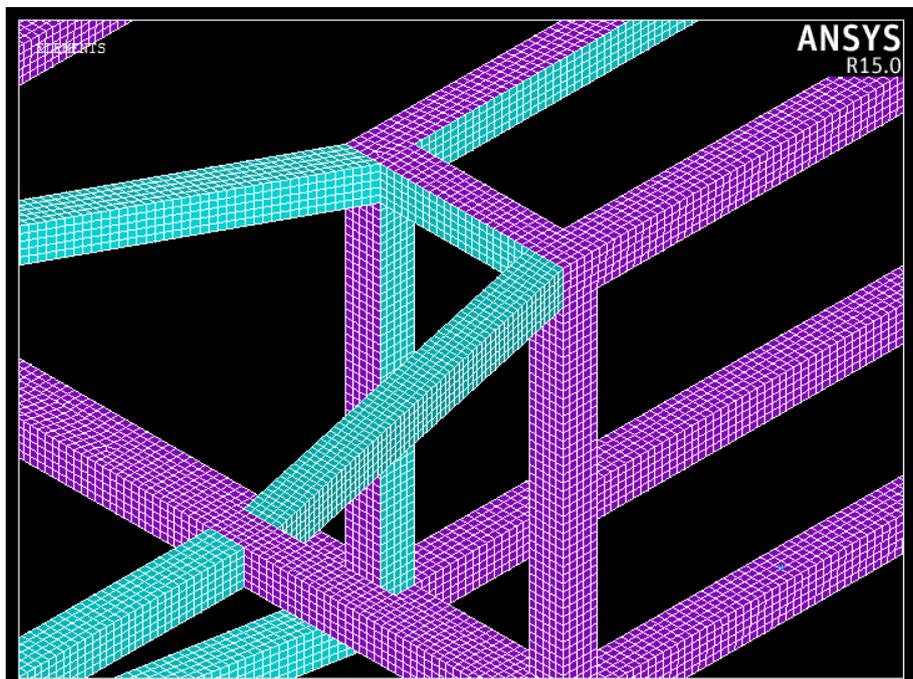


Figura 28: Detalle del mallado en la zona del puente de transmisión del chasis.

4.4 Dificultades encontradas.

Si bien se han ido mostrando alguno de los problemas encontrados durante esta fase de modelado del chasis, con el fin de ofrecer una solución a ellos y mostrar los problemas que de ellos se derivan, en este apartado se muestran los más característicos para poder tenerlos en debida cuenta.

La búsqueda de unos planos con los que poder trabajar fue una de las primeras dificultades, estos planos se tuvieron que ir complementando con diversas informaciones y recursos fotográficos con el objetivo de conocer la disposición de los anclajes del motor y piloto entre otros.

En lo referente a ANSYS, en primer lugar uno de los mayores problemas fue familiarizarse con el entorno CAD, su sencillez y escasas herramientas que faciliten la representación hicieron que esta parte del trabajo resultase laboriosa. Todo lo anteriormente mostrado en el apartado 4.2 es fruto de las continuas verificaciones del modelo por parte del tutor, y de la propia experiencia conseguida.

Otro de los grandes problemas encontrados en la fase de elaboración del modelo, fue lo relacionado con la unión de las múltiples barras que conforman el chasis. Inicialmente se pensaba que el modelo estaba correctamente representado, y hasta que no se lanzaron las primeras soluciones no se percató del error que se estaba cometiendo, por lo que se debió volver a la fase de representación y solventar ese problema.

Estas constantes idas y venidas en la modelización del chasis son muy frecuentes, pues existen errores que no son sencillos de comprobar hasta que no se tiene la solución, por lo tanto el proceso resulta más laborioso de lo que parece en un principio.

El último problema dentro del módulo Preprocessor, fue el relacionado con el tamaño de malla. Se fueron probando sucesivamente distintos tamaños observando la malla, tomando el tiempo de cálculo que tardaba en otorgar la solución y comparando los resultados obtenidos, hasta dar con un equilibrio razonable entre ambos.



5. Análisis del modelo.

Una vez el modelo ya ha sido elaborado y convenientemente mallado, el siguiente bloque en el estudio del chasis, pasa por aplicar las cargas a las que se verá sometido en los diferentes casos y obtener la solución final de cada uno de ellos. Este bloque se engloba dentro del módulo Solution de ANSYS, y se corresponde con el paso preliminar al estudio de los resultados obtenidos.

5.1. Datos de partida.

Las masas externas que van a ser consideradas en el análisis del chasis son la del motor y el piloto, a continuación se presenta el peso de cada uno de ellos y su posición en el chasis para poder ser considerados posteriormente mediante la aplicación de las cargas oportunas.

5.1.1. Motor y situación en el chasis.

En el apartado 2.5 se presentó el modelo escogido para el estudio, un Caterham Seven 360. Este modelo equipa un motor Ford Duratec de 2 litros (ver figura 29), que genera 180 caballos de potencia, y es capaz de alcanzar los 210 Km/h. [4]



Figura 29: Motor DURATEC 2.0 presente en el vehículo escogido.[14]

El motor declara un peso de 120Kg, que serán equitativamente repartidos en cuatro anclajes dispuestos en la zona delantera del chasis, en la figura 30 se puede observar la disposición de éste en un modelo semejante.



Figura 30: Situación del motor y sus anclajes en el chasis.[15]

En el modelo del chasis que ha sido sometido a estudio, los anclajes del motor se disponen de la siguiente manera.

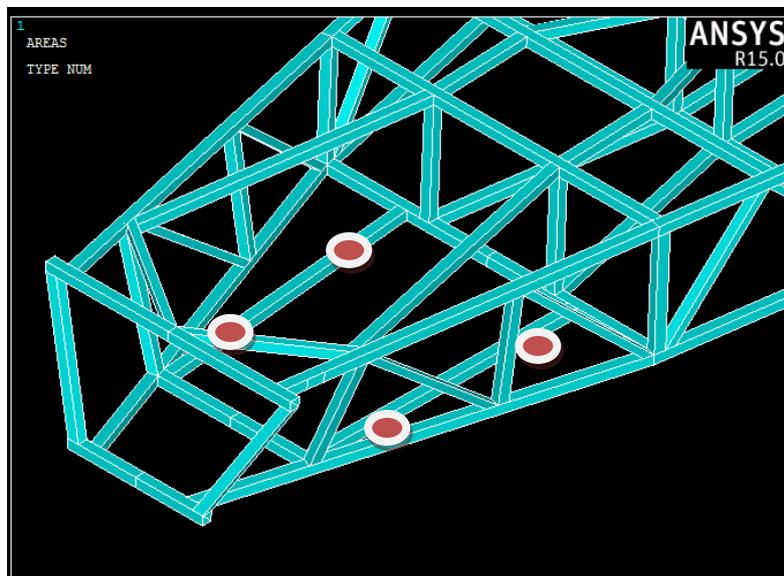


Figura 31: Esquema de la posición de los anclajes del motor.

Siguiendo esta disposición, estos anclajes no van a ser representados geoméricamente, sino que van a ser considerados como elementos MASS en keypoints determinados como se verá en apartados posteriores. De nuevo, es necesario tener en cuenta el sistema de unidades que se declaró en la tabla 2, el cual indica que deberemos de introducir su peso en toneladas.

5.1.2. Piloto y situación en el chasis.

La otra masa externa que va a ser considerada en el análisis es el piloto. La masa del piloto que se va a tomar es de 75 kg, y se va a considerar repartida de forma equitativa entre los cuatro anclajes dispuestos para asegurar el asiento del piloto tal y como se muestra en la figura 32.

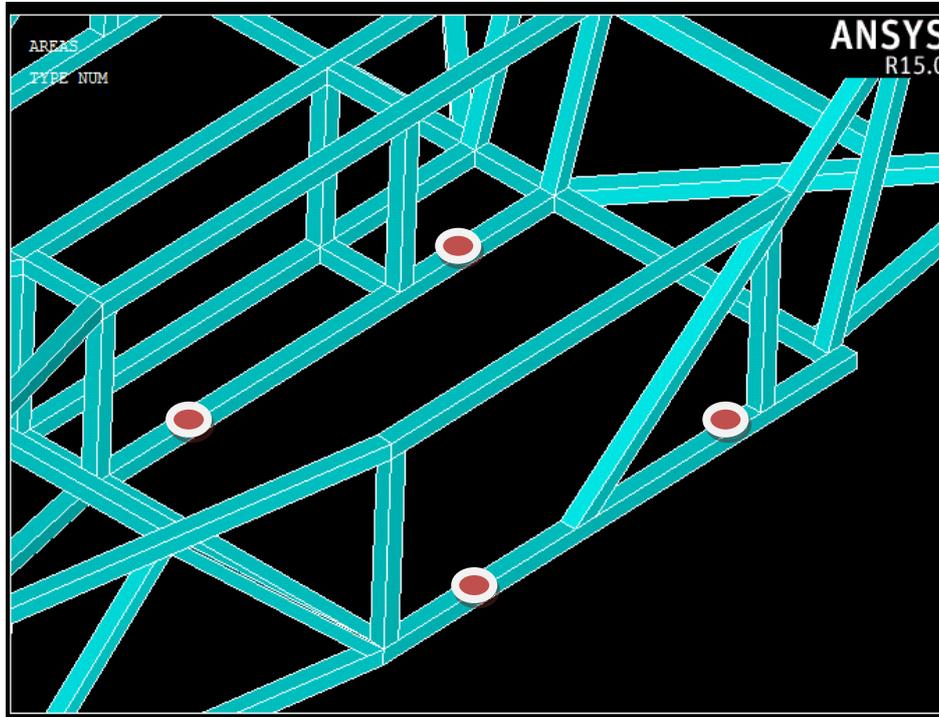


Figura 32: Esquema de la disposición de los anclajes del asiento del piloto en el chasis.

Al igual que en el caso del motor, los anclajes del asiento no van a ser representados geoméricamente. De nuevo se hará uso de los elemento MASS para modelizar esta carga.

5.1.3. Centro de gravedad y peso del chasis en vacío.

ANSYS permite conocer el centro de gravedad y el peso de la geometría que haya sido representada, una vez se han declarado las secciones pertinentes así como la densidad del material.

Los datos que se presentan en la figura 33 corresponden al centro de gravedad y peso del chasis y las masas de motor y piloto. Por tanto para obtener el peso del chasis en vacío será necesario descontar estas dos últimas.

```

TOTAL MASS = 0.25086
The mass principal axes coincide with the global Cartesian axes
CENTER OF MASS <X,Y,Z>=      618.15      60.358      1084.0
TOTAL INERTIA ABOUT CENTER OF MASS
0.12979E+06      792.02      14073.
792.02      0.14703E+06      4636.8
14073.      4636.8      22436.
    
```

Figura 33: Datos de masa total y centro de gravedad reflejados por ANSYS.

El peso del chasis en vacío resultará:

$$0.25086 \cdot 0.120 \cdot 0.075 = 0.05586 \text{ T}$$

Peso chasis en vacío = 55.86 Kg.

Para la correcta interpretación de los datos del centro de gravedad es necesario tener en cuenta el sistema de coordenadas sobre el cual ha sido calculado, y las unidades en las que se presenta, que en este caso son milímetros, en consonancia con la tabla de unidades escogida.

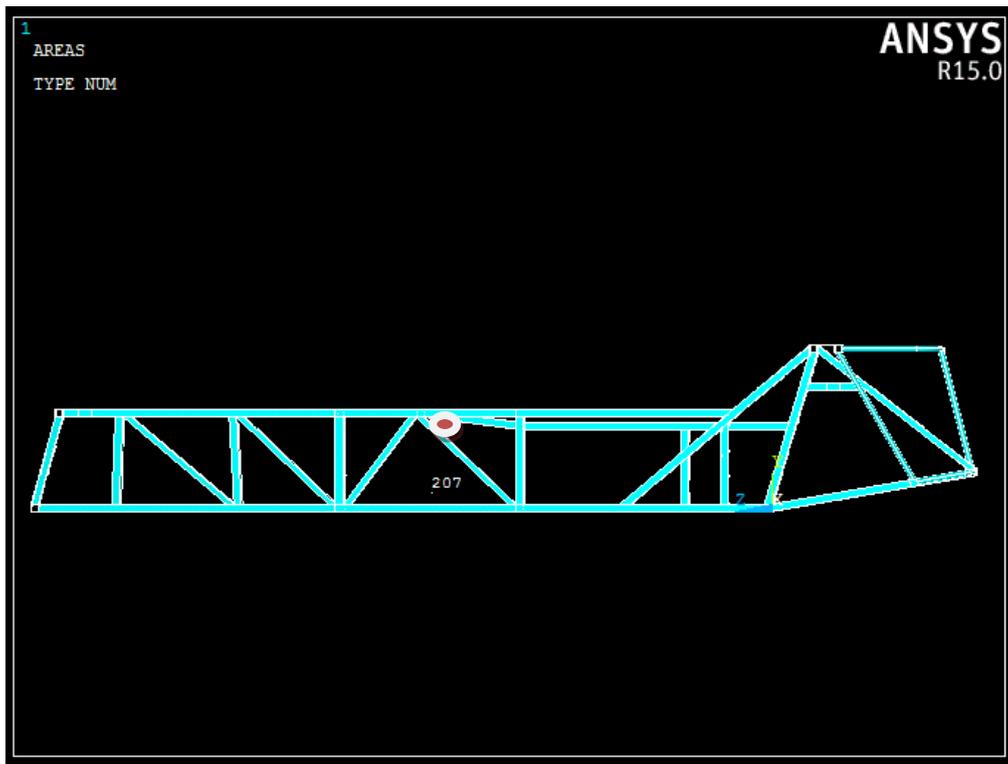


Figura 34: Posición centro de gravedad plano YZ



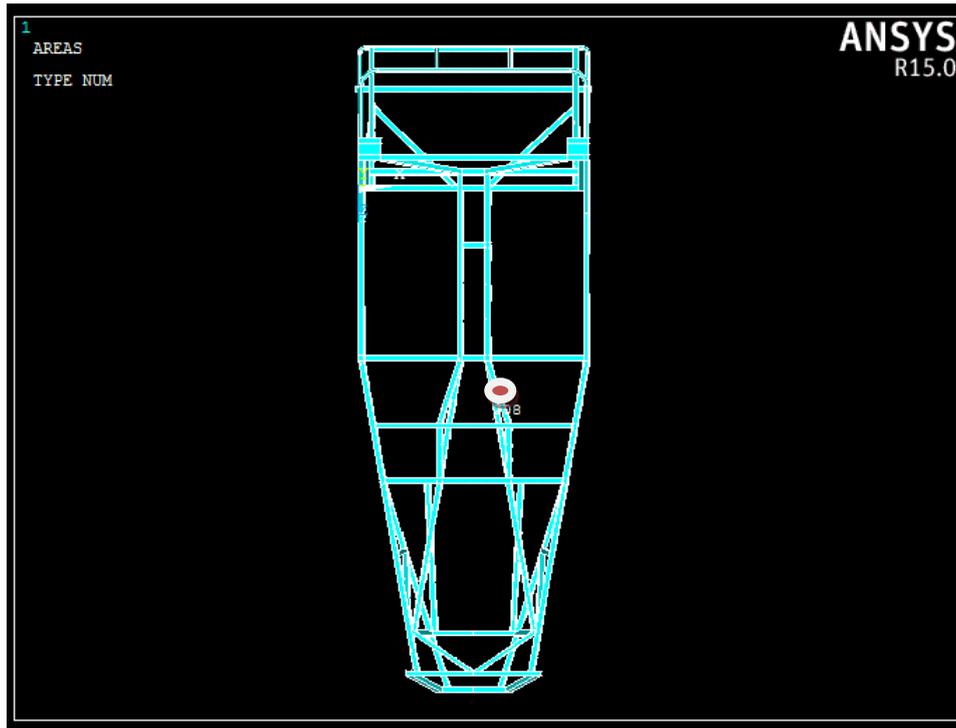


Figura 35: Posición centro de gravedad plano XZ.

La situación del centro de gravedad puede ser importante para determinar las situaciones más desfavorables en el comportamiento del chasis.

5.2. Justificación de las simulaciones.

Previo a la simulación y obtención de resultados de los diferentes estados de carga, es necesario conocer y entender distintos problemas que se pueden presentar en la introducción de las cargas y las restricciones, pues estos a menudo generan comportamientos no esperados y por tanto resultados no idóneos.

5.2.1. Consideraciones previas.

En los diferentes estados de carga que se presentarán a continuación, actúan un conjunto de restricciones y cargas sobre puntos, líneas o áreas. Estas deben de estar debidamente colocadas si se pretende obtener un resultado fiable y podemos encontrarnos con varios problemas que afecten gravemente a la solución.

- Introducción de las restricciones y aceleraciones presentes.

Para la introducción de las diferentes restricciones y aceleraciones presentes en las distintas simulaciones se hace uso del submenú DefineLoads dentro del menú Solution.

Para la asignación de restricciones se siguen los comandos Apply>Structural>Displacement; donde se permite al usuario elegir entre situar la restricción en nodos, líneas o áreas;

posteriormente se seleccionan los diferentes elementos de la familia que haya sido escogida, y por último la traslación o rotación que se quiera restringir mediante el desplegable que aparece.

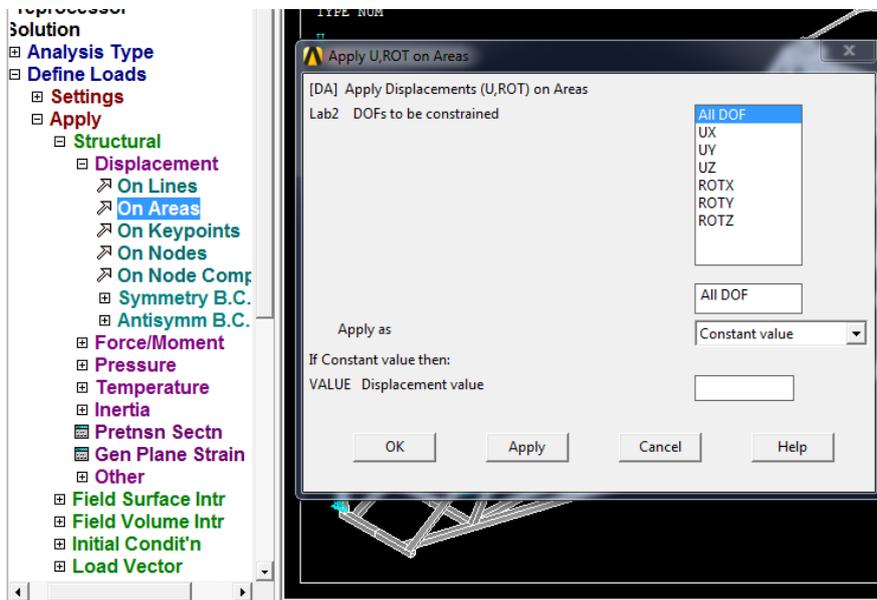


Figura 36: Ejemplo de introducción de restricciones en áreas.

Para la introducción de los componentes de aceleración presentes se siguen los comandos Apply>Inertia>Gravity>Global; y se introduce el valor de los distintos componentes en las unidades pertinentes.

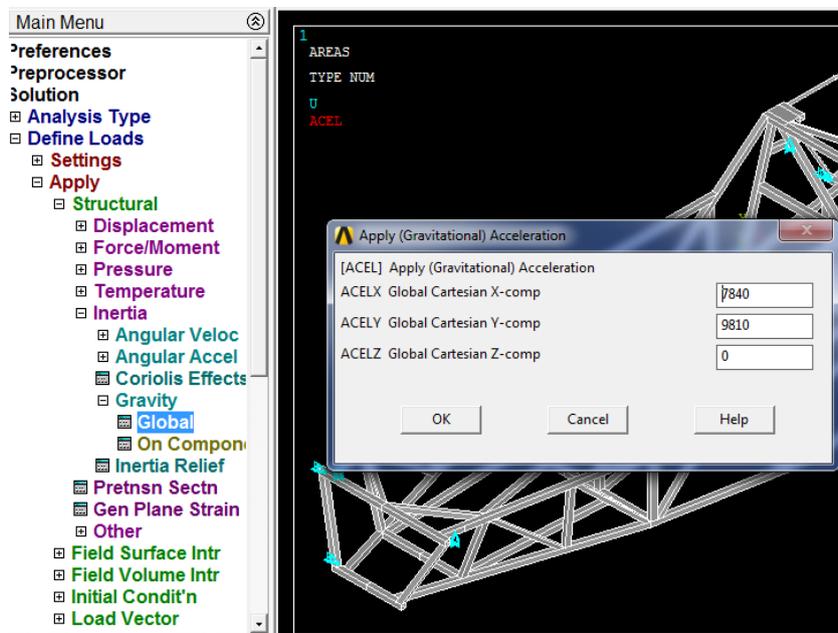


Figura 37: Ejemplo de introducción de los componentes de aceleración.



- Restricciones de todos los grados de libertad.

El uso de restricciones de todos los grados de libertad, es decir en el caso de estudio seis, al tratarse de un elemento SHELL (ver apartado 4.2.1.1), genera comportamientos no deseados sobre el chasis. En primer lugar, la entidad geométrica sobre la que esté dispuesta esa restricción estará altamente cargada, pudiendo ocasionar zonas de concentración de tensión que en ningún caso reflejen el comportamiento global de la estructura. En segundo lugar, se estarán impidiendo diferentes giros propios del comportamiento del chasis, generando así una grave distorsión de la solución.

Por lo tanto se huirá de este tipo de restricciones, que en ningún caso representan el comportamiento real de un chasis.

- Restricciones en áreas.

Este tipo de restricción ha de ser usada con cuidado, pues puede generar zonas de encastre que impidan el giro natural de la estructura.

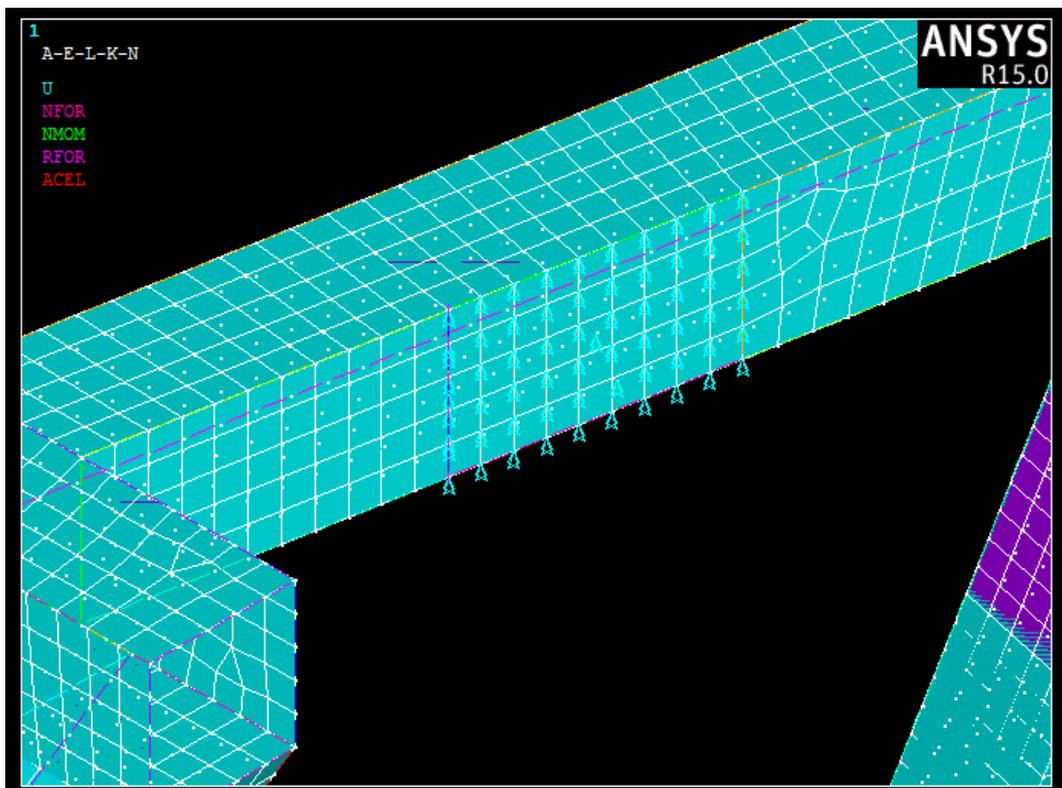


Figura 38: Restricción vertical situada en un área.

En la figura 38 se observa la disposición obtenida mediante la restricción generada en un área, que asigna a todos los nodos interiores el valor de esa restricción. El problema generado es el impedimento del giro natural de esa zona de la estructura, al estar impedido el desplazamiento vertical en nodos adyacentes.

Existen dos alternativas para eliminar este problema. En primer lugar se podría establecer la restricción vertical en un solo nodo, de esta forma se eliminaría el problema del giro permitiendo que la estructura trabajase de forma más aproximada a la realidad. No obstante, esta alternativa generaría un punto de concentración de tensiones, que debería de ser posteriormente eliminado de la solución.

La otra alternativa existente, es la imposición de la restricción vertical sobre una línea también vertical. Esta alternativa, no genera puntos concentradores de tensión y permite eliminar el problema del giro en el chasis, alcanzando de esta forma una solución más real.

A continuación se presentan dos figuras (39 y 40) que ilustran el problema.

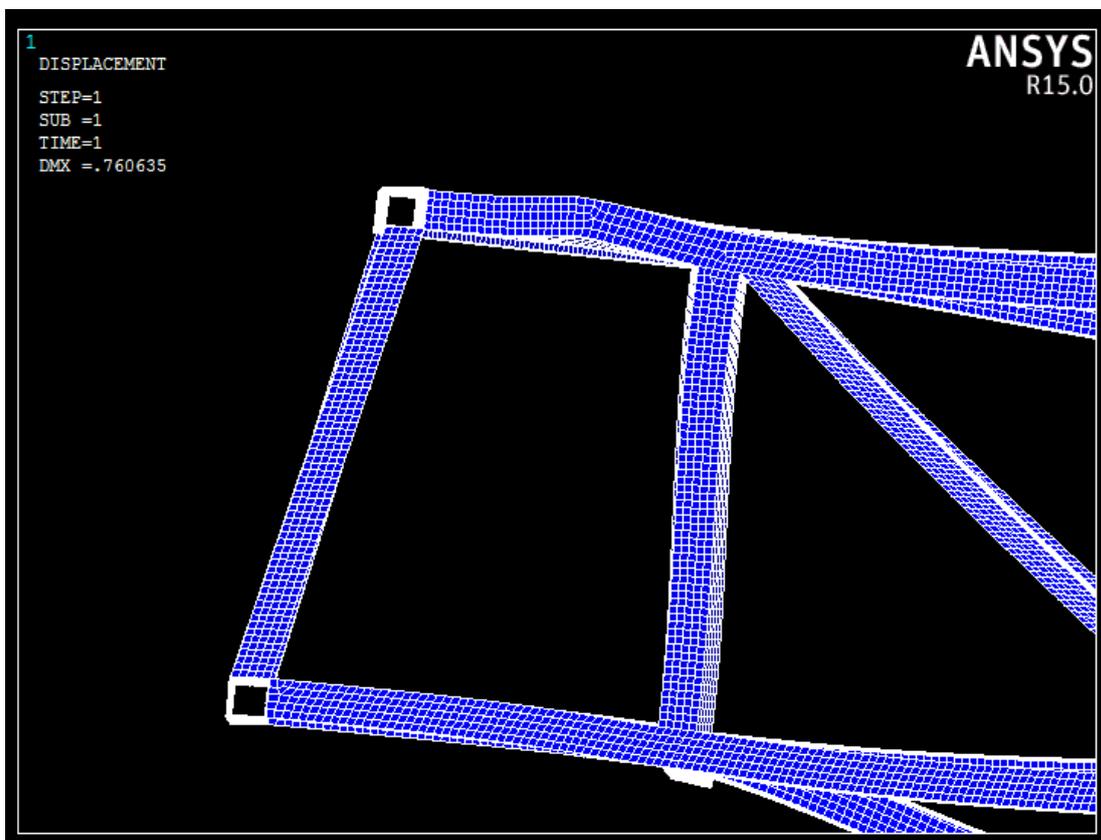


Figura 39: Deformada obtenida con imposición de restricción vertical en área.

Como se puede observar en las figuras la diferencia entre ambas deformadas es notable. La primera de ellas, en la que se ha impuesto una restricción vertical en un área, muestra como se genera una zona que impide el giro de la parte delantera del chasis, manteniéndola casi horizontal. Además la transición entre la zona impedida de desplazamiento vertical y las zonas libres es demasiado agresiva.

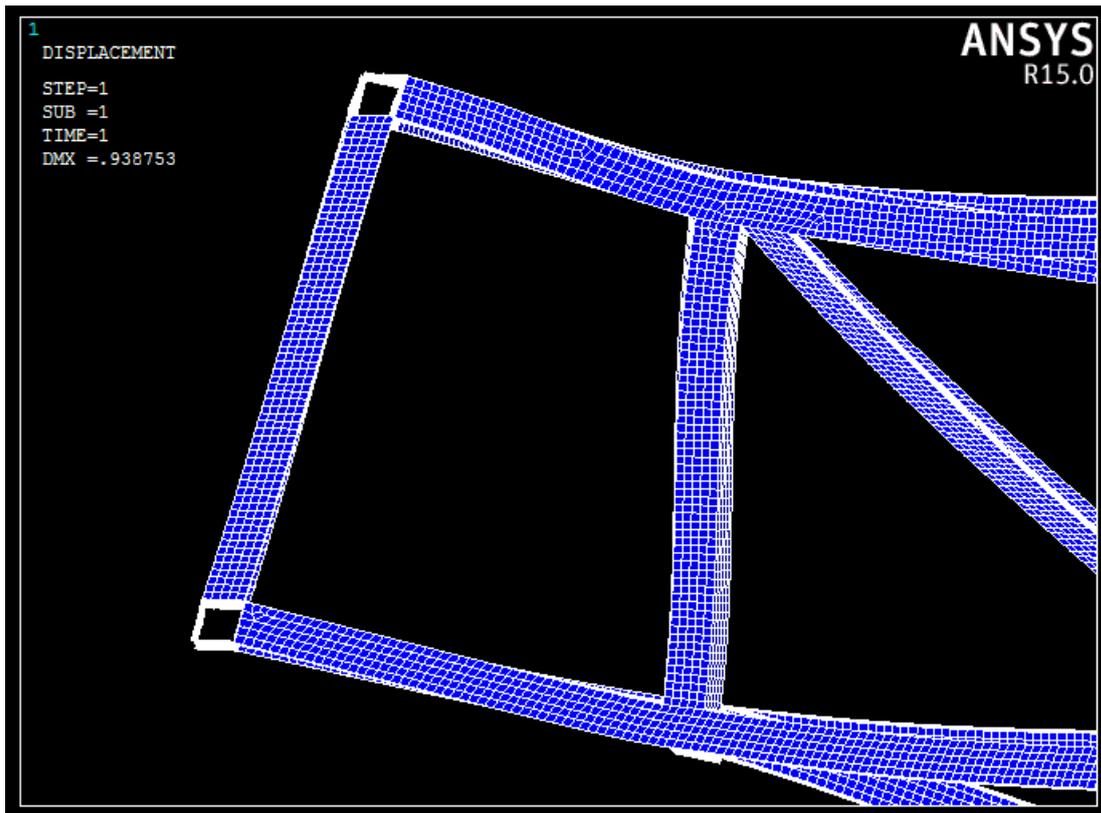


Figura 40: Deformada obtenida con imposición de restricción vertical sobre línea vertical.

En la segunda de las figuras se observa la deformada obtenida, tras modificar las restricciones con la segunda de las alternativas mostradas con anterioridad, es decir imponiendo el desplazamiento en una línea vertical. Se distingue un mejor comportamiento general del chasis y unas transiciones más fluidas entre las diferentes zonas impedidas y libres.

Además también se observa como el problema inicial desaparece, y la zona delantera del chasis se eleva siguiendo la forma del resto del conjunto.

Este problema es determinante para modelizar correctamente las restricciones generadas por los brazos de la suspensión en el chasis. A lo largo de los diferentes estados de cargas que van a ser mostrados a continuación, esta ha sido la solución escogida para todos ellos.

- Introducción de las masas externas consideradas en el modelo.

Tal y como se ha comentado en el apartado 5.1, existen dos masas que van a ser consideradas en los diferentes estados de cargas a los que va a ser sometido el chasis, estas son el motor y el piloto.

Para la introducción de estas masas se hace uso del elemento MASS. Este elemento posee, al igual que el elemento SHELL, seis grados de libertad correspondientes a sus diferentes translaciones y rotaciones en los ejes X, Y y Z; y se pueden definir masas e inercias en los diferentes ejes.

Se siguen los comandos Preprocessor>ElementType>Add/Edit/Delete (ver figura 41).

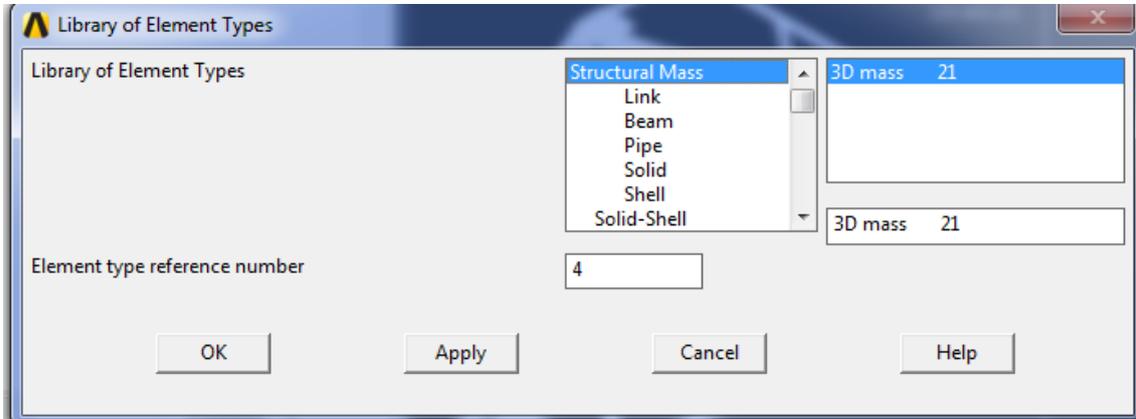


Figura 41: Ventana de elección de elemento MASS21.

Una vez ha sido creado el elemento, para la completa definición de las masas es necesario atribuirle una RealConstant, es decir completar la definición del elemento con la masa que se quiera imponer.

En el caso estudiado, y tal como se ha comentado en los apartados 5.1.1 y 5.1.2, la masa de motor y piloto se encuentra repartida en cuatro anclajes. Por lo tanto la RealConstant que deberemos de considerar será una cuarta parte del peso total de motor y piloto respectivamente (ver tabla 3). Nuevamente se deberá respetar el sistema de unidades escogido.

	Masa total (T)	RealConstant(T)
Motor	0.120	0.03
Piloto	0.075	0.01875

Tabla 4: RealConstant para cada masa externa considerada.

Para la introducción de una nueva RealConstant se sigue Preprocessor>RealConstants>Add/Edit/Delete, se selecciona el tipo de elemento sobre el que se quiere aplicar, y se completan los datos. Se deben completar los recuadros MASSX, MASSY, y MASSZ con los datos de la tabla 3.



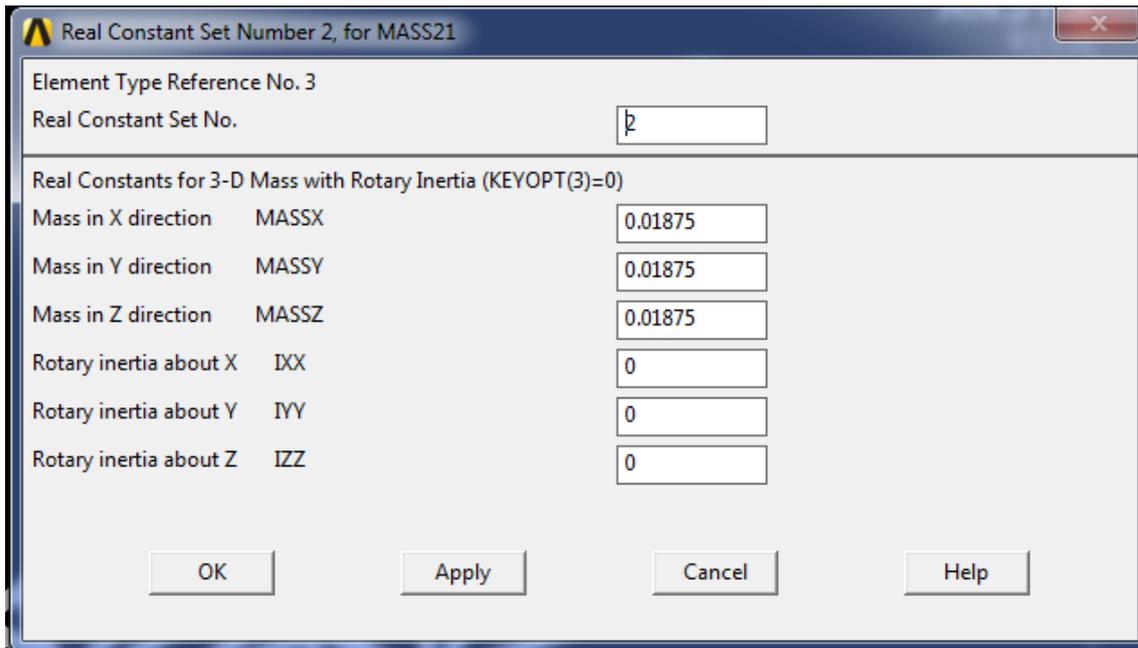


Figura 42: Ventana de introducción de datos de la RealConstant.

Si bien para la definición del elemento MASS y de las dos RealConstant necesarias, no es necesario haber mallado el modelo, para la creación final de este tipo de elemento si es necesario haber completado el módulo Meshing.

La manera de modelizar la masa de motor y piloto, es considerarlas como masas puntuales repartidas en los anclajes, por lo tanto se crearan estos elementos tipo MASS en los keypoints asociados a estos diferentes anclajes. La manera de proceder para ello es la siguiente.

En primer lugar es necesario cambiar el tipo de elemento con el que se está trabajando, para ello se escribe en la línea de comandos de ANSYS (situada en la parte superior de la pantalla) "type,X". Esto cambia el tipo de elemento al identificado con el número indicado en el lugar de la X, en el caso estudiado al tener únicamente dos elementos, "type,2" será el elemento MASS que hemos definido.

Una vez definido el tipo de elemento, es necesario indicar la RealConstant con la que se va a trabajar de las dos existentes. Para cambiar el tipo de RealConstant, se introduce en la línea de comandos "real,X", siendo X el número identificativo de cada RealConstant creada.

Finalmente, una vez situada la posición de los diferentes anclajes, se asocia al keypoint oportuno el elemento MASS con la RealConstant determinada, con la ayuda de la herramienta de selección que aparece escribiendo en la línea de comando "e,p".



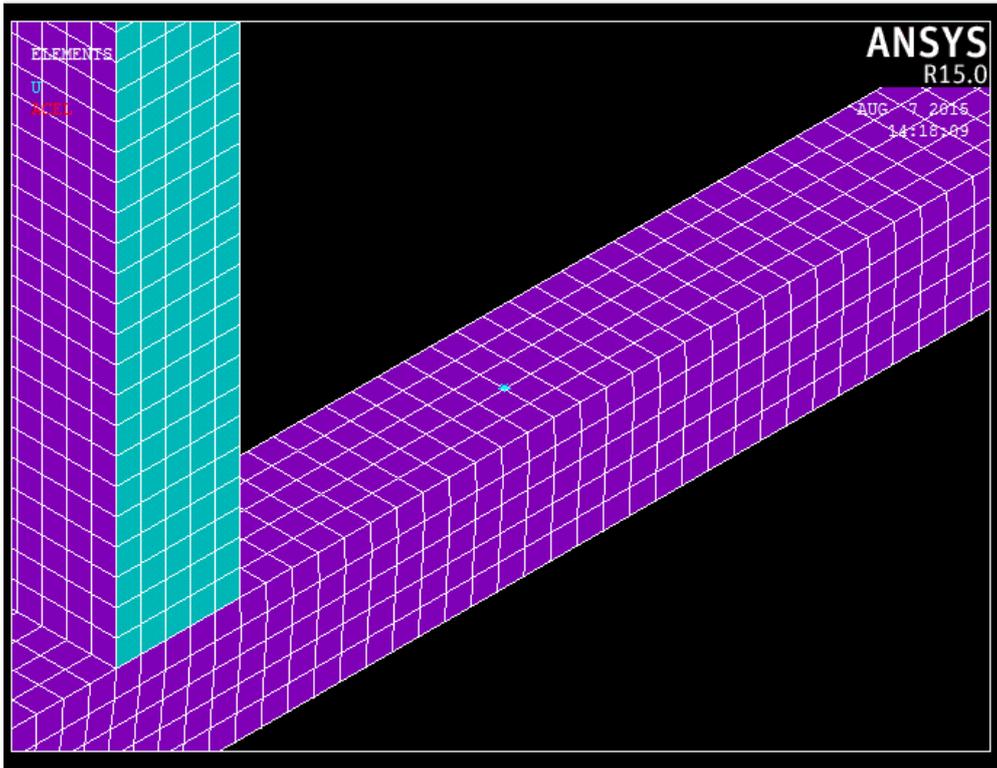


Figura 43: Detalle de la creación de una masa puntual.

Finalmente la masa puntual creada se representa mediante un asterisco azul en el punto seleccionado (ver figura 43). Se deben introducir los diferentes 8 puntos de anclaje con la RealConstant determinada en cada caso para poder definir por completo las masas de piloto y motor de forma correcta en el entorno ANSYS.

5.2.2 Simulación1: Aceleración.

La primera de las simulaciones a las que se somete el chasis, es su comportamiento ante una aceleración. La fuerza del motor, transmitida a las ruedas a través del conjunto de transmisión, provoca una fuerza contraria al sentido del rozamiento rueda-calzada que permite que el vehículo adquiera velocidad. [25]

La situación límite considerada para esta simulación es la condición de máxima adherencia, es decir, la fuerza resultante de la aceleración longitudinal a la que se verá sometido el chasis, en ningún caso superará a la fuerza de rozamiento existente. Esto determina el valor de la aceleración que se debe introducir a partir del coeficiente de rozamiento existente.

$$m * a = \mu * m * g$$

$$a = \mu * g$$

m: masa vehículo.

a: aceleración longitudinal.

μ : coeficiente de rozamiento.



g : valor de la gravedad ($9.81 \text{ m}^*\text{s}^2$).

Por tanto el único parámetro que se debe tener en cuenta para esta primera simulación es el coeficiente de rozamiento rueda-calzada. Este coeficiente depende a su vez de múltiples factores, que hacen que la determinación de su valor exacto en cada situación sea una tarea compleja, por lo que se toman aproximaciones de este. En primer lugar depende del estado de la calzada, tanto de la calidad o desgaste del pavimento, como de su estado (seco, mojado, helado...)

Otro factor igualmente influyente es el estado de los neumáticos, cuanto mayor desgaste presenten en mayor medida se verá afectado el valor de dicho coeficiente. También cobrará importancia la temperatura de estos, obteniéndose los mejores resultados a su temperatura óptima, si bien este último apartado resulta más crítico en neumáticos de competición.

Por último, también debe de ser considerado el tipo de neumático usado. Dentro de la amplia gama de neumáticos existentes, se encuentran diversos tipos de compuestos que otorgan distintas capacidades dinámicas. Los neumáticos de competición son aquellos diseñados para aportar el máximo agarre, y por tanto los que mayor coeficiente permitirán alcanzar. [26]

El vehículo que presenta el chasis sometido a estudio, es un coche que puede ser usado en la vía pública, pero que no esconde su carácter deportivo y a menudo es usado en diferentes competiciones o bien eventos privados en circuitos. Por tanto, las pruebas a las que se va a someter, serán consideradas en situaciones límite a las que puede verse sometido en un circuito.

Considerando un estado del pavimento propio de cualquier circuito de competición (mayor calidad del asfalto), el uso de unos neumáticos tipo semi-slick que presentan un mayor agarre que los convencionales y son adecuados para su uso complementario en circuito y vía pública; y unas condiciones climatológicas favorables, es decir piso completamente seco; se puede tomar un valor de coeficiente de rozamiento de 0.8.

$$a = \mu * g$$

$$a = 0.8 * 9.81 = 7.84 \text{ (m}^*\text{s}^2)$$

El sentido de esta aceleración será el positivo del eje Z (longitudinal) y deberá de ser convertida a las unidades pertinentes.

Por último, también se debe de considerar el efecto de la aceleración gravitatoria, con su valor habitual de $9.81 \text{ m}^*\text{s}^2$, también convertida correctamente y con una especial consideración. El valor de la gravedad, será usado por ANSYS para tener en cuenta el efecto del propio peso del chasis, así como la de las masas externas consideradas (que fueron introducidas en toneladas). Para que este efecto sea correctamente considerado, el sentido de la aceleración introducida en el programa será el positivo en el eje Y, pues los cálculos que está realizando ANSYS son inerciales, contrarios por tanto al sentido de la aceleración.



Por lo tanto el valor de la gravedad a la que se verá sometido el chasis en la simulación de aceleración, convenientemente convertido a las unidades seleccionadas con anterioridad y en sus componentes X, Y, Z, será:

$$a = (0, 9810, 7840) \text{ mm} \cdot \text{s}^2$$

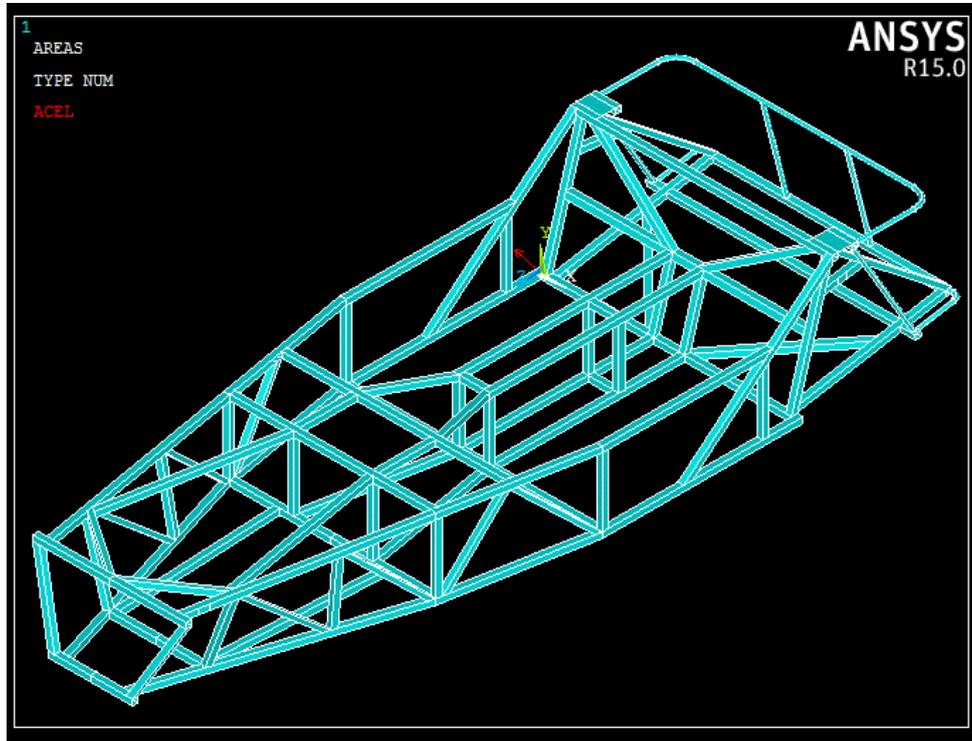


Figura 44: Dirección y sentido de la aceleración global en el caso de aceleración.

Una vez considerada la dirección y sentido de la aceleración global a la que se ve sometido el chasis, se deben introducir convenientemente las diferentes restricciones presentes. El vehículo que es caso de estudio presenta tracción en el eje trasero, por lo tanto en ese eje se situarán unas restricciones longitudinales que simularán los efectos a los que se verá sometido el chasis en esa zona.

Al igual que ocurre en el caso del eje delantero, el vehículo estudiado equipa unos brazos de suspensión que no han sido modelizados, y en los cuales se sitúan los bujes de las ruedas. Por tanto, se ha de simplificar la situación de los anclajes guardando siempre una correlación con la situación real.

La disposición final de estas restricciones se detalla en la figura 45. Como se puede observar se han impuesto estas restricciones en áreas si bien en el apartado 5.2.1 se advirtió de los problemas que derivan de ello. Sin embargo, en este caso resulta más conveniente esta disposición de las restricciones, afectando poco a la solución. Con ella, se consigue simular el efecto de los elementos que unen los brazos de suspensión con el chasis, y que van soldados a este último.

Como las restricciones están impuestas en pequeñas áreas, no se presenta de forma grave el problema de restricción de giro. Además, los elementos que unen los brazos de suspensión con el chasis, no deberían verse afectados por este problema, por lo que resulta una disposición apropiada.

No obstante, al situar pares de restricciones longitudinales en diferentes caras a lo largo del eje Z, se impide el efecto poisson en la estructura. Sin embargo en este caso únicamente se ve impedido en una barra que no supone una representación mayoritaria del chasis, y que por tanto puede ser aceptado sin que afecte en gran medida a la solución final.

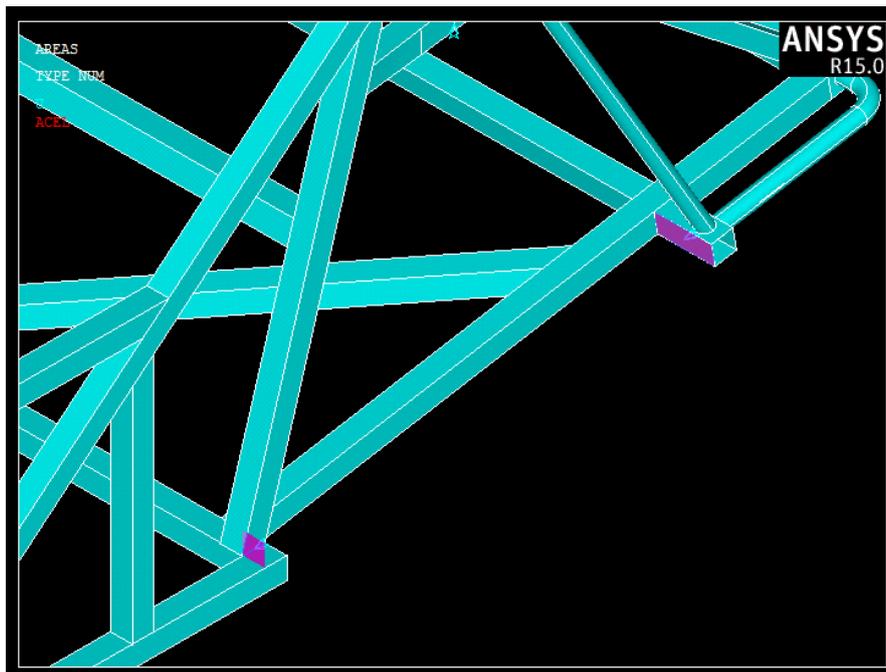


Figura 45: Detalle de las restricciones longitudinales del eje trasero.

La siguiente restricción que debe considerarse, es la relacionada con el conjunto de la suspensión. Como se ha comentado con anterioridad, la condición límite dispuesta es la de adherencia máxima, esto quiere decir que las cuatro ruedas del vehículo deberán de estar en contacto con el suelo de forma permanente.

Para simularlo, se deberán situar restricciones verticales en los diferentes puntos de anclaje de la suspensión con el chasis.

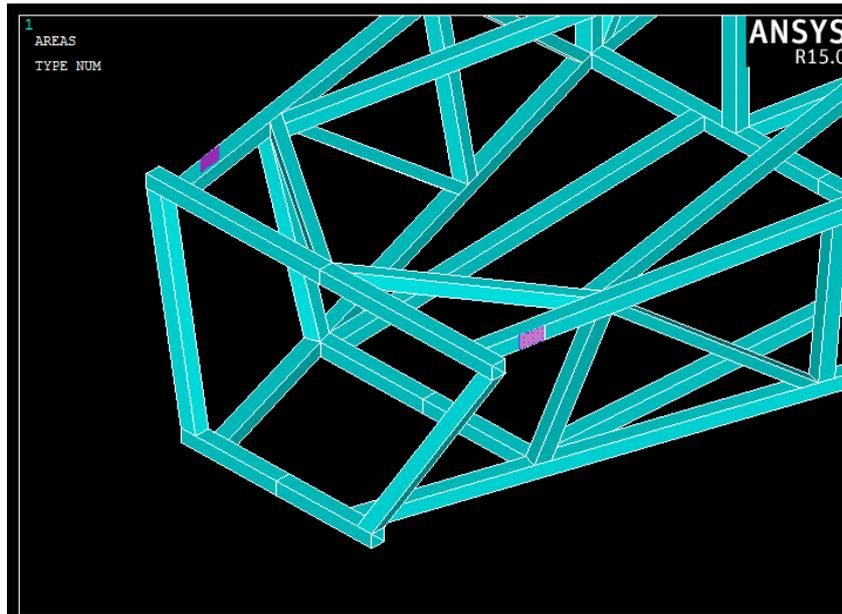


Figura 46: Detalle zonas de anclaje de los brazos de la suspensión delantera.

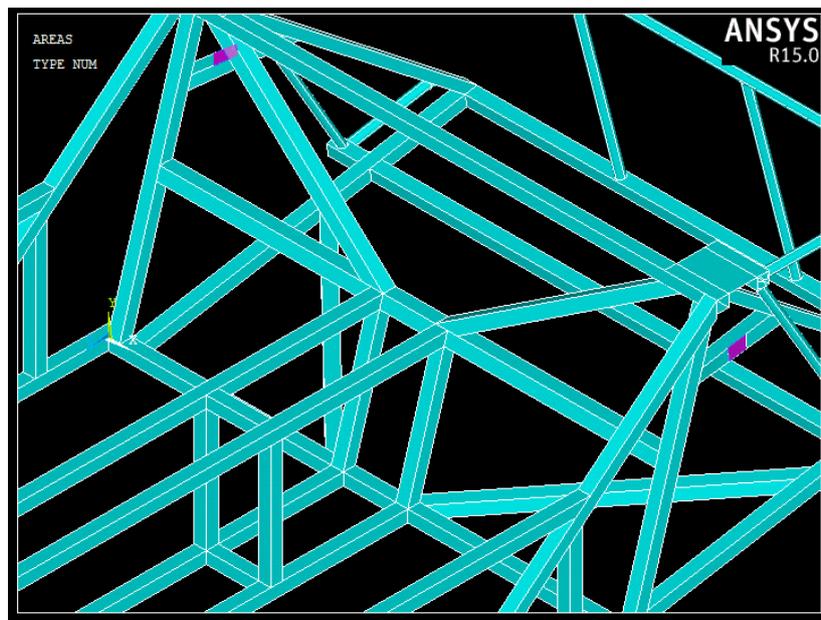


Figura 47: Detalle zonas de anclaje de los brazos de la suspensión trasera.

En las figuras 46 y 47, se presentan las cuatro zonas de anclaje de los brazos de la suspensión delantera y trasera que han sido modelizados en forma de áreas. En este caso sí se presenta el problema detallado en el apartado 5.2.1, y que provoca un comportamiento global del chasis inadecuado y que se aleja de la realidad.

Por lo tanto la solución tomada fue disponer estas restricciones verticales en cuatro líneas correspondientes a cada una de las cuatro zonas de anclaje.

Por último se ha de considerar una restricción extra, necesaria para la solución del modelo sin que ANSYS genere un error durante ésta. A pesar de que no existen fuerzas en la dirección del eje X, y por tanto en una primera aproximación no debería de considerarse restricción alguna en esta, ANSYS sí necesita que exista una restricción en este eje, para poder lanzar la solución de forma correcta y no generar un error.

La manera de solventar esta particularidad, es imponer una restricción en el eje X en un nodo cualquiera, de manera que el chasis quede restringido en los diferentes ejes de traslación. Esta medida en ningún caso afecta a la solución final y no genera tampoco un punto de concentración de tensiones pues no se presentan fuerzas en esa dirección. Si al solucionar el modelo, se observa un punto de singularidad de tensiones, o bien la resultante en ese nodo no es cero o próxima a ese valor, existe algún error en la imposición de cargas o restricciones que ha de solventarse.

Después de imponer esta última restricción únicamente queda por situar los ocho elementos MASS que simulan el efecto de las cargas externas, tal y como se explicó en el apartado 5.2.1.

Una vez introducidas todas las restricciones y aceleraciones que se han presentado así como las masas externas consideradas ,el modelo se encuentra en situación de poder ser resuelto y se presenta como en la figura 48.

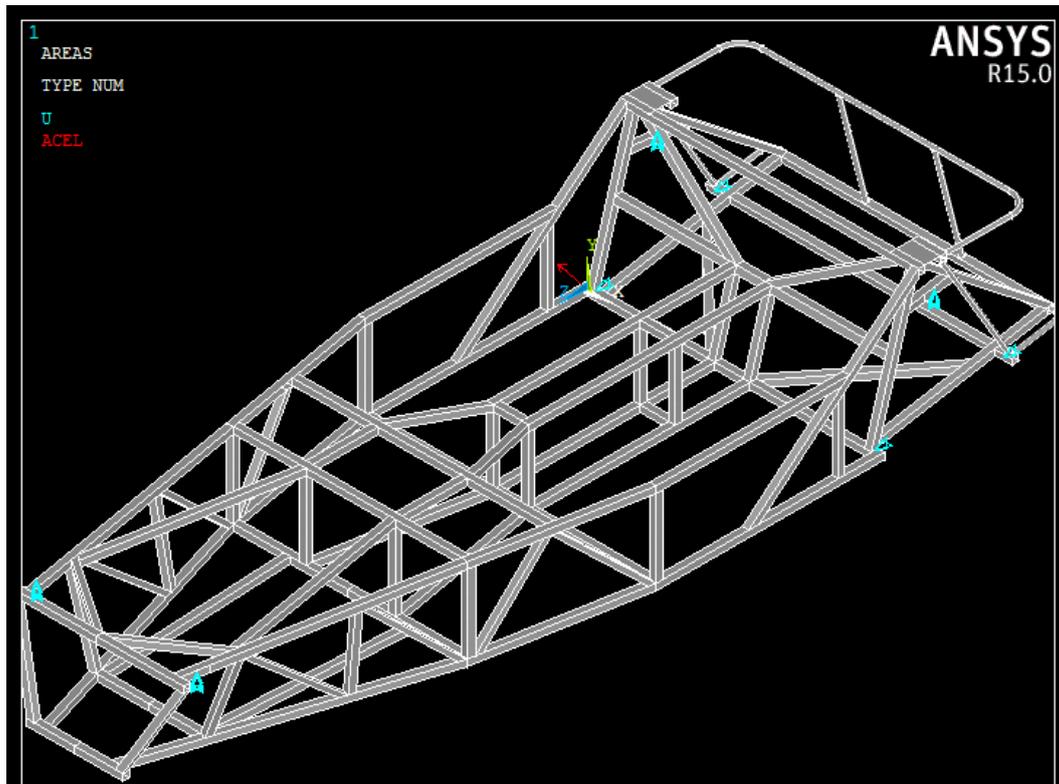


Figura 48: Restricciones y aceleración presentes en el caso de Simulación1: Aceleración.

5.2.3 Simulación 2: Frenada.

La frenada consiste en la reducción de la velocidad del vehículo, mediante la absorción de la energía cinética transformándola en calor gracias al conjunto de frenado. [19] Si se aplica una fuerza de sentido contrario a su movimiento se originará una deceleración que lo ralentizará, y de nuevo el caso límite de frenado será la fuerza adherente máxima que pueda soportar el neumático. [26]

La componente vertical de la gravedad, será considerada como en el primer caso de simulación, es decir en el sentido positivo del eje Y. Particularizando la componente Z al caso de frenado que se estudia, esta deberá situarse en el sentido negativo del eje Z, representando la deceleración que se pretende conseguir.

Por lo tanto en este caso las componentes del vector aceleración global al que se ve sometido el chasis son:

$$a = (0, 9810, -7840) \text{ mm} \cdot \text{s}^2$$

En el caso de frenada, el esfuerzo necesario para disminuir la velocidad se aplica en las cuatro ruedas, pues todas ellas frenan. No obstante, en la simulación de este caso no podemos restringir longitudinalmente las cuatro ruedas pues estaríamos induciendo un error. Esta disposición anularía el efecto poisson en todo el chasis, no permitiendo que este se contraiga como es propio de esta situación dinámica.

En la realidad, o bien habiendo representado todo el sistema de suspensión, si se podría imponer una restricción longitudinal en el buje de la rueda, y la suspensión si permitiría al chasis comportarse de forma natural. Todo ello complica enormemente la solución y en este caso ha de simplificarse la situación.

La mayor potencia de frenada siempre se encuentra en el eje delantero, lo que le sitúa como el más crítico, además la parte posterior tiende a descargarse, inclinándose más o menos hacia delante el vehículo dependiendo del reparto de masas que presente. Todo esto hace que se deba situar la restricción longitudinal en la zona delantera, dejando la posterior libre, esta disposición es la más acertada para representar una situación límite de frenado en el caso de estudio.

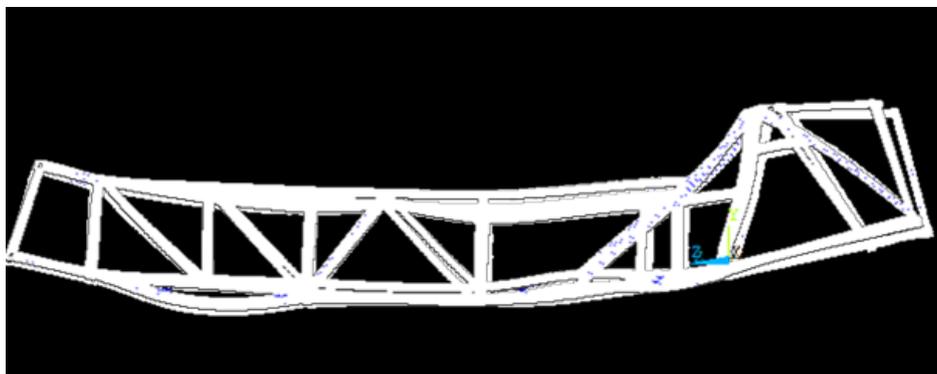


Figura 49: Superposición diferentes casos de restricciones longitudinales en el caso de frenada.

En la figura 49 se observa la superposición de la deformada del chasis en los distintos casos, una correspondiente a la restringida en ambos ejes y otra correspondiente a la restricción en el eje delantero, tal y como se ha explicado.

Existen varias zonas en la figura 49 claramente diferenciadas que ilustran el problema que se ha mostrado. En la zona posterior del chasis la deformada correspondiente al caso de restricción en ambos ejes permanece casi inalterable, pudiendo observarse la clara diferencia con el caso de una única restricción en el eje delantero. Esta última tiende a levantarse y acortarse, por una parte fruto de las masas externas y por otra fruto de la deceleración sufrida, comportándose así de una forma más natural y asociada a un caso de frenada.

De igual manera, la zona media del chasis sigue el mismo comportamiento acortándose en mayor medida la deformada propia del caso de única restricción en eje delantero, queda demostrado por tanto como esta disposición sí permite observar el efecto poisson en el conjunto del chasis, y en consecuencia resulta más acertada en este caso particular.

Una vez se ha determinado que la simulación más adecuada es aquella que sitúa la restricción longitudinal en el eje delantero, se encuentra otro problema asociado a ella. El chasis sometido a estudio incorpora una zona de anclajes para los brazos de suspensión delantera semejante a la que se muestra en la figura 50, y que está formado por cuatro anclajes dispuestos dos a dos en las barras de la zona delantera del chasis.



Figura 50: Detalle de los anclajes de los brazos de suspensión del eje delantero en el chasis.[16]

El problema lo originan las diferentes restricciones longitudinales dispuestas en ambas barras, estas al no permitir la variación de longitud entre ellas, impiden el giro natural de la estructura. En la figura 51 se muestra la disposición inicial de las restricciones longitudinales en los diferentes puntos de anclaje, y en la figura 52 se muestra la deformada resultante.

En esta última se pueden observar las deformaciones acusadas de la estructura y su comportamiento no idóneo, generándose zonas cóncavas y convexas que indican una disposición errónea de las restricciones.

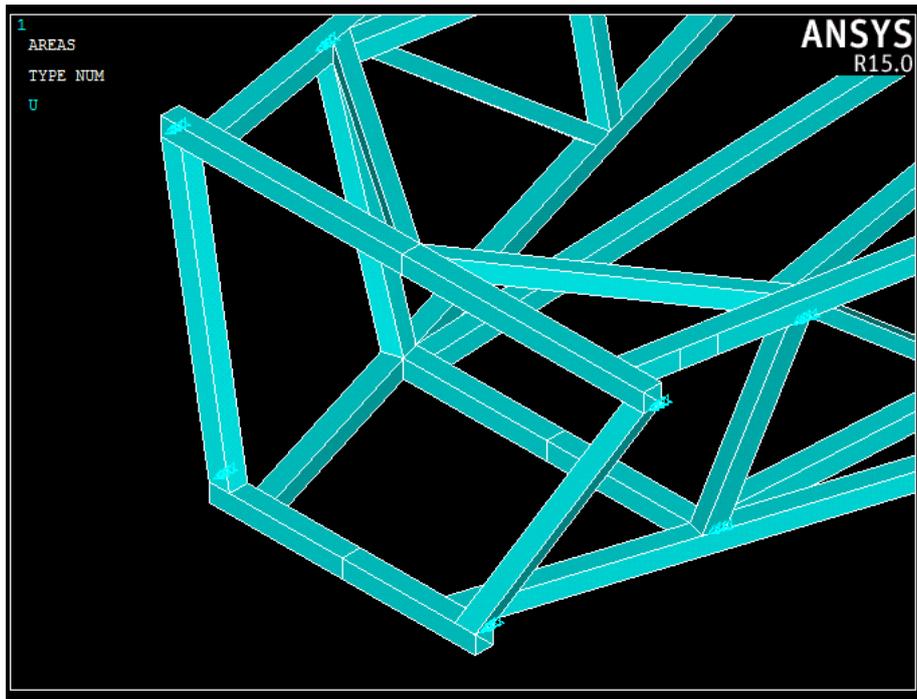


Figura 51: Disposición inicial de las restricciones longitudinales en los puntos de anclaje. (Caso frenada)

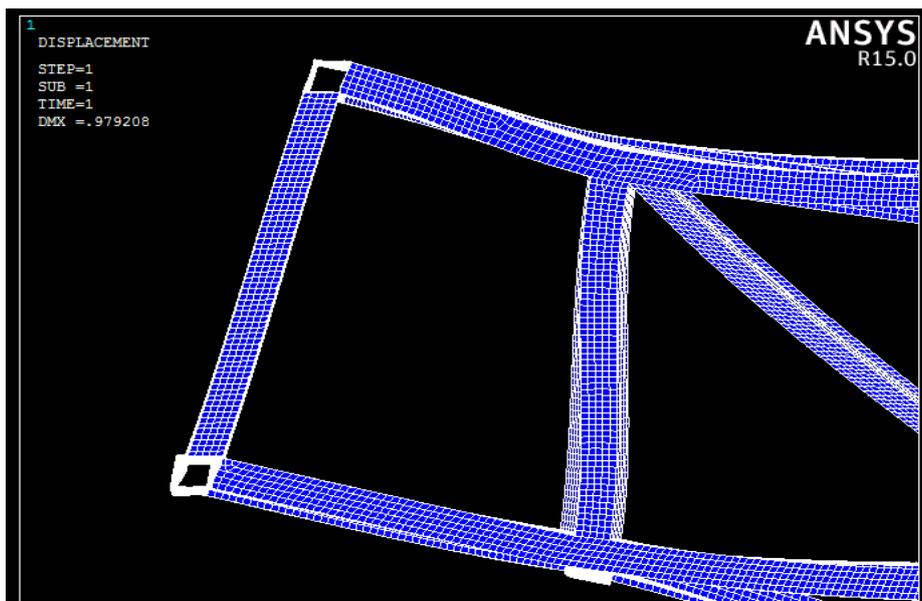


Figura 52: Deformada resultante de la imposición de las restricciones longitudinales en los cuatro anclajes.

Para resolver este problema existen varias soluciones. Una de ellas sería tal y como ya se ha comentado con anterioridad, representar el sistema de los brazos de suspensión y colocar la restricción longitudinal en el buje de la rueda. No obstante esta solución fue desechada, pues para alcanzar una mejora importante en la solución se debería de conocer la geometría exacta de la suspensión del coche, datos de los que se carecía; además complicaba el modelo enormemente.

Otra posible solución pasa por eliminar las restricciones longitudinales, e intercambiar estas por un conjunto de fuerzas equivalentes. Estas tendrían un octavo del valor de la reacción en el eje Z, y se situarían en los cuatro anclajes de cada lado del chasis. Con esta solución desaparece el problema en la deformada, no obstante es necesaria la imposición de una restricción longitudinal en un nodo cualquiera para que ANSYS no genere errores comentados ya en esta memoria. La imposición de esta restricción en el nodo, no afecta a la solución al no tratarse de un punto de singularidad de tensiones, el valor de la reacción en ese punto debería de ser próximo a cero.

No obstante la solución que se tomó finalmente, fue prescindir de un par de restricciones longitudinales, concretamente las de las barras inferiores (por estar estas situadas más cerca del centro de gravedad), lo que erradicaba igualmente el problema de la deformada y otorgaba una solución acertada. La razón fue la mayor sencillez del modelo, pues no se debió de colocar cuidadosamente cada uno de los valores de fuerza nodo por nodo, y también porque otorgaba una solución más que aceptable para el caso, siendo casi inapreciable la mejora alcanzada con la solución anteriormente descrita.

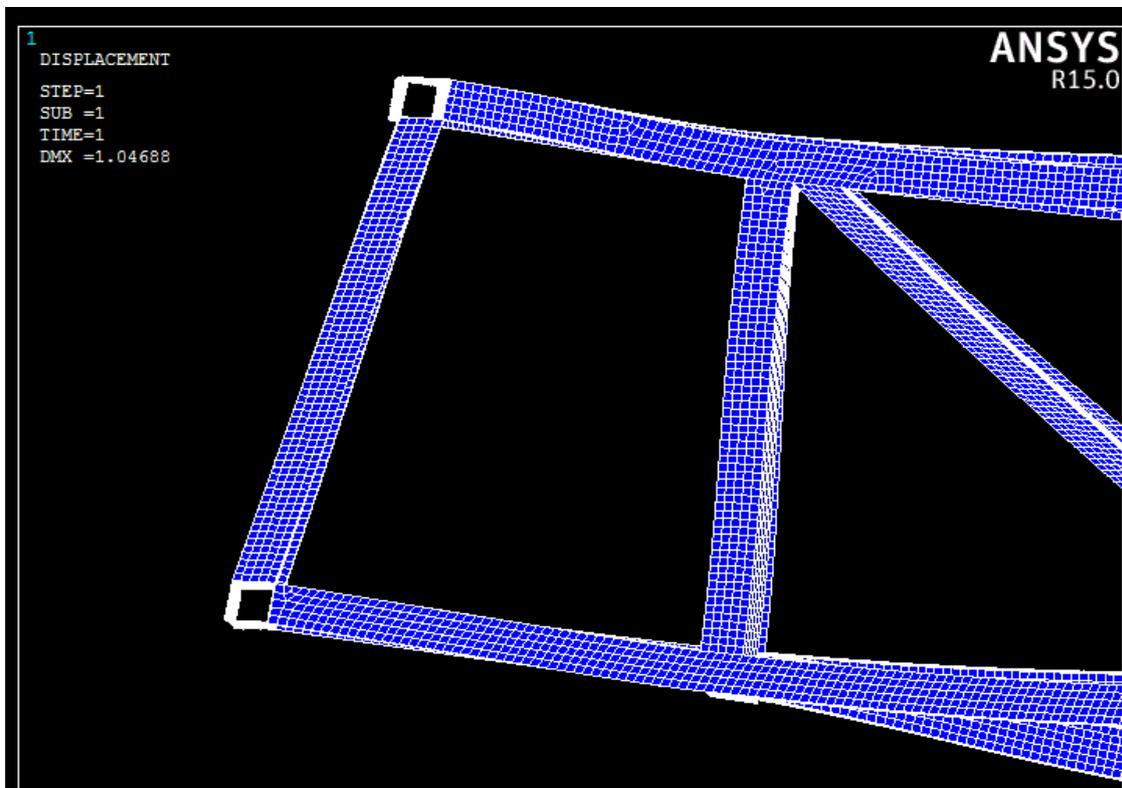


Figura 53: Deformada resultante tras solventar el problema con la última de las soluciones propuestas.



Como se aprecia en la figura 53 la diferencia en la deformada es notable, siendo esta última muestra de un comportamiento más natural y menos estridente.

Una vez solucionado este problema, únicamente es necesario imponer las restricciones verticales propias de la suspensión, que serán dispuestas de igual forma que lo explicado en el apartado 5.2.2 de aceleración; y una restricción en el eje X para que ANSYS no genere errores al solucionar. La disposición final de las distintas restricciones y aceleraciones presentes se muestra en la figura 54.

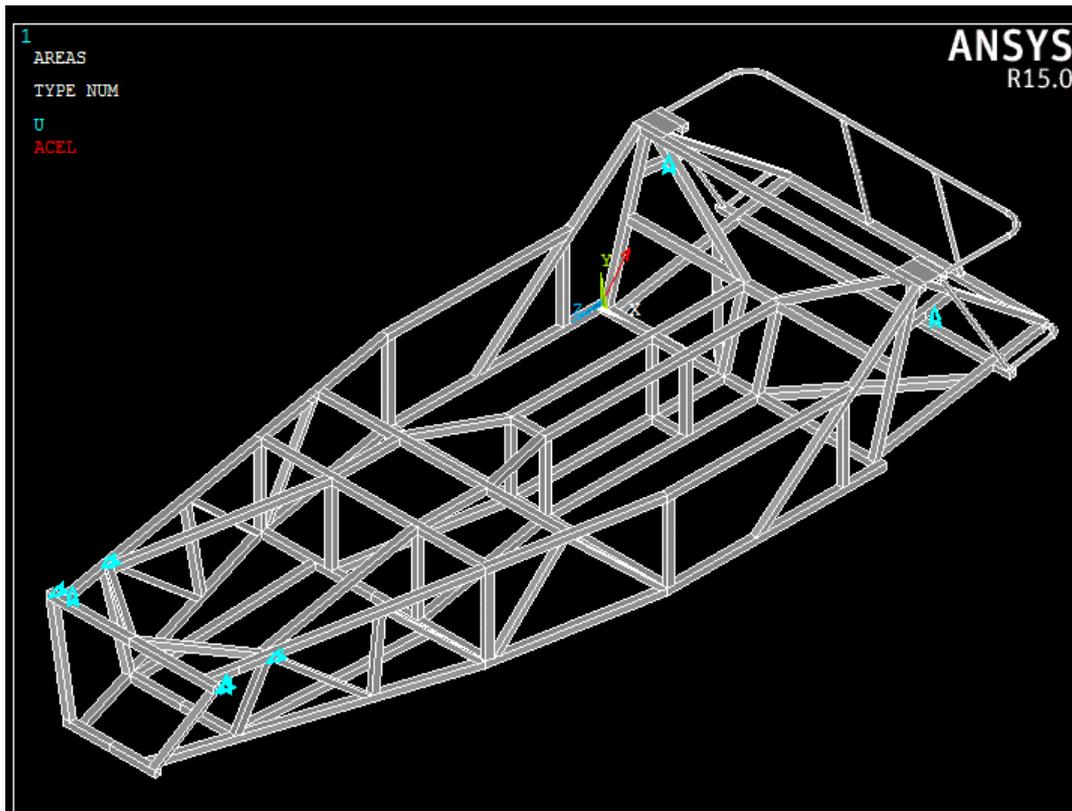


Figura 54: Disposición final de las restricciones y aceleración presentes en el caso Simulación2: Frenada.

5.2.4 Simulación 3: Paso por curva a derecha.

El fenómeno del paso por curva es complicado de modelizar de forma cercana a la realidad, el comportamiento del vehículo frente a esta situación depende de múltiples factores, como los distintos ángulos de caída, avance, salida...o el fenómeno de deriva a velocidades moderadas y elevadas.[19] Por esta razón resulta necesario realizar simplificaciones sobre el modelo, que permitan aproximarnos al comportamiento real con una solución menos compleja.

En el chasis objeto de estudio, el piloto no se sitúa centrado, por tanto no se puede considerar el modelo como simétrico lo que provoca que se deba de efectuar simulaciones para los dos casos de paso por curva posible.

A diferencia de los casos de aceleración y frenado, ahora la aceleración cambia de componentes, se mantiene la aceleración gravitatoria en el sentido positivo del eje Y (por las razones que ya han sido explicadas) y se introduce una aceleración en el eje X.

En el paso por curva de un vehículo se genera una fuerza centrífuga que tiende a sacarlo de la trayectoria y que se situaría de dentro a fuera de la curva, no obstante para simular el paso por curva de un vehículo la fuerza que ha de considerarse es la fuerza centrípeta, que actúa en sentido contrario a la anterior y es necesaria para mantener el sistema en reposo.[19]

Por tanto el sentido de la aceleración que se debe de introducir es el asociado a esta última, es decir en sentido contrario a la fuerza centrífuga. Los componentes de la aceleración en el caso de curva a derecha serían:

$$a = (-7840, 9810, 0) \text{ mm} \cdot \text{s}^2$$

Como en los casos anteriores, se considera la situación límite de adherencia, por lo tanto las restricciones verticales propias del sistema de suspensión no se ven alteradas sobre los modelos anteriores, manteniendo su posición.

En este caso particular, se carece de fuerzas en el eje Z, por lo que resulta necesario disponer una restricción extra en este mismo eje sobre un nodo cualquiera para que ANSYS no genere errores durante la solución. La imposición de esta restricción no afecta en ningún caso a la solución obtenida al no generar un punto de concentración de tensiones.

En último lugar es necesario imponer las restricciones pertinentes en el eje X, que se situarán en el lado correspondiente al exterior de la curva y en ambos ejes. Al igual que en los casos anteriores, si se disponen las restricciones laterales en todos los anclajes de ambos ejes, se induce un error que limita la simulación y por tanto su resultado.

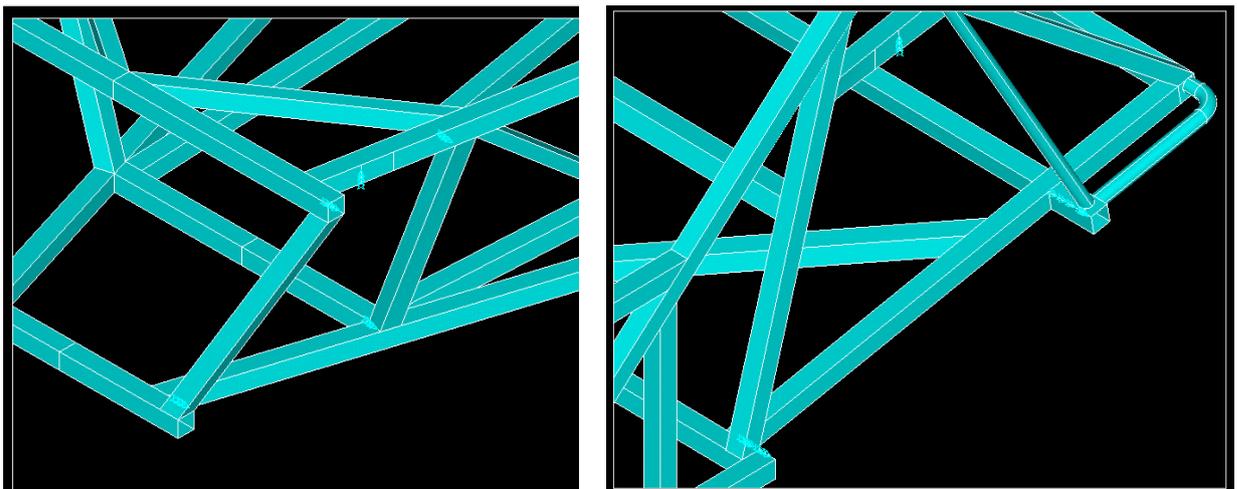


Figura 55: Detalle de las restricciones laterales iniciales en ambos ejes.

Mediante la disposición de la figura 55 se impide el giro natural de la estructura en la zona delantera y trasera del chasis, lo que provoca una deformada que no se ajusta al comportamiento esperado. La razón de este error, guarda relación con la imposición de varias restricciones laterales a lo largo del chasis.

La solución a este problema pasa por eliminar algunas de las restricciones impuestas, liberando así la estructura para que pueda comportarse de manera correcta. En esta simulación de paso por curva, las situaciones más desfavorables son aquellas situadas más lejos del centro de gravedad del chasis. Siguiendo este razonamiento se procedió a eliminar las restricciones laterales más cercanas al centro de gravedad, dejando únicamente las situadas en los extremos.

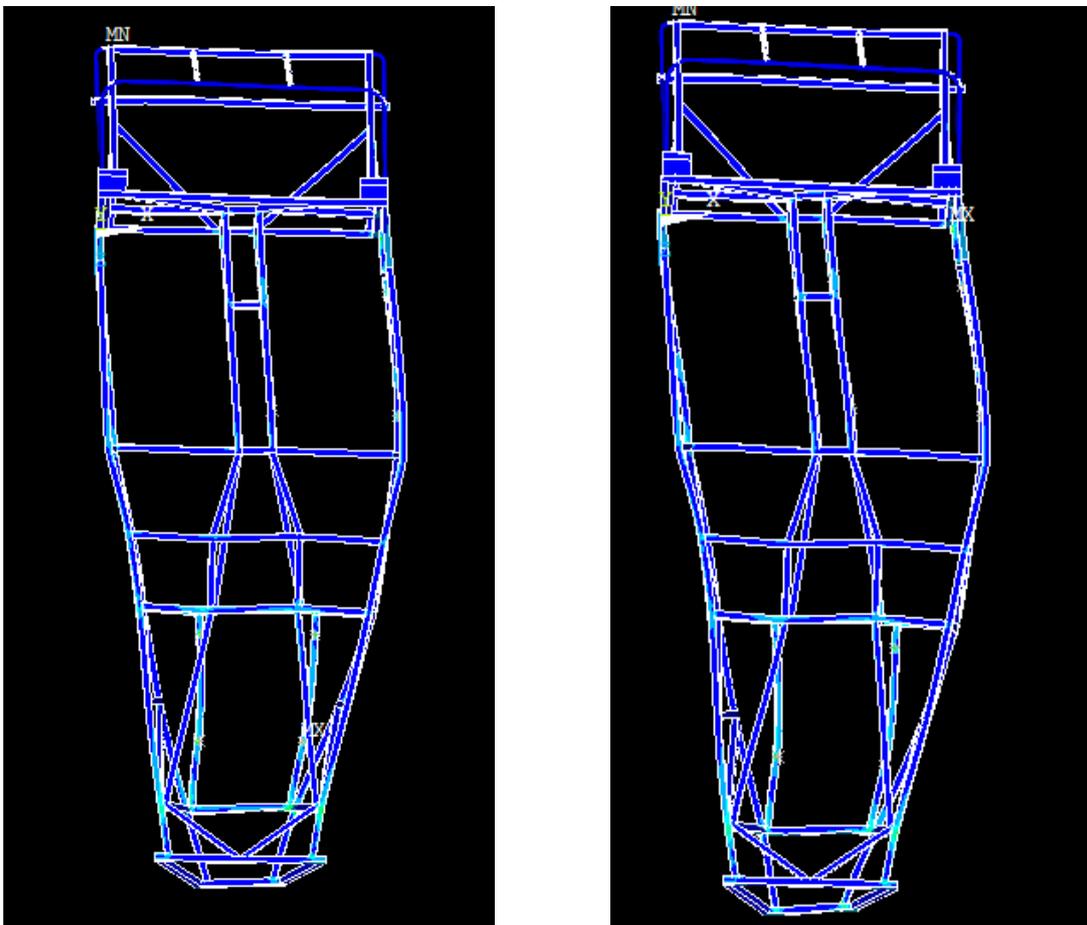


Figura 56: Comparativa de deformadas en paso por curva a derecha.

En la figura 56 se presentan ambas deformadas, en la parte izquierda la correspondiente a la disposición inicial, donde se observa la nula variación de desplazamientos en la parte delantera y trasera del lado exterior de la curva. En la parte derecha, se presenta la deformada obtenida con la solución propuesta, donde se observa el cambio de comportamiento en la zona delantera y la variación de la solución situándose el máximo (Von Mises) en otro lugar.

Si ampliamos la zona conflictiva del eje delantero, se puede observar mejor el problema presente. Como se puede observar en la figura 57, la disposición inicial situando restricciones laterales en todos los anclajes, deriva en un comportamiento inadecuado aguas arriba del chasis. Las barras situadas en la zona posterior a las restricciones se ven obligadas a adoptar formas inapropiadas del comportamiento natural de un chasis para poder mantener la continuidad estructural.

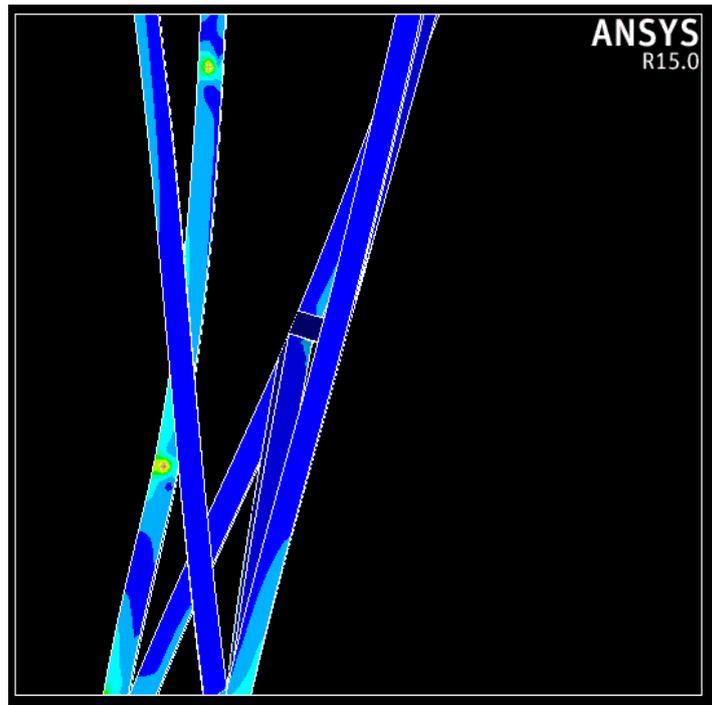


Figura 57: Detalle travesaños en la simulación de frenada con la disposición inicial de restricciones.

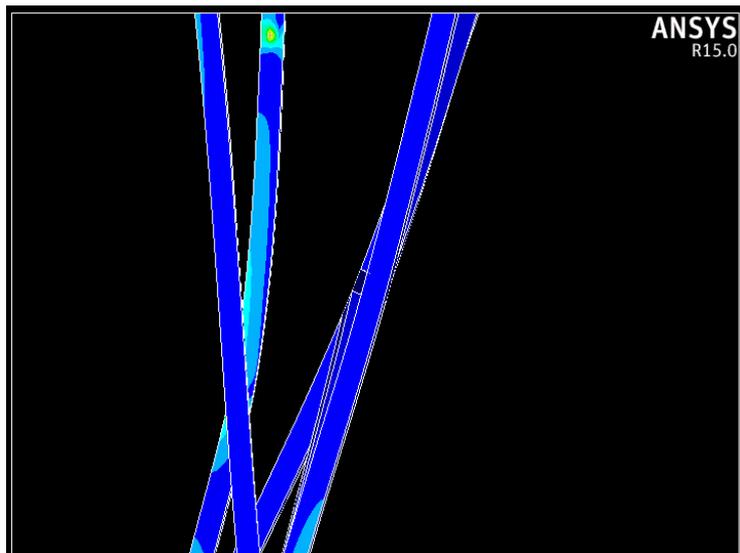


Figura 58: Detalle travesaños en la simulación de frenada con la solución propuesta.

En la figura 58 se muestra la misma zona, pero una vez resuelto el problema mediante la solución propuesta. Al poder desplazarse lateralmente la barra inferior, fruto de la eliminación de las restricciones más cercanas al centro de gravedad, la barra vertical que anteriormente se deformaba excesivamente, muestra ahora un comportamiento más adecuado y natural; trabajando ahora todo el chasis conjuntamente como se espera de él.

En la figura 59 se muestran las diferentes restricciones y aceleración presentes en esta simulación, previas a la posterior solución del modelo.

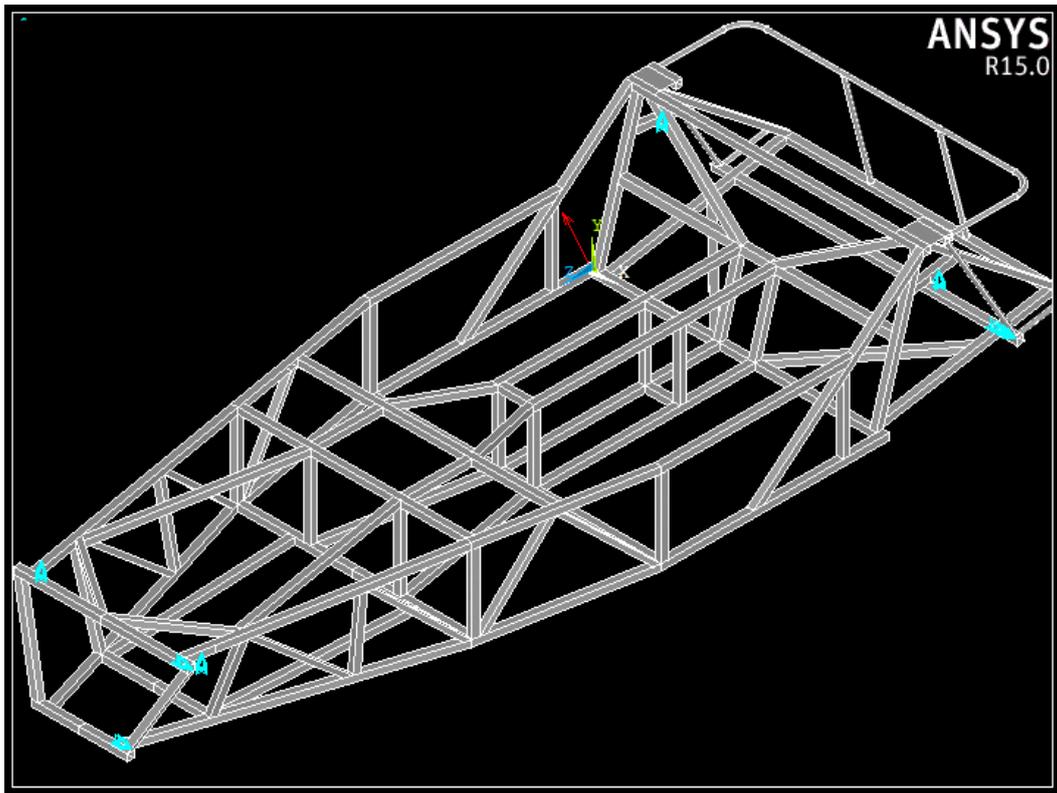


Figura 59: Restricciones y aceleración presentes en el caso de Simulación 3: paso por curva a derecha.

5.2.5 Simulación 4: Paso por curva a izquierda.

Esta simulación supone un caso complementario al anterior, como se ha comentado anteriormente el modelo no presente geometría, al situarse el piloto descentrado. Esto radica en la necesidad de simular los dos distintos caso de paso por curva, teniendo en cuenta sus singularidades.

En general, esta simulación guarda grandes semejanzas con la expuesta en el caso anterior, todo lo que ha sido explicado se ha de tener en cuenta para este caso, pero ha de ser correctamente particularizado.

En primer lugar es necesario orientar correctamente el sentido de la aceleración, en este caso se situará una aceleración lateral en el sentido positivo del eje X, para simular correctamente el efecto de la fuerza centrípeta en el chasis. Por tanto las componentes de la aceleración en este caso son:

$$a = (7840, 9810, 0) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$$

Las restricciones verticales en todos los anclajes de la suspensión permanecen inalterables, se sigue considerando la situación de límite de adherencia, es decir todas las ruedas están en contacto con el suelo. Igualmente permanece inalterable la restricción nodal en el eje Z, para que ANSYS no genere errores durante la solución.

En lo referente a la situación de las restricciones laterales, se tiene en cuenta lo razonado con anterioridad, por lo que se sitúan las restricciones en los extremos del eje delantero y trasero, y en el lado correspondiente al exterior de la curva.

En la figura 60 se muestra la disposición final de las restricciones y aceleración particularizadas para esta simulación.

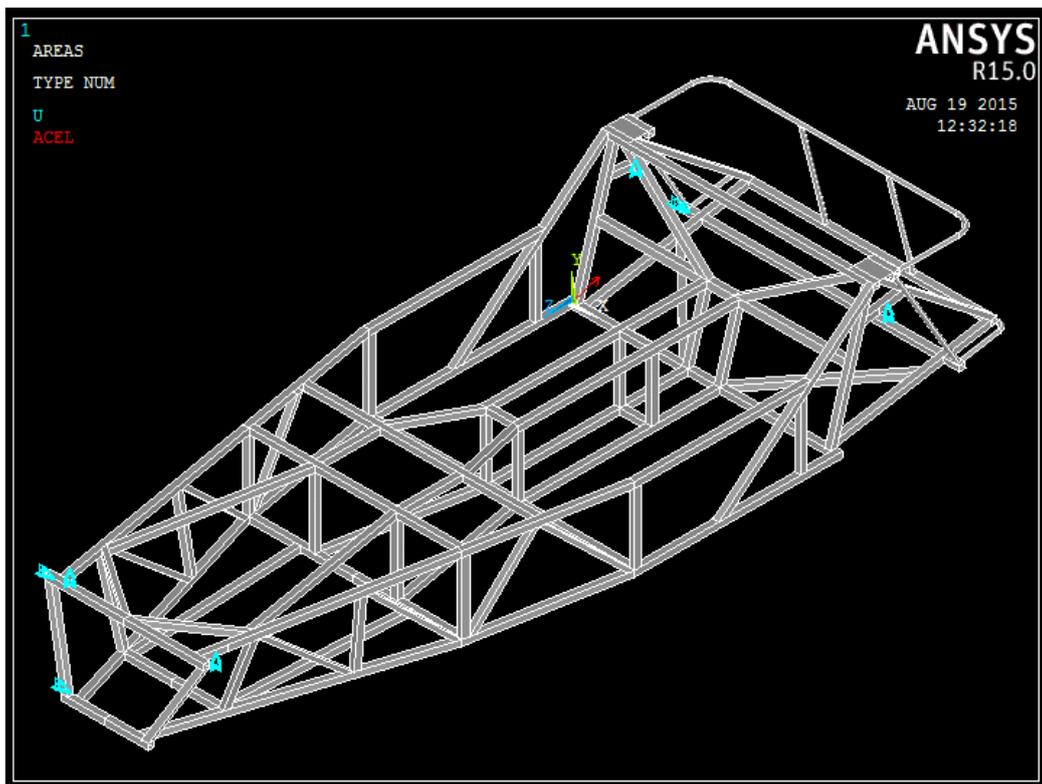


Figura 60: Restricciones y aceleración presentes en el caso de Simulación 4: paso por curva a izquierda.

5.2.6 Simulación 5: Torsión.

El análisis del comportamiento torsional de un vehículo es una de las pruebas más importantes para determinar el comportamiento dinámico del vehículo. Determina su respuesta frente a cambios de masas, y se ve claramente influenciado por el diseño del sistema de suspensión y del propio chasis. [25]

Un alto valor torsional, significa que el vehículo es muy rígido y por tanto goza de unas buenas aptitudes dinámicas en pasos por curva o frenadas, al presentar un cambio de masas muy leve; no obstante será incómodo para la normal circulación. [20]

En los vehículos como el presente en esta memoria, destinados a obtener unas buenas capacidades deportivas, se sacrifica parte de la comodidad en beneficio de una mejor estabilidad y manejo.

Los valores de los ensayos de rigidez deben de ser considerados con atención, e igualmente se debe especificar sobre cual conjunto final se ha realizado este. La razón es que existen componentes del vehículo, como el motor por ejemplo, que aportan una rigidez mucho mayor al chasis en caso de ser considerados en el modelo.

En el caso particular que se presenta en la memoria se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones antes de realizar la simulación y obtención de resultados, para poder valorar estos últimos de forma adecuada. En primer lugar no se tuvieron en cuenta elementos que no formaran parte directa del chasis, esto significa que ni el motor ni otras partes mecánicas ancladas al este fueron consideradas. En segundo lugar se tuvo en cuenta el hecho de que los paneles que recubren el chasis, y que mejoran también su rigidez torsional, no han sido incluidos en la representación de este, por lo que al analizar el resultado final se debe de considerar la disminución de la rigidez debida a esta circunstancia.

Para esta simulación no se ha de considerar el efecto de cualquier aceleración, por lo que el paso referente a la introducción de esta, se omite.

La definición de torsión indica que es la sollicitación producida cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un cuerpo. [28] Para simular esta situación en ANSYS se siguen estos pasos. Se fijan verticalmente tres de los cuatro anclajes de la suspensión, y en el anclaje restante se impone un desplazamiento vertical cualquiera. Sin embargo, el valor de este desplazamiento, no debe de ser excesivo en relación a las medidas del chasis, de lo contrario podríamos estar realizando un modelo en el cual fuese necesaria una deformación plástica para alcanzar ese desplazamiento, obteniendo resultados inconcluyentes.

Una vez ha sido fijado el valor de ese desplazamiento, en el anclaje situado en el mismo lado pero en el eje opuesto, se fijan el resto de desplazamientos (longitudinal y lateral) y se restringe igualmente el giro en la componente Y.

El modelo completamente definido se presenta en la figura 61.



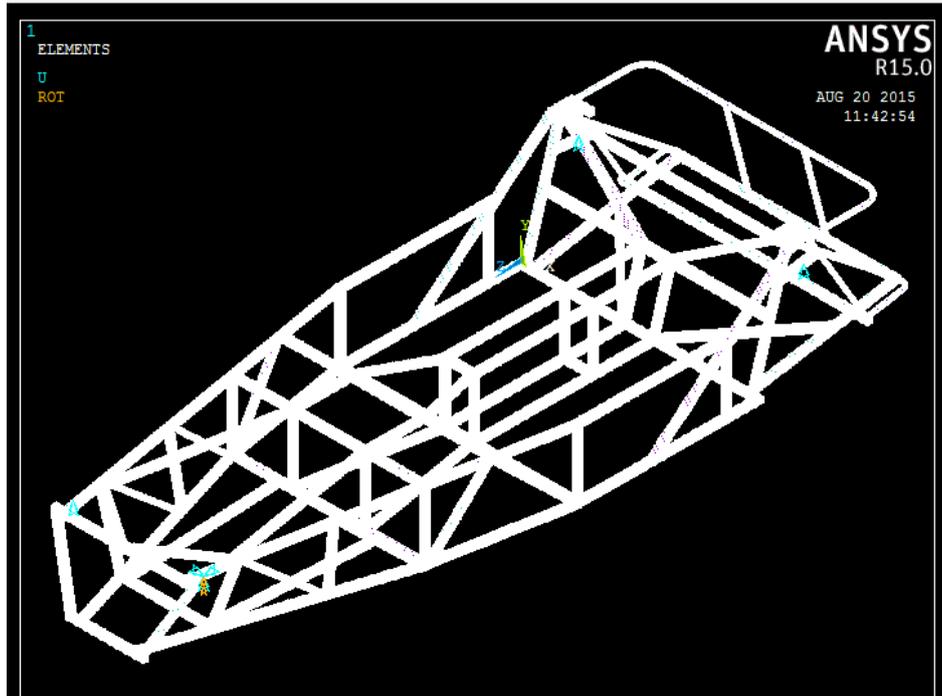


Figura 61: Restricciones nodales presentes en el caso de Simulación 5: Torsión.

Una vez se han completado los pasos, ya puede ser resuelto el modelo. En la solución se deberá de comprobar el valor de la reacción en el nodo en el cual fue impuesta la restricción vertical con el valor determinado por el usuario.

También es necesario conocer la distancia entre los anclajes del eje en el que si impuso esa misma restricción, y posteriormente se introducen todos esos datos en la siguiente fórmula para obtener el valor de rigidez torsional.

$$\text{Rigidez torsional} \left(\frac{Nm}{^\circ} \right) = \frac{R * dh}{\theta}$$

Donde:

R: valor de la reacción en el nodo en el que se impuso la restricción vertical con valor cualquiera.

dh: distancia horizontal entre los anclajes del eje en que se impuso la restricción vertical cualquiera.

θ : $\arctg\left(\frac{dv}{dh}\right)$; donde dv es el valor de la restricción cualquiera impuesta.

Una vez obtenido el valor de la rigidez torsional, conviene tener en cuenta varias consideraciones para comprobar la efectividad de la simulación. El valor de rigidez torsional no debe de variar dependiendo del anclaje en el que imponga la restricción vertical con valor conocido, esto significa que no importa si se impone en el eje delantero o trasero, en la parte izquierda o derecha.

Además, también se debe de tener en cuenta que dicho valor no depende en medida alguna del valor de la restricción que el usuario imponga, siempre y cuando esta sea adecuada. En la figura 62 se puede observar el comportamiento frente a torsión del chasis estudiado.

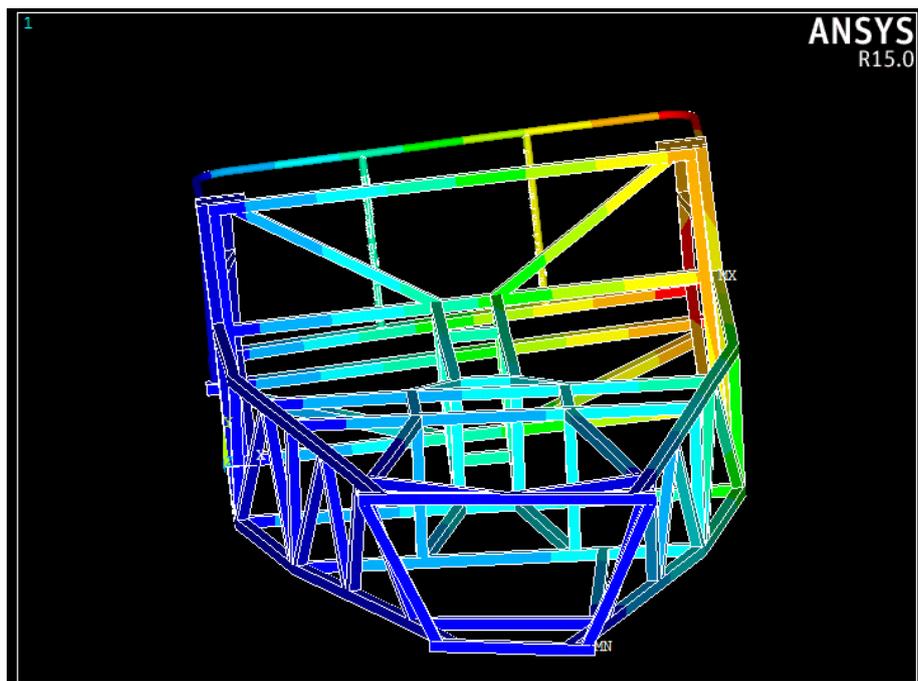


Figura 62: Chasis trabajando a torsión.

5.2.7 Simulación 6: Fatiga.

Hasta ahora se ha estudiado el comportamiento del chasis desde el punto de vista estático, sometiéndolo a cargas constantes a lo largo del tiempo. No obstante, resulta igualmente importante un cálculo dinámico del chasis, en el que se vea sometido a cargas variables en el tiempo y donde se pueda estudiar su comportamiento frente al fenómeno de fatiga.

La fatiga presenta como principales características la rotura del material de forma repentina, y la aparición de esta rotura con cargas mucho más bajas que la resistencia del material utilizado. Supone por tanto un fallo mucho más peligroso que los casos estáticos, al no avisar de la rotura mediante deformaciones plásticas, y porque estadísticamente se presentan un mayor número de fallos por fatiga que por rotura estática. [22]

El origen de esta rotura por fatiga es un punto de concentración de tensiones, que puede aportar información sobre las condiciones de trabajo de la estructura.

El comportamiento frente a fatiga de un material viene dado por la curva S-N, que presenta una forma como la ilustrada en la figura 63.

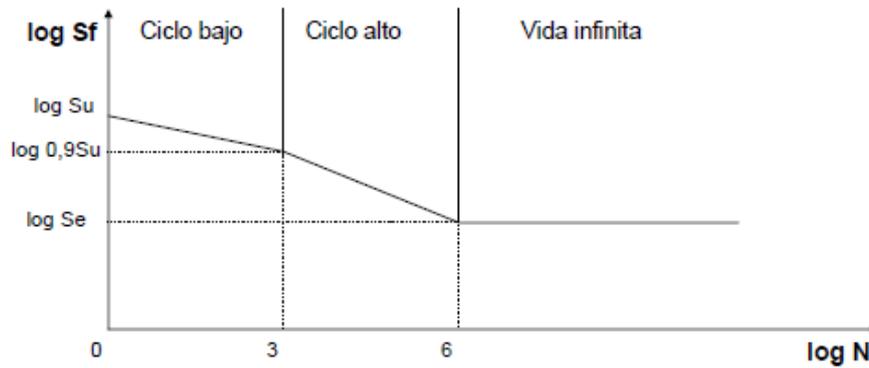


Figura 63: Curva S-N característica. [5]

Como se puede observar, existe un valor de tensión por debajo de la cual el material presenta vida infinita y la estructura no se romperá, este viene determinado por el límite de fatiga del material S_e . [22]

En la zona de vida finita, se observan dos comportamientos diferenciados. La primera zona del gráfico, correspondiente a la zona de ciclo bajo, muestra una mínima reducción de la resistencia ofreciendo un comportamiento casi similar al caso de cargas estáticas. En la zona correspondiente a ciclo alto, se presenta una reducción brusca de la resistencia asociada al aumento de ciclos, y a su vez se diferencia el comportamiento del material frente al que ofrece en cargas estáticas. [22]

Existen múltiples factores modificativos del límite de fatiga que adecuan el valor de este (obtenido en condiciones de laboratorio) a las condiciones presentes en nuestro estudio, sin embargo para esta simulación no son tomados en consideración.

Como se detalló en el apartado 4.2.1.2 en el que se mencionaban las características del material utilizado, el acero empleado ofrece un límite elástico de 515 MPa y una tensión de rotura de 655 Mpa. Las características de fatiga del material son las descritas en la tabla 4.



Number of Cycles, N	Fatigue Strength, S_f
$< 10^3$	$0.9S_u$
10^3 to 10^6	$\frac{(0.9S_u)^2}{S_e} N^{-(1/3)\log(0.9S_u/S_e)}$
$> 10^6$	S_e

Tabla 5: Características de fatiga del material.[5]

Nº evento	Nº de carga	Definición	Ciclos
1	1	Aceleración	10^5
1	2	Frenada	10^5
1	3	Curva Derecha	10^5
1	4	Curva Izquierda	10^5
1	5	Torsión	10^5

Tabla 6: Tabla de estados de carga para el cálculo a fatiga.

Donde:

$S_u=655$ MPa

$S_e = 0.6 \cdot S_u=393$ Mpa

Una vez se dispone de los datos de fatiga del material, el siguiente paso es conocer los diferentes estados de carga a los que va a ser sometido y el número de ciclos de cada uno de ellos, para a continuación realizar el estudio de fatiga mediante ANSYS.

El historial de eventos y estados de carga es el que se presenta en la tabla 5. El número de eventos hace referencia a los distintos números de ciclos presentes, en el caso de estudio existe un único evento al tener todos los estados de carga el mismo número de ciclos. [5]

A continuación se muestra el conjunto de pasos necesarios para realizar un ensayo de fatiga mediante ANSYS, en general es un estudio que no suele realizarse, dejando su cálculo para posteriores análisis en distintos software, sin embargo puede ser correctamente llevado a cabo.

En primer lugar se parte de la geometría inicial del chasis, incluido los elementos MASS necesarios para tener en consideración las masas externas; al mismo tiempo ya han sido también incluidos los datos de material, secciones y todo lo expuesto en el apartado 3 de la presente memoria. Una vez comprobado que todo lo anterior se encuentra correctamente dispuesto el primer paso es seleccionar el tipo de análisis, que por defecto se encuentra en Static. Para poder realizar el cálculo de fatiga se debe de escoger el tipo Transient, mediante los comandos `Solution>AnalysisType>NewAnalysis>Transient`.



Una vez definido el tipo de análisis, el siguiente paso puede ser opcional, dependiendo de si se quiere poder obtener el resultado final en unidades de tiempo o bien únicamente en ciclos. Mediante este paso que se realiza a través de la secuencia Solution>Sol`nControls>BasicTab, puede ser definido un tiempo por ciclo, el cual se podrá usar posteriormente para convertir el número de ciclos que reflejará la solución de ANSYS en segundos.

A continuación se introducen las restricciones y aceleraciones propias del estado de carga número 1 de la tabla 5, es decir Aceleración, siguiendo los pasos ya explicados en apartados anteriores. Una vez definido por completa la simulación correspondiente al primer estado de carga, será necesario indicar a ANSYS que debe de guardar ese estado como el primero para el análisis por fatiga, lo cual se realiza mediante Solution>LoadStepOptions>WriteLSFile (ver figura 64), se introduce el número 1 correspondiente al estado de carga aceleración, y automáticamente ANSYS genera un fichero Jobname.s01 correspondiente a ese estado en concreto.

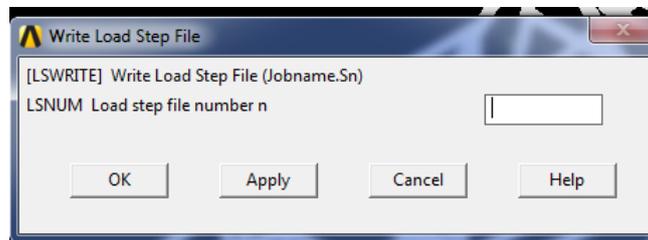


Figura 64: Detalle de la ventana de escritura de los diferentes estados de carga.

Una vez completado este paso, el primer estado de carga ha sido correctamente introducido. Para comenzar de nuevo la introducción del siguiente estado de carga existen dos opciones. La primera de ellas es de nuevo el paso opcional para determinar el tiempo en segundos de cada estado de carga, se deberá introducir el valor de tiempo acumulativo, es decir si se pretende que cada estado de carga dure diez segundos , a la hora de introducir el tiempo del segundo estado deberá introducirse veinte, y así de forma sucesiva.

Si por el contrario no se requiere o necesita la solución en segundos, el primer paso para introducir el nuevo estado de carga, es determinar las nuevas restricciones y aceleraciones presentes en él. Para eliminar las anteriores se hace uso de Delete>AllLoadData&Options, que elimina todo lo introducido dentro del menú Loads.

Al igual que en el caso anterior, una vez introducidas las restricciones y aceleraciones propias del estado que se desee, se ha de escribir ese estado de nuevo, haciendo uso de Solution>LoadStepOptions>WriteLSFile , e introduciendo el número identificativo de este.

Mediante esta secuencia de pasos, se introducen de forma iterativa los diferentes estados de carga, y posteriormente puede ser comprobada su correcta introducción al reflejarse en la carpeta de escritura mediante los ficheros .s01, .s02, .s03 y sucesivos.

Todos los estados de carga han sido ya guardados, y el siguiente paso es solucionarlos uno por uno. Para ello ANSYS cuenta con el siguiente comando que permite introducir los estados de carga que quieran ser resueltos. Solution>Solve>FromLSFiles

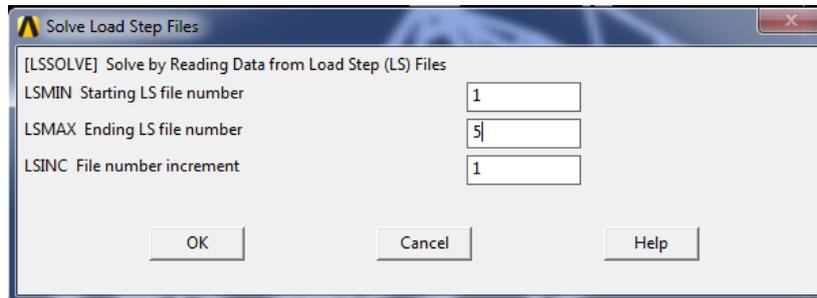


Figura 65: Detalle ventana de solución a través de ficheros .s

Se despliega una ventana que permite introducir el número de estado de carga inicial y el final, y a su vez el incremento que se desea. Para que se proceda a la solución de los cinco estados de carga presentes en la memoria, se han de introducir los datos reflejados en la figura 65.

El tiempo de solución de esta simulación, es mucho mayor que cualquiera de las estáticas anteriormente descritas. Por tanto también ha de considerarse reducir el mallado de la estructura si se pretende obtener un menor tiempo de cálculo.

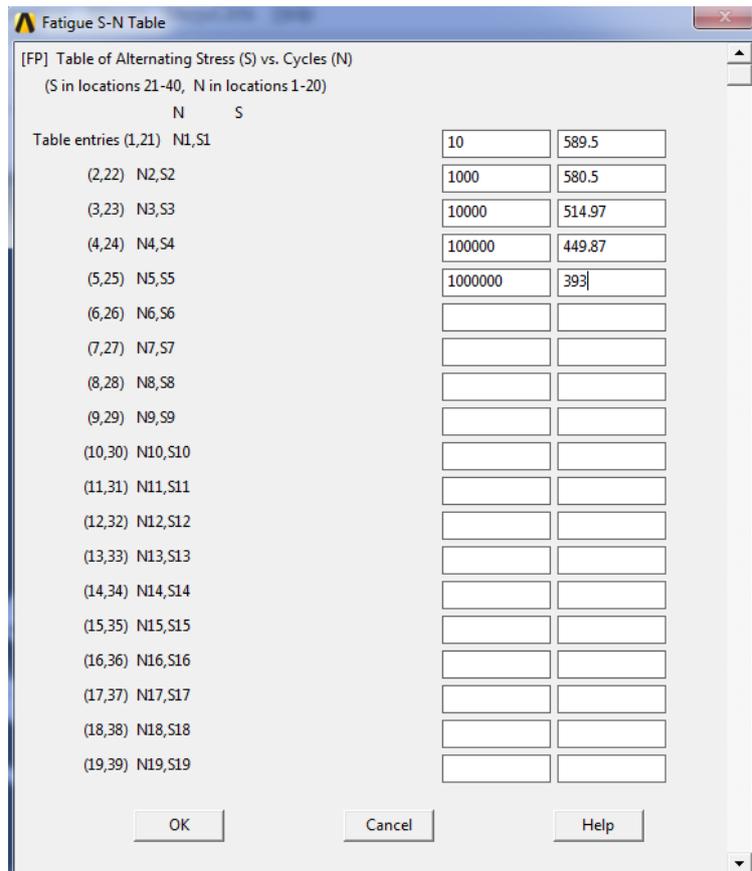


Figura 66: Ventana de introducción de la tabla S-N.



Antes de continuar con los siguientes pasos, es preciso realizar dos anotaciones previas, correspondientes a la tabla S-N del material (ver figura66) y a los nodos en los cuales va a ser calculada la solución. Para el primero de los casos se sigue lo dispuesto en la tabla 4 y posteriormente se introducen estos datos en ANSYS, mediante la secuencia de comandos GeneralPostproc>Fatigue>PropertyTable>S-NTTable

En lo referente a los nodos en los cuales va a ser calculada la solución, es necesario posterior la obtención de resultados en los diferentes estados de carga presentes, la anotación del número de nodo en el cual se encuentra el valor máximo de tensión de Von Mises.

Estos nodos serán los seleccionados para el cálculo de fatiga, pues ANSYS realiza este cálculo en los nodos que indica el usuario y no en todo el chasis. El siguiente paso en la simulación del comportamiento frente a fatiga del chasis, es precisamente la introducción de estas localizaciones.

Se van leyendo los resultados solucionados, estado por estado para lo cual se siguen los comandos GeneralPostproc>ReadResults>ByPick, seleccionando sucesivamente los estados de carga. Las localizaciones nodales en las cuales se realizará el cálculo de fatiga sólo han de ser introducidas una vez, no obstante en cada estado de carga es necesario introducir las tensiones a las que están asociadas dichos nodos.

Para determinar las localizaciones nodales se sigue la siguiente secuencia Fatigue>StressLocations, mediante la cual aparece una ventana que permite introducir un número identificativo de la localización, el número de nodo asociada a ella (que ha sido previamente anotado) y un título identificativo.

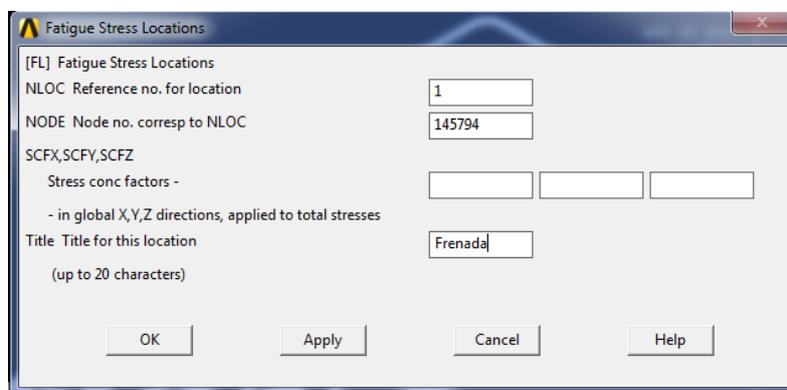


Figura 67: Ejemplo de introducción de localización nodal para su cálculo a fatiga.

A continuación se deben introducir el número de evento y estado de carga que soportará cada localización. En el caso de estudio, existe un único evento con cinco distintos estados de carga por lo tanto se introducirán los mismos datos en todas las localizaciones presentes pero cambiando el estado de carga.



Para la introducción de estos datos se accede a la ventana a través de Fatigue>StoreStresses>FromRstFile, se presenta como en la figura 68.

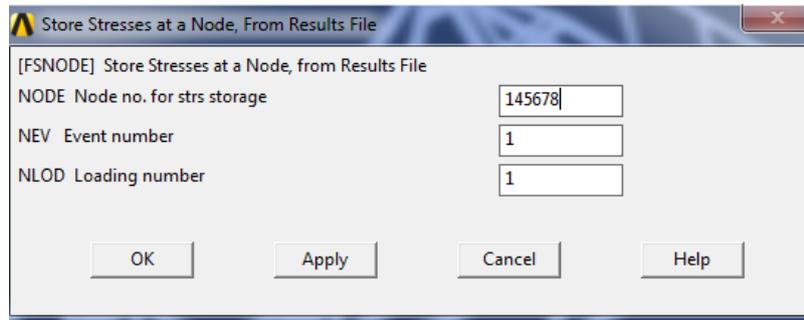


Figura 68: Detalle de la ventana de introducción de evento y estado de carga asociado a cada localización.

Una vez se han realizado estos dos pasos para los cinco estados de carga presentes, se necesita definir a continuación las características de los eventos presentes. Como se ha comentado con anterioridad, el número de eventos presentes hace referencia a los distintos números de ciclos que el usuario quiera introducir.[5]

En este caso se ha decidido introducir el mismo número de ciclos para todos los estados de carga, debido en gran parte a que se pretende demostrar la vida infinita del chasis mediante un número de ciclos cercano al límite, concretamente caso 10^5 ciclos. No obstante ANSYS presenta una particularidad que nos obliga a crear otro evento con el mismo número de ciclos que se desea. El programa sólo permite asignar un máximo de tres estados de carga por evento, al presentar el estudio cinco estados de carga es necesaria la creación de un este. En el apartado correspondiente a los resultados obtenidos se presentará un tabla que recoge esta particularidad.

Para ello se siguen los comandos Fatigue>AssignEvent, donde aparece una ventana que permite introducir un número identificativo, el número de ciclos y un título del evento. Al igual que en las distintas ventanas de introducción del submenú Fatigue, aparece un ScaleFactor. Este parámetro permite al usuario particularizar aun más su estudio, otorgando mayor relevancia a ciertos estados de carga, no obstante en nuestro estudio se situará el valor por defecto de 1, que tiene en cuenta de forma semejante todos los casos.

El último paso se realiza a través de los comandos Fatigue>CalculateFatigue, y permite obtener la ventana final de resultados que debe de ser convenientemente analizada, y que se presentará en el apartado 5.3.6. En esta ventana de resolución se introduce el número identificativo de la localización, o bien el número exacto de los diferentes nodos que fueron anotados previamente, y dónde se sitúan los máximos de cada caso.

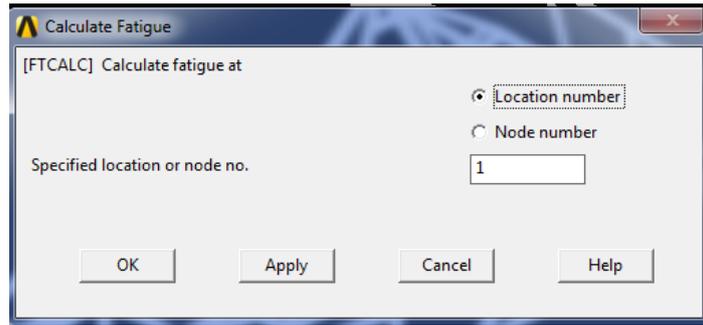


Figura 69: Detalle ventana de cálculo a fatiga en el nodo seleccionado.

5.3 Resultados obtenidos.

Una vez solucionadas las diferentes simulaciones indicadas en el apartado 5.2. , el siguiente paso en el análisis del chasis, es el estudio y comprensión de los resultados obtenidos. Conviene recordar que el programa ANSYS no trabaja con unidades, debe de ser el usuario quien introduzca correctamente y de manera lógica las diferentes unidades en las distintas ventanas. Esta particularidad, también se encuentra en este apartado y se debe conocer que los valores numéricos que el programa refleja están en las unidades acordes al sistema que hayamos empleado. En concreto, y siguiendo lo establecido en la tabla 2, se dispondrán los valores de tensión en megapascales (MPa), los de desplazamiento en milímetros (mm) y los de fuerza en newtons (N). De igual manera es conveniente conocer que las deformadas que ANSYS proporciona, están realizadas con un factor que el programa determina de forma automática para que se pueda apreciar mejor el resultado. Presentan por tanto desplazamientos que han sido exagerados y que no corresponden a la situación real, aunque los valores que devuelve el programa sí son correctos.

5.3.1 Simulación 1: Aceleración.

A continuación se presentan los resultados correspondientes al caso de aceleración. La primera imagen se corresponde a la deformada de la estructura, donde además se presenta el cuerpo del chasis original para su comparativa. Se puede observar en la figura 70 como el peso debido a las masas externas de piloto y motor es el que más influencia tiene desde el punto de vista de los desplazamientos verticales, y las consecuencias que provoca en la parte delantera y trasera del chasis. La parte delantera sube ligeramente para adaptarse a la situación, mientras que la trasera presenta un compromiso entre esa misma situación y el efecto de la aceleración presente que empuja hacia atrás y hacia abajo la zona trasera. No se observan comportamientos no deseados ni formas extrañas en travesaños y largueros.

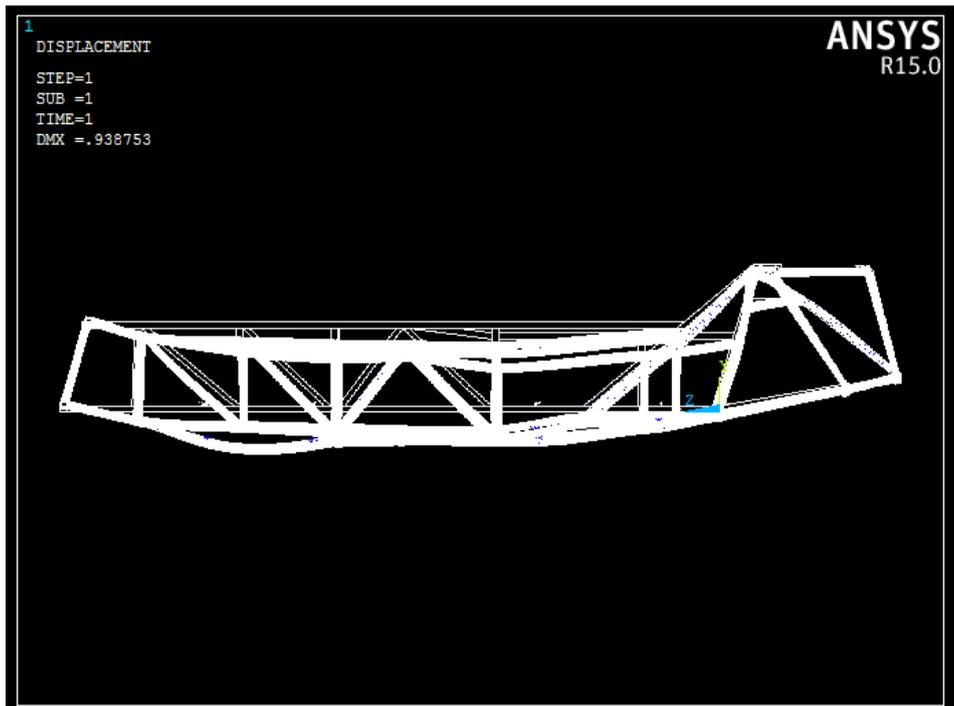


Figura 70: Representación de la deformada perteneciente al caso de aceleración y el cuerpo del chasis inicial.

En la figura 71 se muestra el resultado de las distintas tensiones de Von Mises en el chasis, habiendo previamente eliminado los puntos de singularidad de tensiones, correspondientes a los nodos de los elementos MASS que modelizan la masa externa del motor.

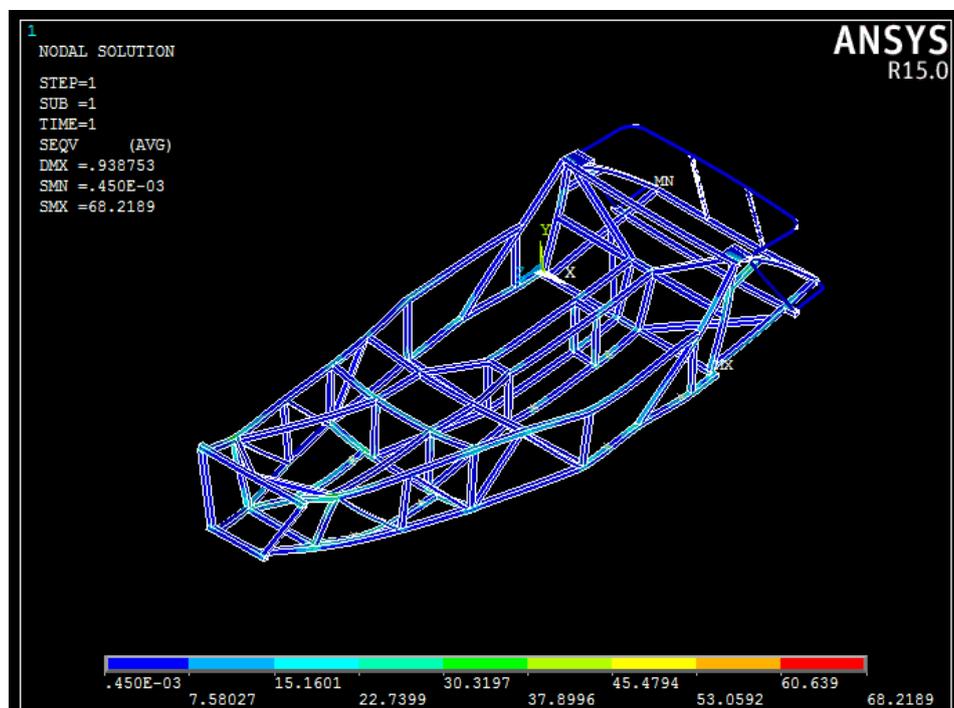


Figura 71: Valores de la tensión de Von Mises en el chasis sometido a aceleración.

Se observan valores casi nulos en la mayoría de la estructura, encontrándose mayores tensiones en las uniones entre barras, normalmente con valores que oscilan entre los 7 Mpa y los 22 Mpa; por lo que no existe problema alguno. El valor máximo de tensión se sitúa en uno de los anclajes del eje trasero con el chasis, siendo este de 68.2189 Mpa lo que deja un coeficiente de seguridad $n=7.573$. Son varios los motivos por los que se sitúa en esa localización, donde coinciden los esfuerzos generados por la masa del piloto y las restricciones imperantes en esa zona.

Para profundizar en la comprensión del comportamiento del chasis frente a esta sollicitación, conviene también representar la componente longitudinal (Z) de la tensión de Von Mises. Como se puede comprobar en la figura 72, el chasis está trabajando a compresión (valores negativos de la componente Z), lo cual es señal de un comportamiento natural y correcto.

Encontramos en su gran mayoría tonos verdes y azules a lo largo de todo el chasis, que se corresponden con valores entre -1 y -21 Mpa. Las partes que se encuentran a tracción, en su gran mayoría lo hacen debido a la situación de los elementos MASS que modelizan las masas externas, lo que hace adoptar al chasis zonas cóncavas y convexas. Por tanto no deben de ser considerados con importancia.

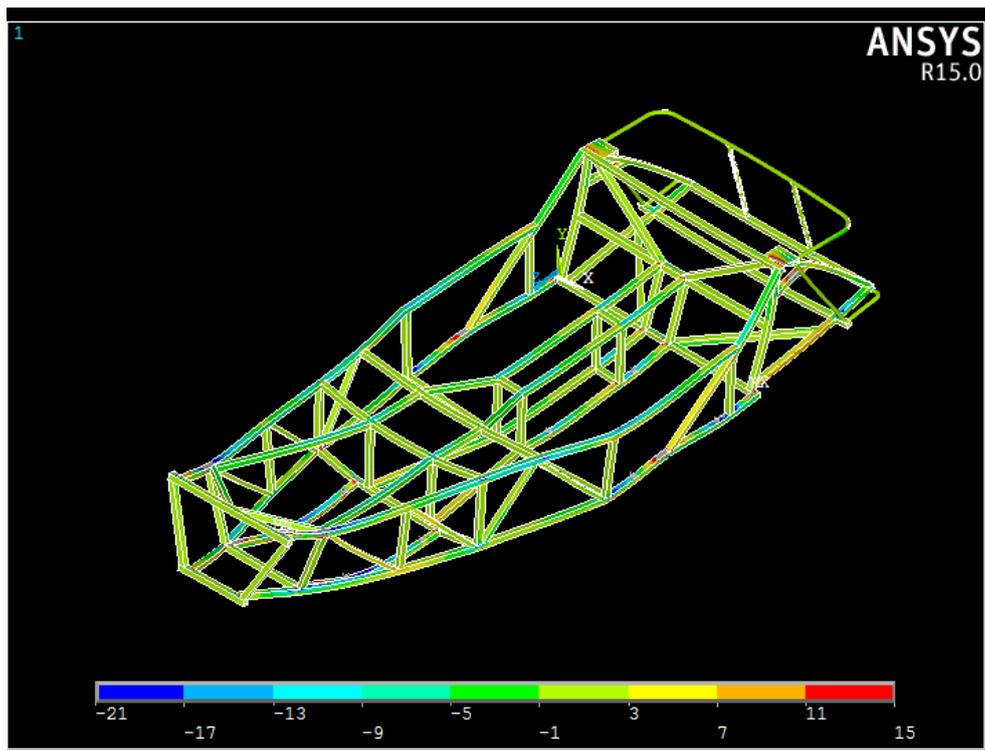


Figura 72: Representación de la componente Z de tensión en el caso de aceleración.

Por último se presenta el valor del desplazamiento total a lo largo de todo el chasis, todos los valores se encuentran por debajo del milímetro lo que garantiza una rigidez y comportamiento del chasis notable.

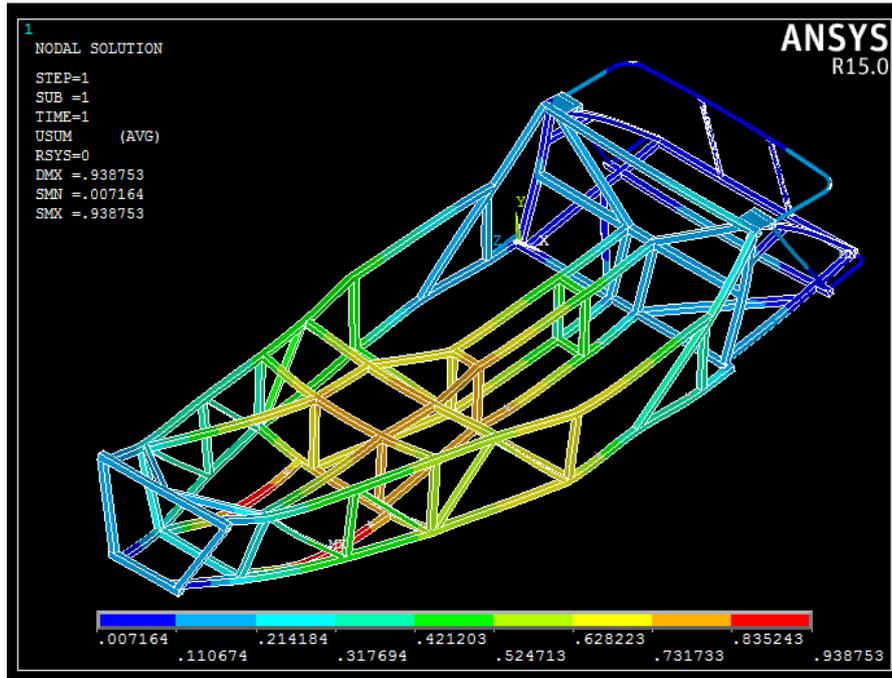


Figura 73: Representación del desplazamiento total del chasis en el caso de aceleración.

Los desplazamientos mayores se corresponden como era de esperar con la zona donde se encuentran situadas las masas que representan el motor. Estas mismas masas son las causantes de las deformaciones en la zona del puente de transmisión.

En conjunto los resultados obtenidos de desplazamiento total en el chasis, garantizan un correcto comportamiento y motricidad frente a una situación de aceleración. La estructura se muestra rígida y capaz de absorber los esfuerzos de esta situación dinámica.

5.3.2 Simulación 2: Frenada.

A continuación, en la figura 74 se presenta la deformada del chasis resultante de las sollicitaciones correspondientes al caso de frenada, y de nuevo también se presenta el cuerpo del chasis inicial sin deformarse para su mejor comparativa.

Se puede observar como de nuevo las masas externas de piloto y motor, son las causantes de los mayores desplazamientos del chasis en la zona central, y como la estructura al trabajar como conjunto se adapta a esta circunstancia. En este caso en el que el coche se encuentra frenando, como se explicó en anteriores apartados la parte trasera tiende a descargarse. Se observa cómo se eleva y mueve hacia delante fruto de la acción combinada de la aceleración y de la masa del piloto. De nuevo la zona delantera se eleva como consecuencia de la masa del motor situada aguas arriba; y tampoco se presentan deformaciones fuera de lo normal, por lo que podemos considerar el resultado como válido.



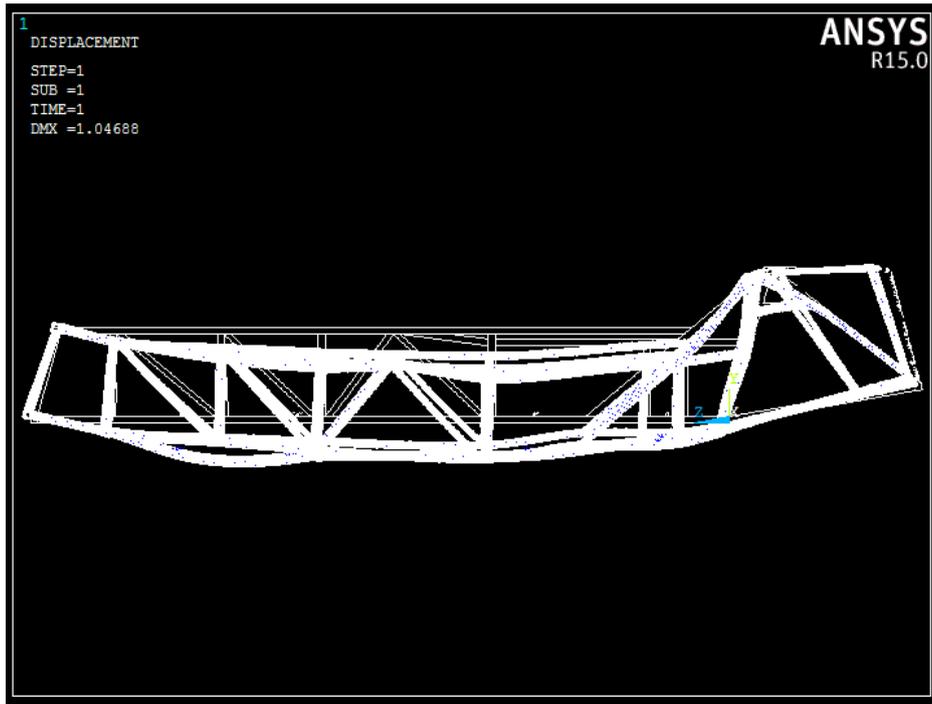


Figura 74: Deformada del chasis correspondiente al caso de frenada.

La figura 75 presenta el valor de la distribución de tensión de Von Mises en el chasis y el valor numérico de esta.

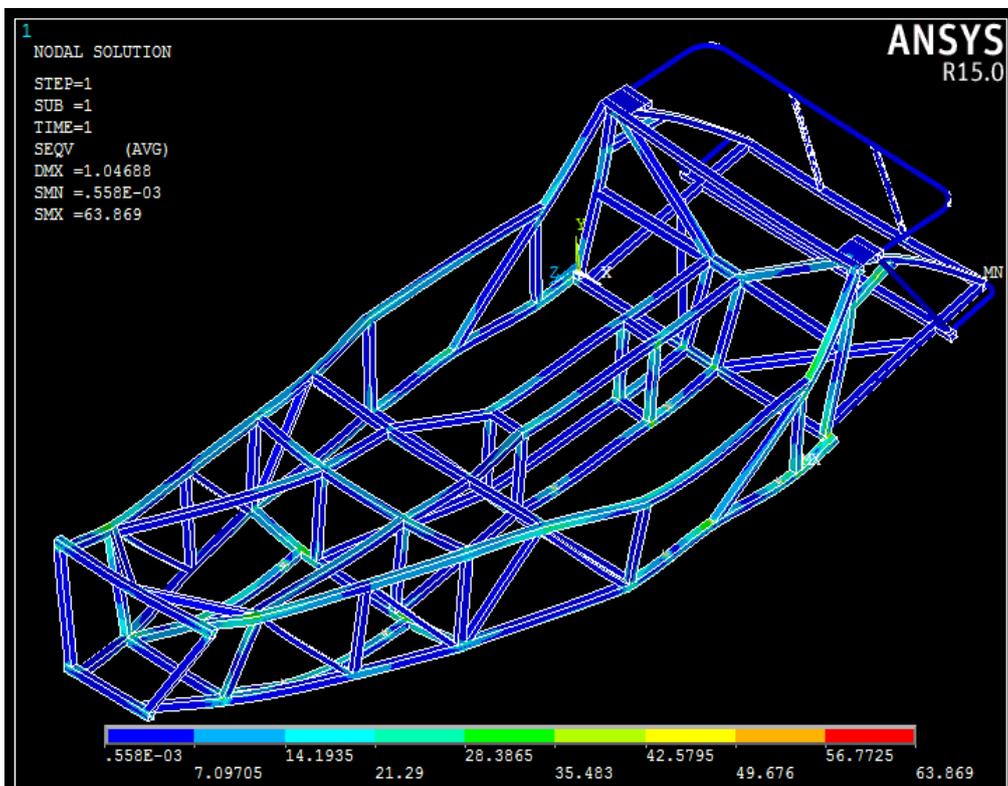


Figura 75: Representación de la distribución de valores de tensión de Von Mises en el chasis.

De nuevo gran parte del chasis está sometida a valores casi nulos de tensión, siendo estos más altos en las zonas de unión entre barras o bien en las zonas donde se encuentran las masas puntuales correspondientes a piloto y motor. Estos últimos se encuentran entre los 9 y los 21 megapascales, valores que no presentan problema alguno.

En este caso el valor máximo de tensión, que es de 63.869 MPa, se sitúa en una de las barras próximas a una masa puntual del piloto. Esto puede deberse a la inercia de la masa de piloto durante la frenada, trabajo que recae sobre esa barra tensionándola. Este valor máximo de tensión ofrece un coeficiente de seguridad $n=8.063$.

Al igual que en casos anteriores es conveniente comprobar que el chasis está actuando de la manera esperada, es decir de nuevo ha de encontrarse a compresión. Para verificarlo se representa la componente Z de tensión y se observa los valores que toma a lo largo del chasis.

Los tonos verdes y azules dominantes en la figura 76, correspondientes a valores que oscilan entre -20 y -5 megapascales, denotan un comportamiento correcto del chasis a compresión.

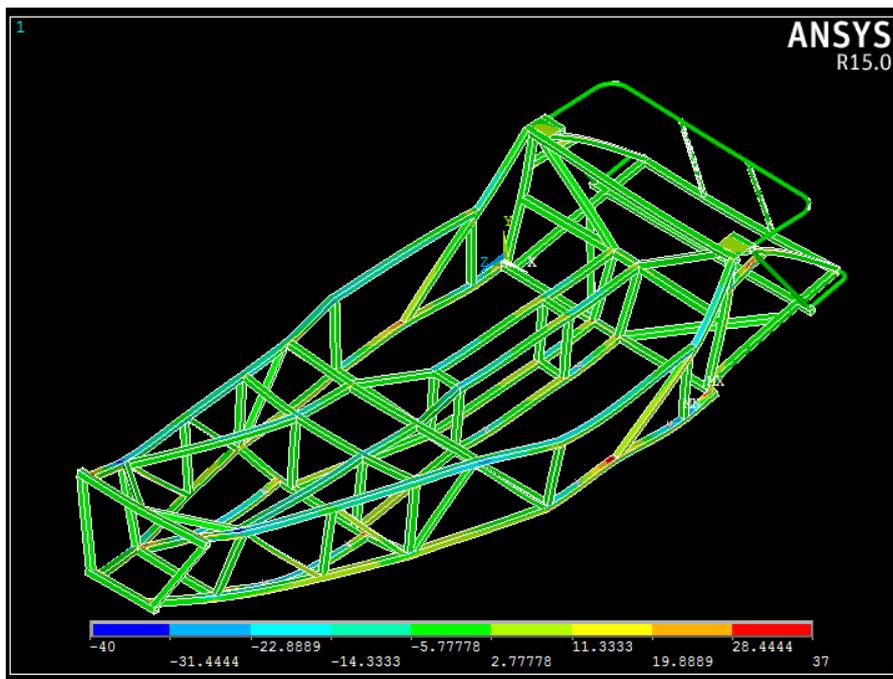


Figura 76: Representación de los valores de la componente Z de tensión en el chasis en el caso de frenada.

En último lugar se presenta en la figura 77, el desplazamiento total en las diferentes zonas del chasis. De nuevo los valores se sitúan por debajo del milímetro lo que indica un comportamiento correcto y esperado.

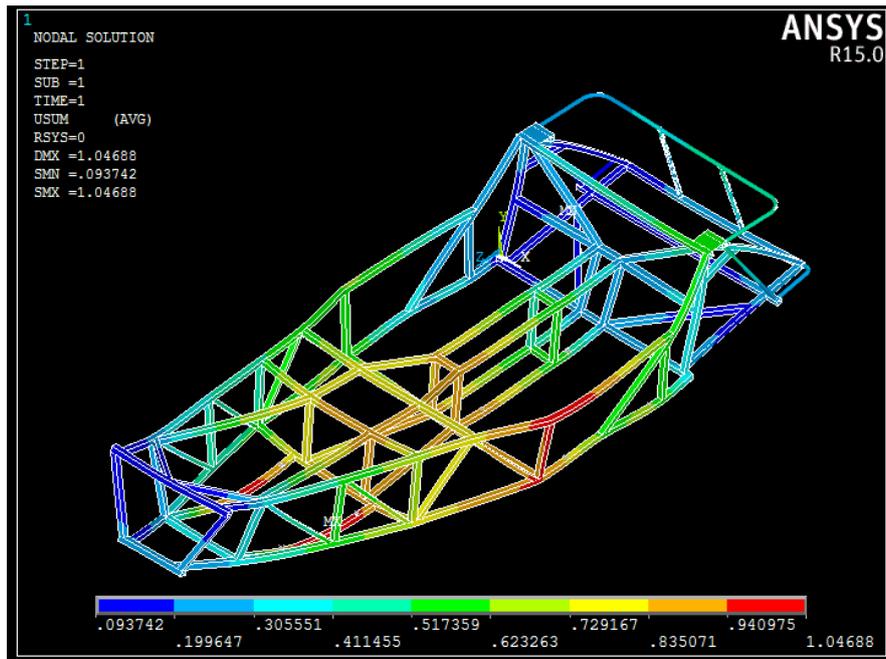


Figura 77: Representación del desplazamiento total del chasis en el caso de frenada.

De nuevo se observa como los mayores desplazamientos (máximo en 1.048 mm) se encuentran en la zona donde se sitúa el motor, y como la situación de este es causante de los desplazamientos cercanos.

Otro detalle que se aprecia en la figura 77, es la ya comentada asimetría del modelo, que si bien en el caso de aceleración no se apreciaba correctamente fruto de las restricciones impuestas, si sale a la luz en este caso. Se observa como el lado en el que se sitúa el piloto, sufre unos desplazamientos mayores que el opuesto, debido a la fuerza de inercia correspondiente a la masa del piloto.

En conjunto los valores que se presentan permiten afirmar que el comportamiento del vehículo frente a un caso de frenada es correcto y natural.

5.3.3 Simulación 3: Paso por curva a derecha.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la simulación de un primer caso de paso por curva, como se ha comentado anteriormente el modelo no presenta geometría al estar descentrado el piloto, lo que hace necesario dos soluciones.

También conviene recordar que los presentes resultados son el fruto de la acción de la fuerza centrípeta sobre el chasis, dicha fuerza es la que obliga al vehículo a trazar la curva.

En la figura 78 se presenta la deformada resultante de este caso particular, además del cuerpo del chasis sin deformar. Se define el avance del vehículo en el sentido positivo del eje Z.



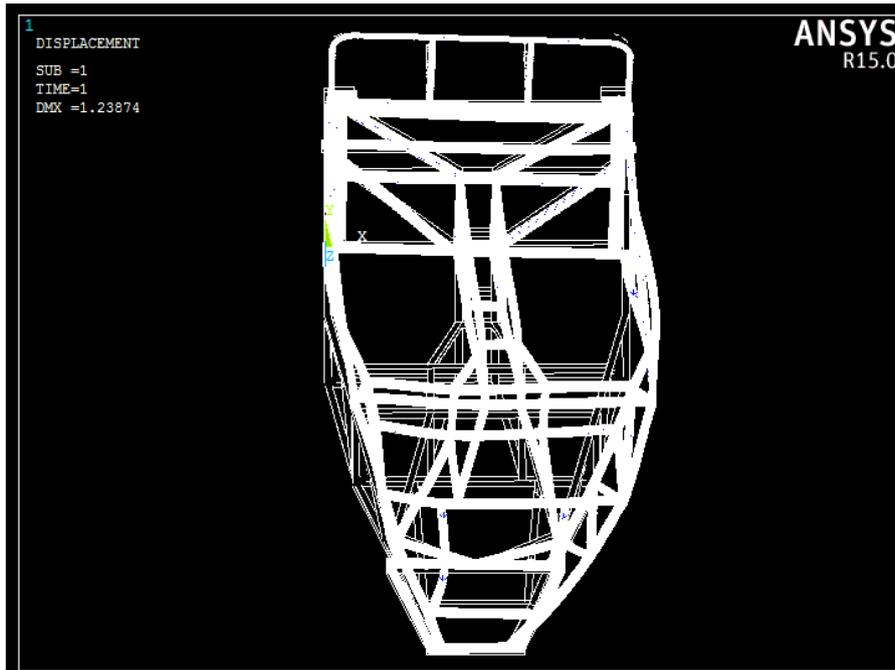


Figura 78: Deformada del chasis en la simulación de paso por curva a derecha. Vista en perspectiva.

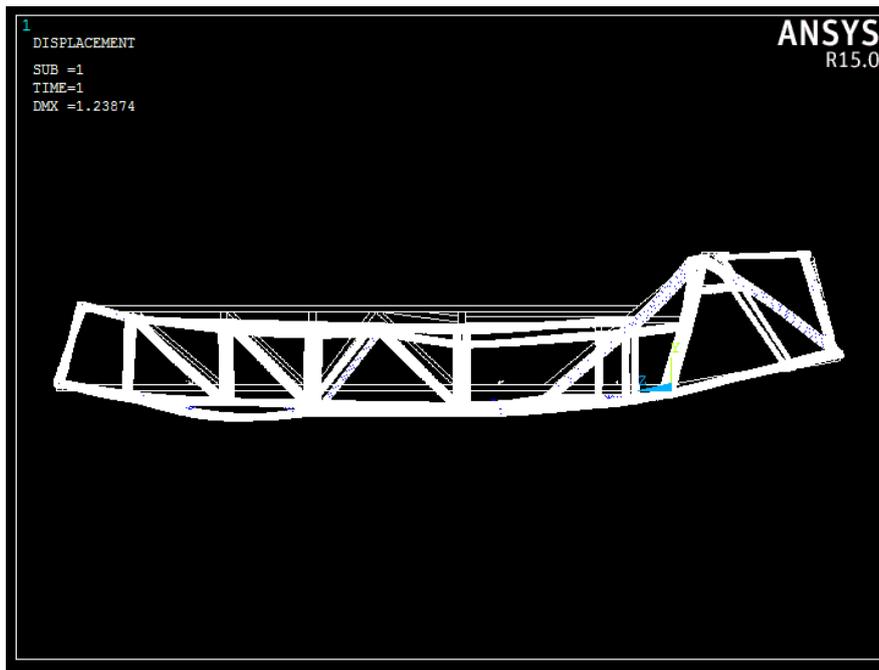


Figura 79: Deformada y cuerpo inicial del chasis en el caso de paso por curva a derecha.

Se puede observar de forma clara el efecto que tiene la fuerza centrípeta sobre el chasis, y como toda la estructura se deforma hacia la parte exterior de la curva. Las masas del piloto y del motor siguen teniendo un efecto importante sobre el comportamiento del chasis, en este caso además de aportar el peso debido a la gravedad, presentan una inercia lateral que hace que las zonas donde más se acusa la deformación sean las situadas en su proximidad.

El comportamiento resulta el esperado de un chasis en esta situación dinámica y no presenta grandes deformaciones o zonas con formas forzadas.

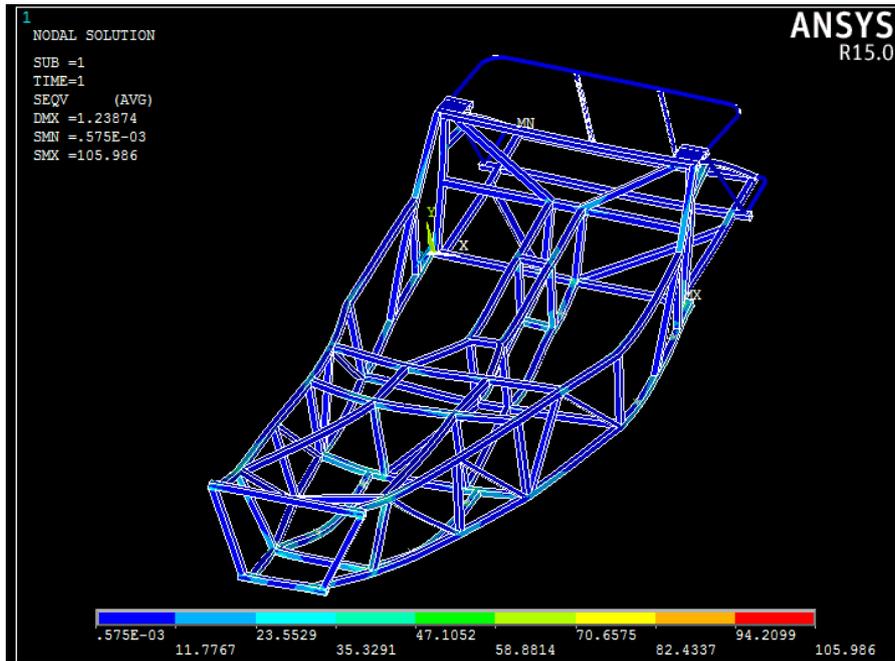


Figura 80: Representación de los valores de tensión de Von Mises en la estructura.

Los valores de la tensión de Von Mises en el chasis para el caso particular de paso por curva a derecha (ver figura 80), arrojan un dato de tensión máxima mayor que en el caso de aceleración y frenada, pero de nuevo se presenta la tendencia general de valores de tensión bajos a lo largo de todo el chasis.

Se encuentran valores de entre 10 y 30 megapascuales en las zonas de unión, y el valor máximo es de 105.986 megapascuales. Este valor (situado en la imagen con el símbolo MX) se debe a la disposición de restricciones y masas próximas a él. Si se compara su localización en la figura 78, perteneciente a la deformada del mismo caso, se observa como esa zona tiende a no deformarse, provocando así mayores picos de tensión. En primer lugar se ve afectado por la inercia asociada a la masa del piloto, que en este caso particular se sitúa en el exterior de la curva, aumentando así las solicitaciones sobre las barras próximas a él. Esto unido a las restricciones laterales cercanas propicia la aparición de esta tensión.

En ningún caso supone una tensión preocupante permitiendo un coeficiente de seguridad $n=4.86$, y se verifica el comportamiento del chasis frente a esta nueva situación.

Por último se presenta el resultado del vector global de desplazamiento en los diferentes puntos de la estructura en la figura 81. El valor máximo se encuentra en la frontera del milímetro, concretamente es de 1.23874, y de nuevo se localiza en la zona donde se sitúa el motor, siendo por tanto fruto del peso de este. Se presentan valores de desplazamientos pequeños que verifican el comportamiento correcto del chasis, y no producen advertencias sobre el modelo.

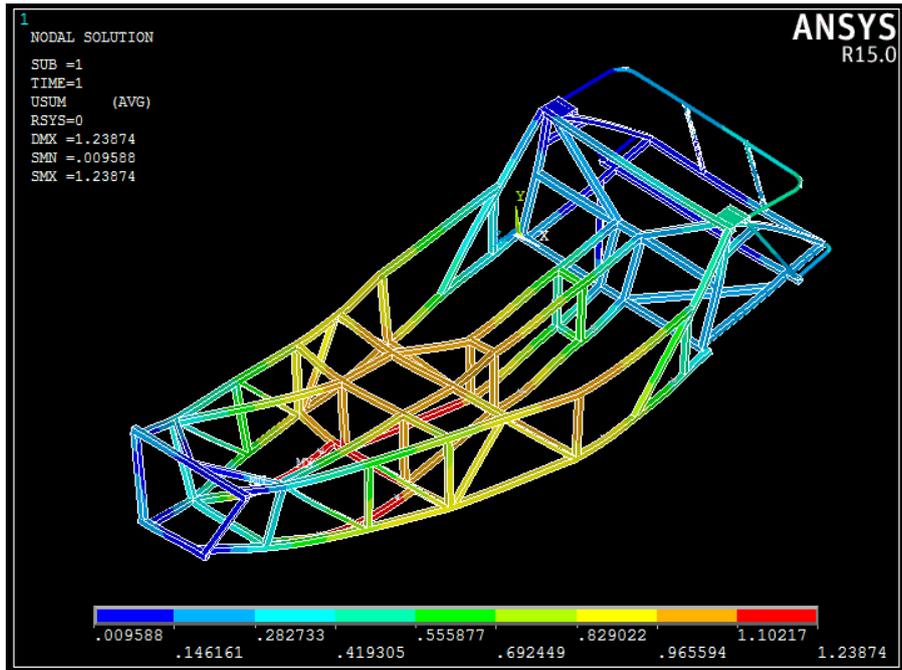


Figura 81: Representación del vector global de desplazamiento para el caso de paso por curva a derecha.

5.3.4 Simulación 4: Paso por curva a izquierda.

Con esta simulación se completa el estudio del chasis frente a una situación en curva. Los valores que presenta son parecidos a los expuestos en el apartado anterior, pero las singularidades que los diferencian son claramente apreciables.

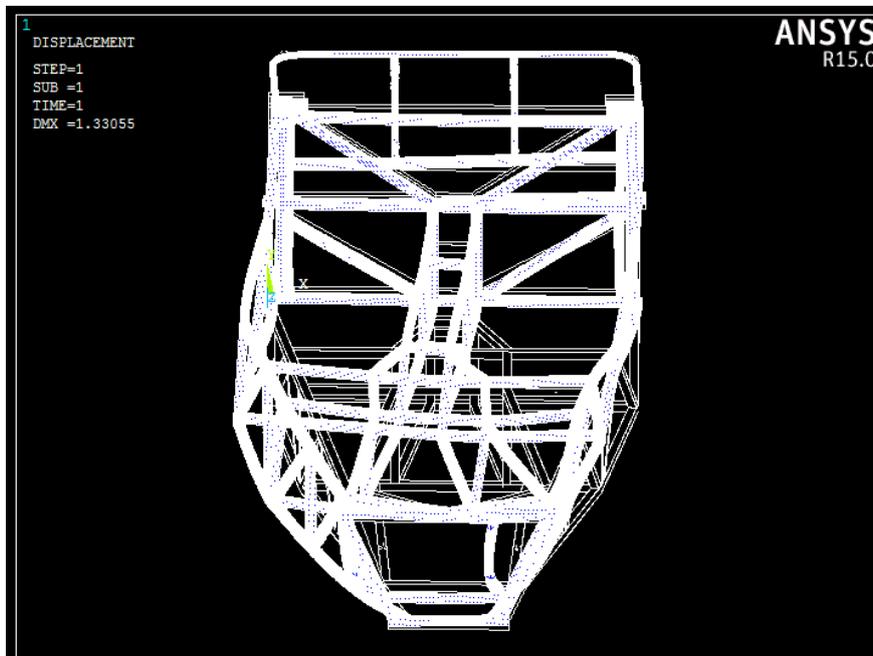


Figura 82: Deformada resultante del paso por curva a izquierda. Vista en perspectiva.

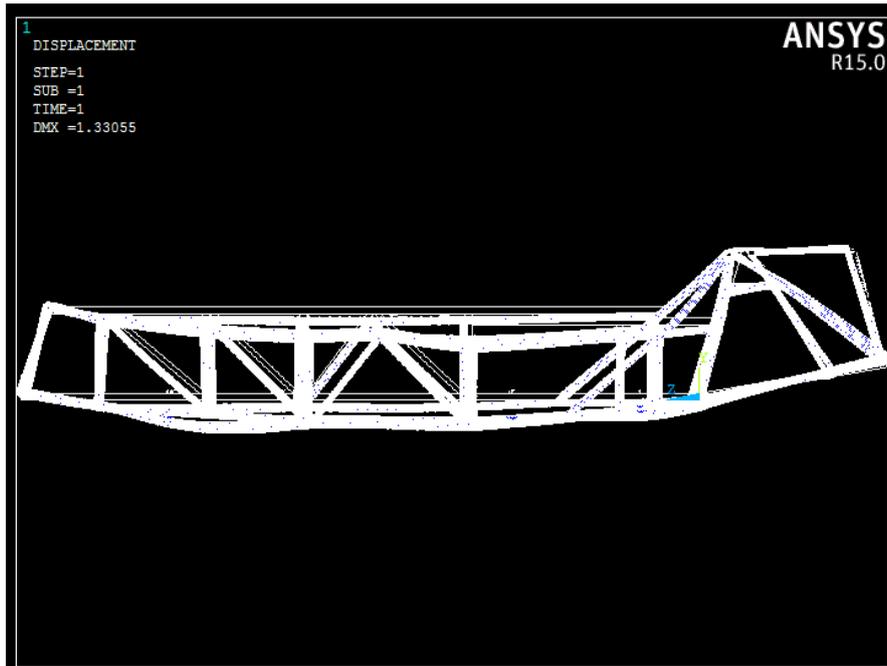


Figura 83: Deformada resultante del paso por curva a izquierda.

La deformada, representada en las figuras 82 y 83, presenta claras semejanzas con la anterior, particularizando ahora el sentido de la curva. Como es de esperar, el chasis se deforma hacia la zona exterior de esta y de nuevo el efecto de las masas externas consideradas también es bien visible.

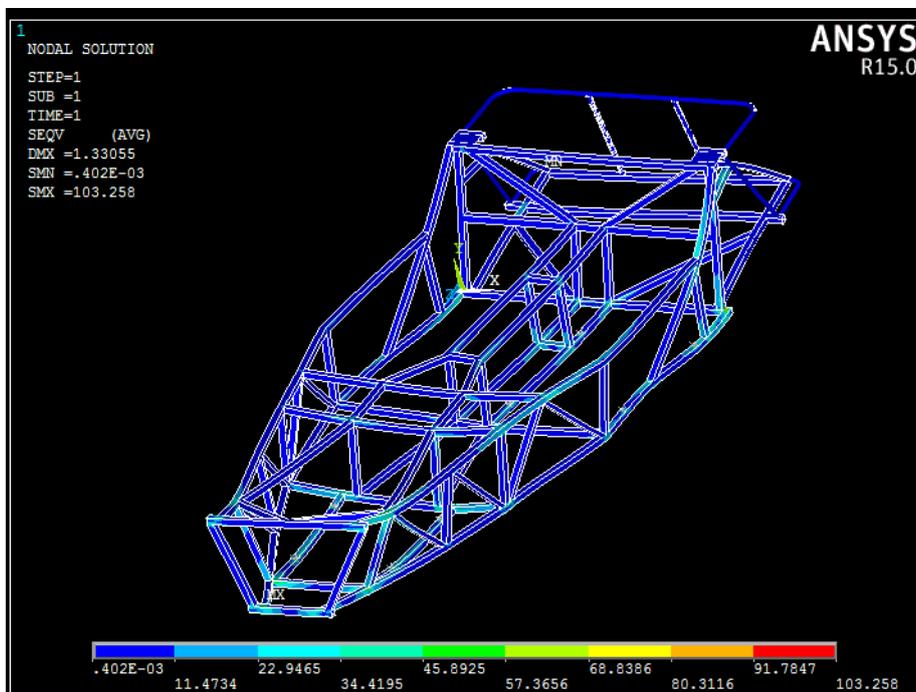


Figura 84: Representación del valor de tensión de Von Mises en el caso de paso por curva a izquierda.

En la figura 84, se presenta el resultado de los valores de tensión de Von Mises en el chasis, se observa como de nuevo las tensiones predominantes son muy bajas, presentando valores algo mayores en las uniones entre barras.

El valor máximo de tensión es muy parecido al caso anterior, pero su situación cambia notablemente y pone de manifiesto la asimetría y diferente comportamiento debido a la situación del piloto. En este caso la masa del piloto se encuentra en el interior de la curva resultando así menos influyente, al poder absorber su inercia una zona más extensa del chasis (largueros traseros y puente de trasmisión entre otros). Esto hace que el valor máximo de 103.258 Mpa se desplace hacia la zona delantera y situada en el exterior de la curva, debido a que ahora la masa del motor resulta más influyente.

Se obtiene un valor de coeficiente de seguridad de 4.98, y supone una tensión perfectamente asumible por el chasis.

En la figura 85 se presentan los valores del vector global de desplazamientos en el caso de paso por curva a izquierda. Presenta unos valores muy parecidos a los obtenidos en el caso anterior. El desplazamiento máximo de 1.33 milímetros, no supone un valor alto y pone de manifiesto un comportamiento adecuado por parte del chasis, que es capaz de transmitir los esfuerzos permitiendo unos desplazamientos muy bajos.

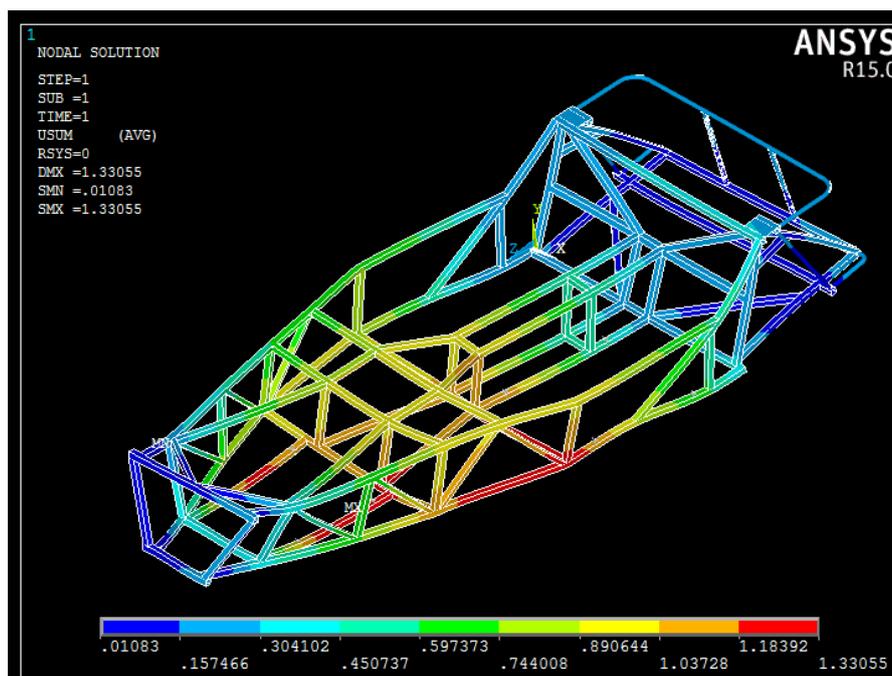


Figura 85: Representación del vector global de desplazamiento del chasis para el caso de paso por curva a izquierda.

El máximo presente se debe de nuevo a la cercanía de la masa del motor, pero en este caso se observa cómo cambia de lado con respecto al anterior. La explicación reside en el sentido de la curva, mientras que la acción del peso del motor es semejante en ambos casos, el lado exterior



siempre tiende a desplazarse lateralmente de forma más acusada, lo que influye de forma importante en el vector global.

5.3.5 Simulación 5: Torsión.

Como se ha comentado anteriormente el comportamiento a torsión del chasis de un vehículo es uno de los parámetros que más importancia tienen en la respuesta dinámica de este. No obstante, resulta complicado ofrecer un cálculo comparativo de valores de torsión, pues existen una serie de componentes mecánicos que incrementan ese valor y que pueden ser o no considerados. Además, en el caso particular de este chasis (ver apartado 3.3.), existen una serie de placas que recubren la estructura en su construcción final y que también tienen influencia sobre el resultado. Si recordamos la fórmula que permite realizar este cálculo, disponemos de:

$$\text{Rigidez torsional} \left(\frac{Nm}{\circ} \right) = \frac{R * dh}{\theta}$$

Donde:

R: valor de la reacción en el nodo en el que se impuso la restricción vertical con valor cualquiera.

dh: distancia horizontal entre los anclajes del eje en que se impuso la restricción vertical cualquiera.

θ : $\arctg\left(\frac{dv}{dh}\right)$; donde dv es el valor de la restricción cualquiera impuesta.

El primer paso por tanto será determinar el valor de la restricción vertical distinta de cero que se impondrá en un nodo del chasis. Para la determinación de este valor se han de considerar las longitudes del chasis, su batalla y su vía; y obviamente las unidades usadas.

En este caso se tomó un desplazamiento vertical por valor de 2 milímetros, en un nodo correspondiente a la sujeción del brazo de suspensión trasero izquierdo. Por lo tanto queda determinada la primera de las variables presentes $dv=2$ mm.

Una vez determinada la distancia vertical que se impondrá, es necesario conocer la distancia entre las restricciones verticales situadas en el tren trasero (en este caso en la zona de los brazos de suspensión). En el chasis que se somete a estudio este valor es $dh=999.8$ mm.

Con estos dos valores es posible calcular el ángulo θ mediante la relación geométrica indicada. Presenta un valor en grados de 0.11.

Por último es necesario conocer el valor de la reacción vertical en el nodo en el que se impuso un desplazamiento concreto. Para ello se selecciona el nodo correspondiente y se determina su reacción(ver figura 86).



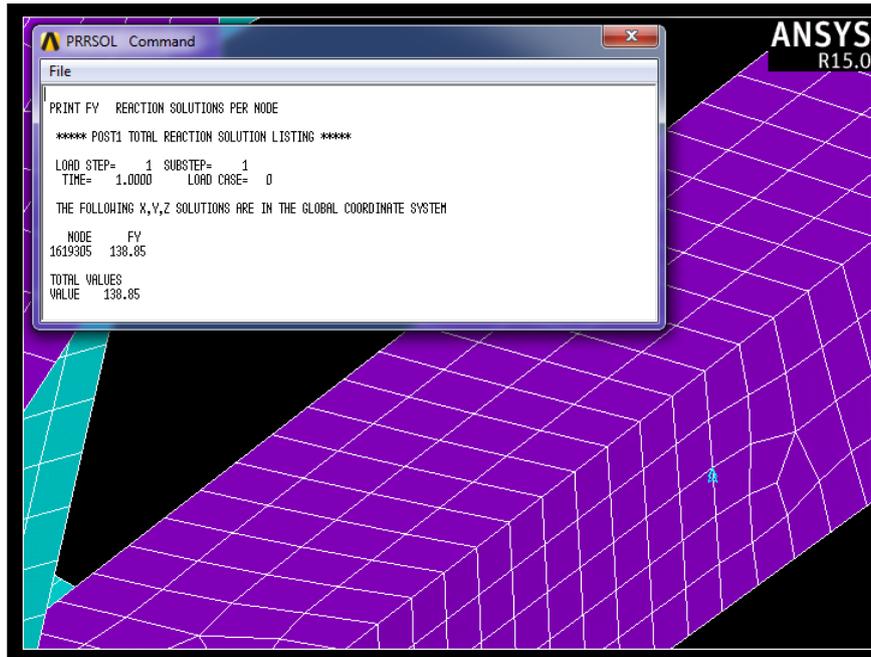


Figura 86: Detalle del valor de la reacción vertical del nodo con restricción impuesta.

Su valor resulta $R=138.85 \text{ N}$

Por lo tanto:

$$\text{Rigidez torsional} \left(\frac{\text{Nm}}{\circ} \right) = \frac{138.85 * 0.9998}{0.11} = 1262 \frac{\text{Nm}}{\circ}$$

Este valor de rigidez torsional se corresponde al calculado únicamente sobre las barras que conforman el chasis, sin las placas que las recubren posteriormente, y sin considerar ningún elemento mecánico para un aumento de rigidez del chasis.

Una vez se dispone de este valor puede calcularse la tasa de rigidez/peso, este valor cuantificar la rigidez torsional del chasis por kg de material y menudo es considerado en estudios comparativos entre distintos materiales que pudiesen ser usados para realizar el chasis.

En el apartado 5.1.3. se dispone del peso del chasis en vacío que resultaba 55.86 kg, con una sencilla cuenta se obtiene una tasa de rigidez/peso de 22.59 Nm/° por kg.

En la figura 87 se representan los desplazamientos verticales presentes en el chasis, pudiéndose verificar el desplazamiento vertical impuesto en la zona trasera, y las restricciones en el resto de anclajes de los brazos de suspensión.

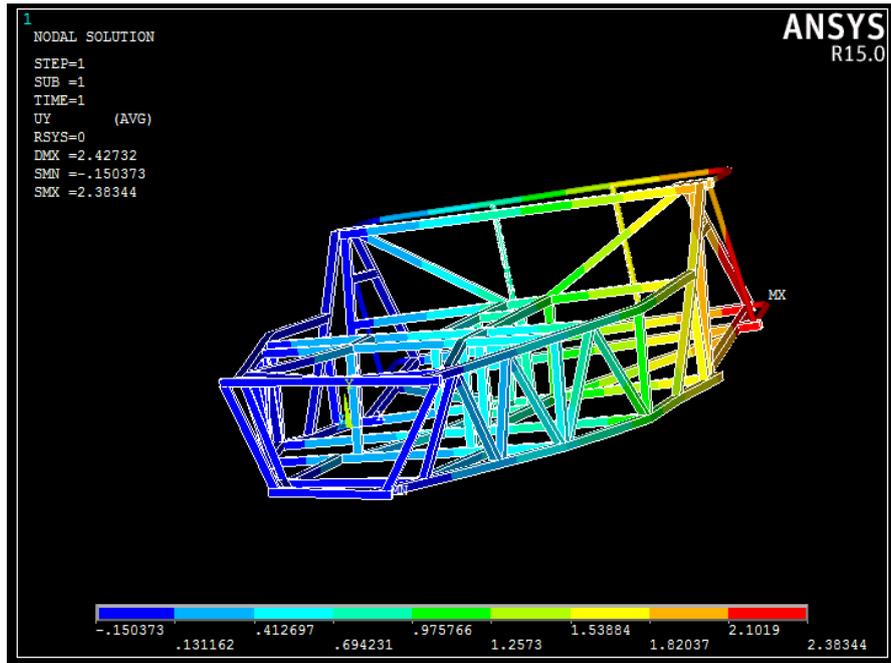


Figura 87: Representación de los desplazamientos verticales UY en el caso de Torsión.

En la figura 88 se presenta el esquema de tensiones de Von Mises en la estructura ara este caso en particular. Se puede observar como no se alcanzan valores críticos o que comprometan la unidad del conjunto, encontrándose el valor máximo de 32.8179 MPa en la zona opuesta al anclaje con la restricción vertical de 2mm. Por lo tanto se demuestra la capacidad del chasis de actuar frente a una situación real de torsión, ofreciendo unos valores de tensión bajos.

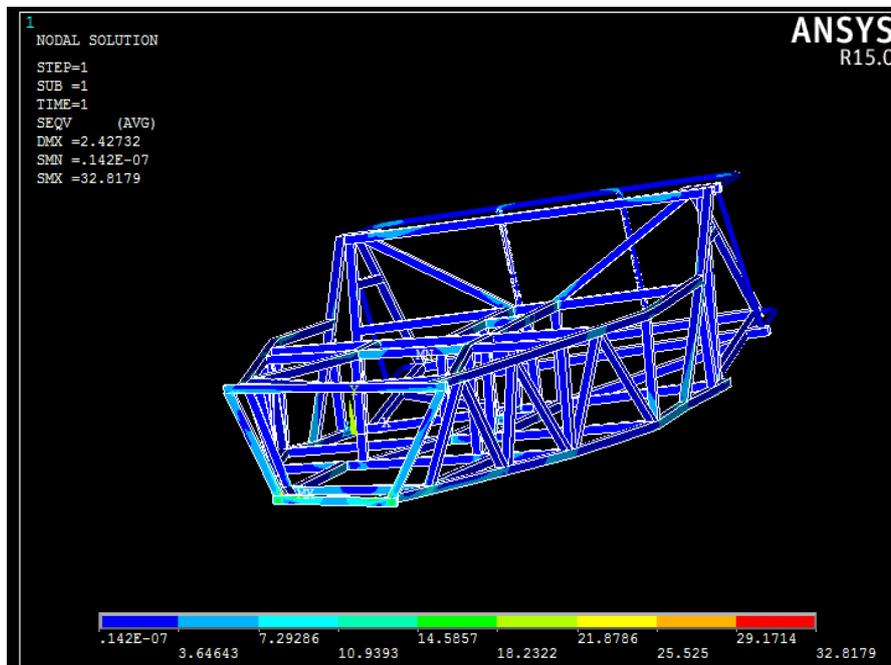


Figura 88: Representación de los valores de tensión de Von Mises en el chasis para el caso de Torsión.

5.3.6. Simulación 6: Fatiga.

En el apartado 5.2.7 se detalló todo el proceso y las diferentes variables que se han de tener en cuenta para realizar el ensayo a fatiga. La gran mayoría del trabajo llevado a cabo en esta simulación se efectúa en dicho apartado, y por primera vez ANSYS no presenta los resultados de forma gráfica tal y como se han ido indicando en el resto de simulaciones.

La solución consiste en una ventana que presenta el número de ciclos usados (es decir el número de ciclos asignados por el evento pertinente) y el número de ciclos permitido (ciclos máximos antes de que el material sufra un fallo por fatiga). Mediante estos dos valores elabora un factor de fatiga que se encuentra entre 0 y 1 si no se produce un fallo por fatiga; o bien se sitúa en valores mayores a la unidad cuando se produce el fallo.

En primer lugar es importante conocer las localizaciones de los nodos en los que va a ser estudiado su comportamiento a fatiga, y que son los correspondientes a los valores máximos de tensión de Von Mises de las diferentes simulaciones realizadas hasta ahora. Estas localizaciones no se incluyeron en el apartado previo de fatiga, al no estar resueltas aún las distintas simulaciones, y con el objetivo de llevar un orden lógico.

En la siguiente tabla se presentan los números de nodo de las diferentes simulaciones, el número identificativo que se les asocia, y un título que aporta mayor sencillez. Como se ha apuntado anteriormente en el caso de estudio se dispone de un único evento, es decir solo se considera un número de ciclos determinado para los distintos estados de carga presentes.

No obstante, ANSYS presenta una particularidad ya mencionada con anterioridad y que solo permite la introducción de tres estados de carga por evento, lo que hace necesaria la creación de un segundo evento con el mismo número de ciclos para poder llevar a cabo nuestro estudio.

La tabla 5 presentaba un único evento para los cinco estados de carga, pues pretendía poner de manifiesto el único número de ciclos que iba a ser usado en los diferentes estados. En la tabla 6, ya se tiene en cuenta la particularidad presente:

Nº Evento	Estado de carga	Título	Nº de nodo
1	1	Aceleración	46145
1	2	Frenada	36947
1	3	Curva izquierda	21925
2	1	Torsión	22867
2	2	Curva derecha	33620

Tabla 7: Estados de carga y eventos en fatiga.

Se obtienen los siguientes resultados. El estudio revela un comportamiento a vida infinita del chasis, en todas las localizaciones se presenta este mismo comportamiento. Los resultados en las cinco localizaciones se interpretan siempre de la misma manera, por lo que solo se detallará la interpretación de dos de ellas, dejando únicamente indicada la solución de las tres restantes.



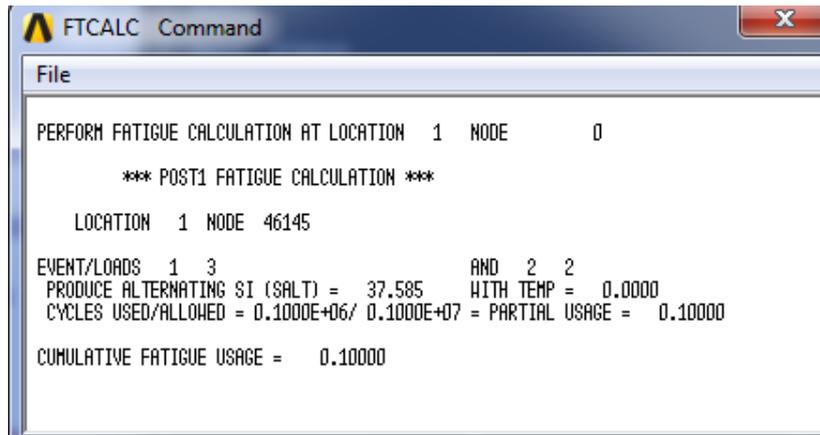


Figura 89: Resultado del ensayo a fatiga para la localización 1.

La localización 1(ver figura 89), es la determinada por el valor máximo de tensión en el caso de aceleración. La combinación del evento 1 con el estado de carga 3 y del evento 2 con el estado de carga 2, produce una tensión alternante de 37.585 MPa. El chasis está sujeto a un número de ciclos de 10^5 , mientras que el máximo número de ciclos permitido es de 10^6 . Por lo tanto presenta vida infinita.

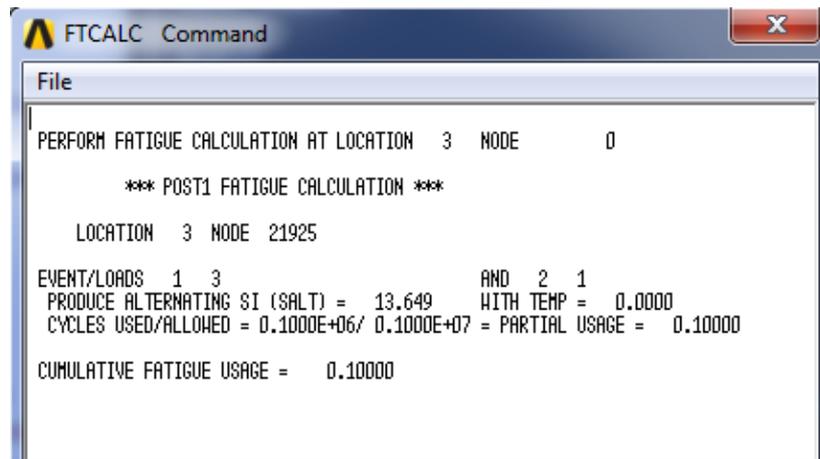


Figura 90: Resultado del ensayo a fatiga en la localización 3.

En este caso la localización tres (ver figura 90), hace referencia al valor máximo de tensión en el caso de paso por curva a izquierda. La combinación del evento 1 con el estado de carga 3 y del evento 2 con el estado de carga 1, produce una tensión alternante de 13.649 MPa. De nuevo se presenta un comportamiento de vida infinita, con un número máximo de ciclos permitidos de 10^6 , frente a los 10^5 impuestos, con lo que se consigue un factor de 0.1.

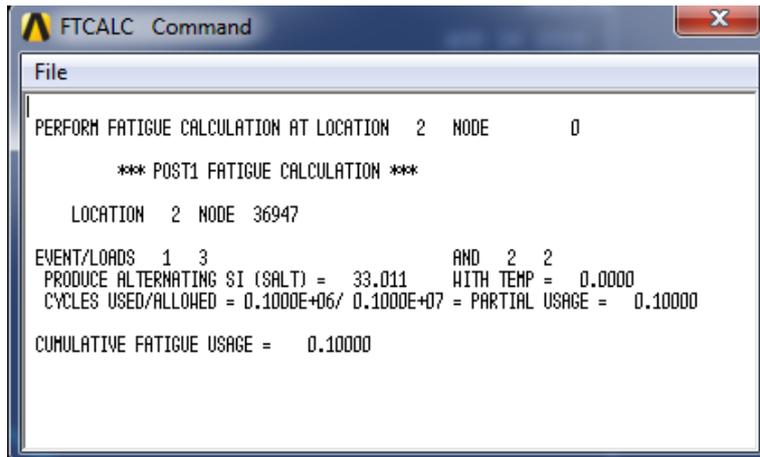


Figura 91: Resultado del ensayo a fatiga en la localización 2.

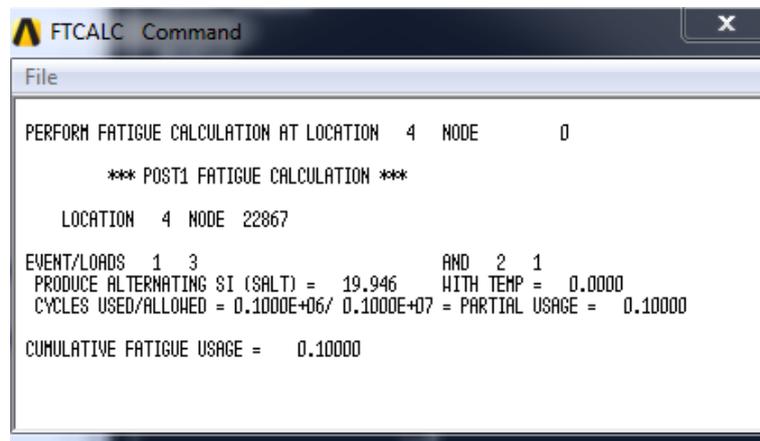


Figura 92: Resultado del ensayo a fatiga en la localización 4.

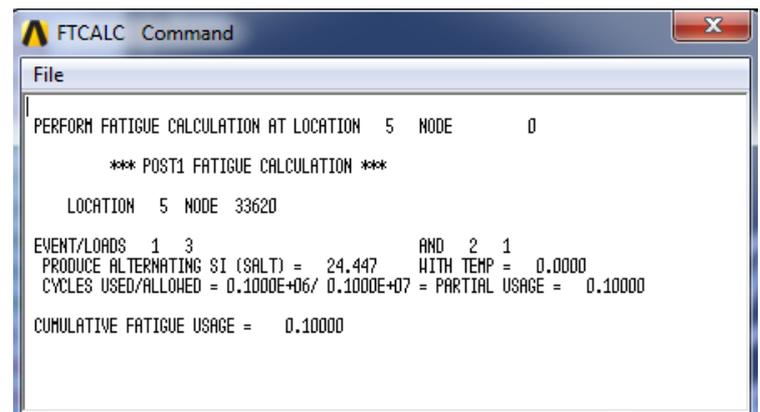


Figura 93: Resultado del ensayo a fatiga en la localización 5.

6. Fabricación.

Una vez solucionado y validado el diseño, se puede proceder a la fabricación de la estructura bajo plano. Se llevan a cabo diferentes fases antes de obtener el chasis final, y se ha de ser cuidadoso en esta última fase si se quieren conseguir unos resultados idóneos.

6.1 Material utilizado.

El acero empleado es de calidad ST-52 DIN 2391, cuenta con una gran disponibilidad así como una buena combinación de propiedades y es comúnmente usado en el ámbito del automóvil, sus características mecánicas se detallan en el apartado 4.2.1.2 de la presente memoria. [6]

La estructura está formada por barras y tubos de diferentes espesores. En el caso de las barras únicamente será necesario realizar el corte geoméricamente adecuado siguiendo lo dispuesto en los planos, no obstante en el caso de las barras están pueden ser conformadas en frío o en caliente. [12]

Si el acero es conformado en caliente, se obtiene un tamaño de grano grande lo que hace que tenga que ser posteriormente tratado para mejorar sus propiedades. Sin embargo el conformado en frío es más rápido y económico, consiguiendo además unas tolerancias aceptables, tarea imposible en el conformado en caliente. [24]

Por tanto se va a partir del acero mencionado, sin tratamiento térmico posterior y conformado en frío, para la creación de las barras y tubos del chasis.

6.2 Corte del material.

Existen diferentes técnicas de corte que pueden ser empleadas para obtener las barras y tubos con las dimensiones deseadas, la elección final dependerá fundamentalmente del criterio económico. La opción ampliamente escogida para el corte de perfiles y barras de acero, es el corte por aserrado(ver figura 94).

El corte por aserrado es una operación de desbaste que se lleva a cabo a nivel industrial a través de sierras de cintas. Debido a la fricción generada durante el corte necesita de la presencia de un líquido que actúe como refrigerante y eliminador de virutas, labor que cumple la taladrina. [25]





Figura 3: Máquina automática de corte por aserrado para perfiles de acero.

Las ventajas del corte por aserrado son las mencionadas sencillez y economía, presentando además unas tolerancias correctas.

Existen ciertas uniones entre barras o tubos que precisan de un corte con unos ángulos determinados para su correcto montaje en futuras fases. Estas máquinas cuentan con un selector de grados que permite de forma sencilla el corte en ángulo con una precisión de décimas de grado. [7]

Una vez efectuado el corte como mínimo es necesario realizar un tratamiento superficial consistente en el cepillado y limado de la superficie.

6.3 Curvado de secciones circulares.

Una vez se ha completado la fase de corte de las diferentes barras y tubos de acero, la geometría del chasis existente presenta una serie de tubos de acero que han de ser curvados. La operación de curvado consiste en la deformación plástica de un perfil haciéndolo fluir por una serie de ejes rectos y existen varias consideraciones que han de tenerse en cuenta.[24]

En primer lugar se debe de tener en cuenta que durante el proceso de curvado, el perfil puede sufrir un aumento de anchura debido a los efectos de compresión que aparecen, por lo que el material ha de escogerse de forma conveniente. Otra particularidad del curvado es que debido al esquema de tensiones de tracción y compresión presentes, el material tiende a recuperarse levemente del curvado una vez ha sido realizada la operación. Para paliar ese problema se debe recurrir a aumentar el grado de curvatura, para que al recuperarse se presente el ángulo deseado y no menor.

Al igual que en las técnicas de corte existen diferentes métodos de curvado, pero el más apropiado y común para la realización de este tipo de chasis es el uso de un curvado por rodillos(ver figura 95).



Figura 95: Máquina de curvado por rodillos para perfiles de acero.

Este tipo de máquinas suelen contar con tres cilindros dispuestos en forma triangular, los dos rodillos inferiores son de arrastre, permitiendo que el material fluya entre los tres, y el cilindro superior es ajustable en altura y el encargado de realizar el esfuerzo necesario para que a su paso el perfil adquiera la curva deseada.

Existe información amplia sobre el proceso de curvado en la referencia [8].

6.4 Soldadura y montaje.

Una vez completados los apartados anteriores se disponen de todos los perfiles necesarios para el montaje final del chasis. Antes de comenzar el montaje conviene introducir las dos técnicas de soldadura mayormente usadas para la unión de los perfiles del chasis.

- Soldadura GTAW o TIG.

Este proceso de soldadura consiste en un arco bajo un gas protector con un electrodo no consumible(ver figura 96). Se utiliza como energía el arco eléctrico producido que salta entre el electrodo y la pieza a soldar, y que se encuentra protegido por un baño de gas.

Generalmente se realiza de forma manual, y los operarios están altamente cualificados, permite además un empleo en todo tipo de posiciones, uniones y en una amplia gama de materiales. Además no produce escorias, y la soldadura es limpia al producirse en una atmósfera inerte.

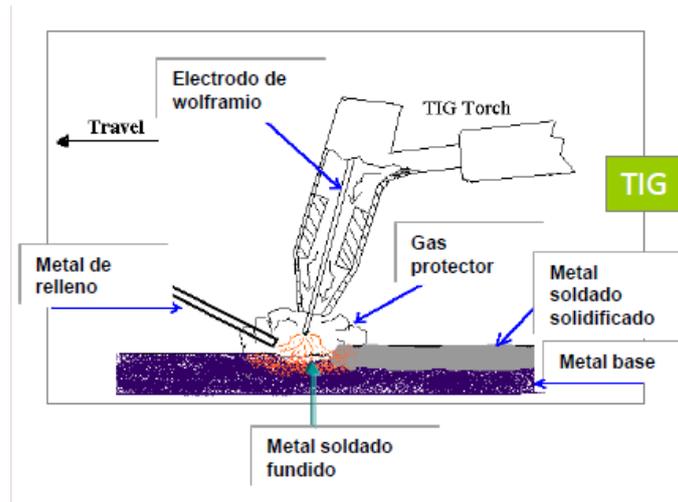


Figura 96: Esquema de la soldadura TIG.

- Soldadura GMAW o MIG/MAG.

Este tipo de soldadura presenta un electrodo consumible bajo gas protector, el arco se establece entre un electrodo de hilo continuo y la pieza, protegidos por un gas inerte (MIG) o bien por un gas nocivo (MAG). Se presente un esquema en la figura 97.

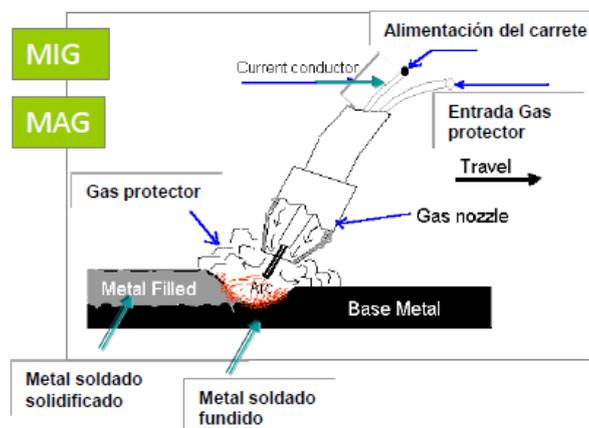


Figura 97: Esquema de soldadura MIG/MAG.

La soldadura puede ser llevada a cabo de diferentes formas. Puede tratarse de un proceso semiautomático, donde la tensión del arco, velocidad de alimentación del hilo y caudal de gas se regulan previamente. El arrastre de la pistola se hace manualmente

Puede ser también automático, donde todos los parámetros, incluida la velocidad de soldadura, se regulan de forma previa y se aplican automáticamente. Por último, puede ser un proceso robotizado. La soldadura GMAW es la que ha sufrido una mayor robotización a nivel industrial, los robots se programan a través de unidades específicas.

Estos procesos de unión por soldadura, pueden presentar fallos, sobre todo aquellos que han sido aplicados de forma manual. Existen distintos métodos de inspección de soldaduras, como la inspección por líquidos penetrantes o la inspección por ultrasonidos.

Ambas son ensayos no destructivos pero presentar diferencias notables. La inspección por líquido penetrante permite detectar fallos superficiales mediante un líquido que penetra por capilaridad en la superficie. Una vez se retira el exceso, y con la ayuda de un líquido revelador, salen a la luz las fisuras e imperfecciones presentes.

La inspección por ultrasonidos puede distinguir fallos a nivel interno, a diferencia de la anterior, y hace uso de la propagación del sonido para detectar las discontinuidades, cuando aparece eco en el tubo de rayos catódicos en la pantalla se presenta un pico que indica la presencia de una imperfección.

En función de la técnica de soldadura usada y de la situación que ocupe en cada caso, se pueden encontrar diferentes soluciones para resolver la soldadura. A la hora de efectuar las uniones soldadas nos encontramos ante dos tipos, unión directa o unión indirecta.

En el caso particular del chasis, conviene realizar previo al montaje de las barras y tubos, un bastidor que sirva como estructura para soldar y para mantener el chasis sujeto. Se empezará soldando por tanto la parte inferior del chasis, con el objetivo de anclarla después al bastidor.

A continuación se realiza la soldadura por unión directa de las barras y tubos de geometrías sencillas o bien de las de mayor diámetro, para poder ir acoplando sobre estos el resto de perfiles.

En los casos en los que se presentan problemas de geometría (por ejemplo un nodo al que llegan tres barras), se hace necesario recurrir a la unión por soldadura indirecta, proceso que hace uso de una chapa metálica para mantener la orientación y posición de los perfiles que se desean soldar.

El proceso de montaje del chasis se suele realizar de la siguiente forma. En primer lugar, y siempre mediante puntos de soldadura por si se induce algún error, se empieza formando la parte delantera del chasis. A continuación le sigue la estructura lateral, para terminar con la parte posterior. Una vez validado la posición de los diferentes perfiles se puede proceder al solado final de estos siguiendo las pautas anteriores.

En lo referente al proceso de soldadura, en la referencia [24], se puede encontrar y ampliar la información.

6.5 Granallado e imprimaciones.

El granallado de los perfiles que componen el chasis, es un paso opcional pero altamente recomendable. Es un proceso de limpieza que emplea un chorro abrasivo y aporta una excelente limpieza y preparación de las superficies donde posteriormente vayan a darse capas de imprimación o pintura.



Además tiene la característica de fortalecer y pulir el metal, por lo que es usado ampliamente en industrias como la aeronáutica o del automóvil. [25]

El último paso en la fabricación del chasis, es dar las capas de imprimación al chasis y pintarlo del color deseado. Las capas de imprimación (que suelen ser dos) son necesarias para repeler el óxido y a la vez para que la pintura agarre. Una vez seca la capa de imprimación se pinta del color deseado. [25]



7. Presupuesto.

A continuación se adjunta un presupuesto orientativo que engloba tanto el apartado técnico referente a la modelización del chasis por parte del ingeniero, como el relacionado con la fabricación de este.

En primer lugar se indican en la tabla 7 las distintas barras, tubos y placas que componen el chasis estudiado, detallando su longitud, material, cantidad y coste por sección. El coste de las barras y tubos está expresado en €/m, sin embargo el relativo a las planchas de acero viene dado por unas longitudes mínimas propias del fabricante y por lo tanto se ha de considerar como precio unitario

	IDENTIFICADOR	SECCIÓN	PRECIO
	1	Barra de espesor 1.626 mm.	5.33 (€/m)
	2	Tubo de espesor 1.651 mm	7.82 (€/m)
	3	Placa de espesor 3 mm	13.81
	4	Placa de espesor 4.626 mm	27.24

Tabla 8: Secciones presentes en la geometría y precio por metro.

En la tabla 8, se presentan las diferentes piezas que componen el chasis, indicando a que sección pertenecen , así como la longitud de estas y finalmente el precio de cada una de las partes.

Pieza	Sección	Cantidad	Longitud(mm)	Longitud total (m)	Precio por sección (€/m)	Precio (€)
A1, A2	1	2	812,80	1,63	5,33	8,66
B1, B2	1	2	1016,00	2,03	5,33	10,83
C	1	1	822,96	0,82	5,33	4,39
D1, D2	1	2	584,20	1,17	5,33	6,23
E	1	1	383,54	0,38	5,33	2,04
F1, F2	1	2	1003,30	2,01	5,33	10,70
LA	1	1	340,36	0,34	5,33	1,81
LB	1	1	340,36	0,34	5,33	1,81
LC	1	1	622,30	0,62	5,33	3,32
LD	1	1	342,90	0,34	5,33	1,83
H	1	6	279,40	1,68	5,33	8,94
K1, K2	1	2	789,94	1,58	5,33	8,42
O	1	1	1066,80	1,07	5,33	5,69
K3, K4	1	2	513,08	1,03	5,33	5,47

M1, M2	1	2	256,54	0,51	5,33	2,73
N1, N2	1	2	690,88	1,38	5,33	7,36
J1, J2	1	2	1473,20	2,95	5,33	15,70
Q	1	1	822,96	0,82	5,33	4,39
P	1	1	911,86	0,91	5,33	4,86
S, T	1	2	347,98	0,70	5,33	3,71
RU1, RU2	1	2	635,00	1,27	5,33	6,77
V	1	1	965,20	0,97	5,33	5,14
Y	1	1	914,40	0,91	5,33	4,87
Y_EXT	1	2	50,80	0,10	5,33	0,54
BCT	1	2	186,69	0,37	5,33	1,99
BTPM	1	2	101,60	0,20	5,33	1,08
W1	1	1	637,54	0,64	5,33	3,40
W2	1	1	637,54	0,64	5,33	3,40
RETT	2	1	1601,47	1,60	7,82	12,52
X3, X4	2	2	401,32	0,80	7,82	6,28
X1, X2	2	2	480,06	0,96	7,82	7,51
O3	1	1	965,20	0,97	5,33	5,14
O1	1	1	477,52	0,48	5,33	2,55
O2	1	1	477,52	0,48	5,33	2,55
_e, _f	1	2	241,30	0,48	5,33	2,57
Z	1	1	558,80	0,56	5,33	2,98
FU1, FU2	1	2	304,80	0,61	5,33	3,25
G1, G2	1	2	688,34	1,38	5,33	7,34
R	1	1	711,20	0,71	5,33	3,79
_a, _b	1	2	762,00	1,52	5,33	8,12
_c, _d	1	2	127,00	0,25	5,33	1,35
_e, _f	1	2	299,72	0,60	5,33	3,20
_g, _h	1	2	101,60	0,20	5,33	1,08
_i, _j	1	2	317,50	0,64	5,33	3,38
_k	1	4	215,90	0,86	5,33	4,60
_l, _m	1	2	546,10	1,09	5,33	5,82
_n, _o	1	2	228,60	0,46	5,33	2,44
BTP1	3	1			13,81	13,81
BTP2	4	1			27,24	27,24
					Total Chasis	273,61

Tabla 9: Coste de materiales del chasis.

Por otro lado, se debe tener en cuenta el trabajo realizado por el personal cualificado en las labores de corte, curvado, soldadura e imprimaciones. Este trabajo se ha estimado con un precio de 25 €/hora. En la tabla 9 se indican las horas empleadas para cada una de las fases de fabricación.

Se ha tomado como referencia un tiempo de corte por pieza de 1 minutos, un tiempo de curvado de 5 minutos por pieza y un tiempo de soldadura de 3 minutos por pieza. Además hay que tener en cuenta que cada pieza necesita de dos soldaduras y dos cortes. El granallado y la imprimación final se realizan una vez soldadas todas las partes.



Operación	Horas empleadas	Precio (€)
Corte del material.	2,76	69,00
Curvado	0,42	10,50
Soldadura	8,3	207,50
Granallado	1	25,00
Imprimación	1	25,00
Total fabricación		337,00

Tabla 10: Costes de fabricación del chasis.

Por último se incluye el coste referente a las horas de ingeniero empleadas, utilizando un precio por hora de 45€, el cual se detalla en la tabla 10. Se han separado las labores de representación gráfica, simulación y por último elaboración del informe. Es importante destacar que este coste derivado de las horas de ingeniero, se vería amortizado con la creación de varios chasis, repartiendo el coste total por cada unidad fabricada.

Descripción	Horas empleadas	Precio (€)
Representación gráfica	10	450,00
Simulación de casos	17	765,00
Elaboración de la memoria	13	585,00
Total		1800,00

Tabla 11: Costes de ingeniería.

La suma de cada uno de los costes implicados en el presente trabajo es de 6971.52 €, y en la tabla siguiente se indica el desglose de esta suma.

Partida	Coste (€)
Materiales	273,61
Mano de obra	337
Horas de ingeniero	1800
Presupuesto total	2410,61

Tabla 12: Coste total del proyecto.

El coste total del proyecto es de 2410,61€



8. Conclusiones.

En líneas generales el chasis ha demostrado tener la capacidad de resistir a las solicitaciones presentes en los diferentes casos de frenada, aceleración, paso por curva, etc. No se han encontrado valores de tensión preocupantes, ni tampoco un mal comportamiento a fatiga.

El hecho de trabajar sobre una base ya probada por profesionales del sector ha proporcionado menores problemas de representación, no obstante ha permitido entender diferentes decisiones que pueden ser tomadas como pautas para la creación de un chasis de este tipo.

En primer lugar se puede observar la presencia de tan sólo tres secciones distintas, siendo una de ellas la presente en casi el 75 % del chasis, esta decisión permite un coste reducido y facilita la fabricación de la estructura.

Además se puede observar que el espesor de estas secciones es contenido, lo que hace que el chasis no esté sobredimensionado, un problema muy común. Esto sin afectar a la rigidez torsional de forma acusada, permite su menor peso, el cual produce mejoras sustanciales en la respuesta del vehículo.

También puede verse una reducción del número de barras y tubos en zonas poco solicitadas que de nuevo aportan menor peso y mayor facilidad constructiva.

En resumen, todas estas decisiones hacen que el chasis sometido a estudio presente una buena respuesta a las situaciones que se le exigen con un peso contenido y una geometría sencilla que permite una fabricación más simple y rápida.

Este proyecto permite aproximar una de las etapas cruciales en el desarrollo de un vehículo, la simulación y validación de su chasis, haciendo uso de la simulación por el método de elementos finitos.

El estudio se realiza tratando de usar el menor número de simplificaciones posible y teniendo un gran control sobre los parámetros más importantes en el método de los elementos finitos, con el objetivo de alcanzar una correcta simulación.

El uso del programa de simulación ANSYS en su versión clásica, genera al principio problemas de adaptación debido a su interfaz menos intuitiva, pero finalmente se revela como una gran herramienta a la hora de realizar simulaciones donde el usuario es capaz de tener control sobre variables que en otros programas se generan de forma automática. Esto ha permitido obtener un mayor conocimiento y comprensión del método y de cómo este trabaja, lo que hace que al final puedan detectarse fallos o comparar diferentes disposiciones de restricciones y cargas.



Esta búsqueda iterativa de la solución más adecuada ha permitido también obtener un mayor conocimiento en lo relativo a las deformaciones producidas por diferentes situaciones dinámicas, cómo trabaja el chasis o cuáles son las zonas más problemáticas, han sido algunos de los conceptos adquiridos durante la realización de este proyecto. Esto hace que se tenga ahora una visión más acertada en este campo y aporta la capacidad de poder realizar las simulaciones pertinentes de distintos elementos mecánicos, lo que sin duda será de gran ayuda en el futuro profesional.

Se han completado así los conocimientos aportados en el grado en materias como elasticidad, resistencia de materiales, mecánica; permitiendo introducir esos conceptos teóricos en una situación práctica. Todo el trabajo desarrollado permite tener una experiencia en el campo de la ingeniería de proyectos, acercando el trabajo continuo necesario para obtener finalmente el resultado requerido.



9. Propuestas de mejora y futuras líneas de trabajo.

Se han introducido y resuelto las diferentes simulaciones que se han llevado a cabo sobre el chasis, y a su vez se han comentado y analizado los resultados obtenidos, además se ha presentado un apartado con los principales pasos para la fabricación del chasis y se han llevado a cabo una serie de conclusiones. Una vez finalizados estos apartados existen varias posibilidades que han de ser comentadas, enfocadas a mejorar o complementar el trabajo realizado.

El modelo que se ha realizado, si bien presenta una serie de simplificaciones necesarias para la simulación, ofrece una buena base sobre la que seguir trabajando de cara a afinar los resultados o incluir nuevas y más complejas simulaciones. Al tratarse de un modelo real, las mejoras que se pueden llevar a cabo son limitadas y en general están relacionadas con un mayor estudio de la estructura.

Existen varios campos donde se pueden realizar mejoras como son la modelización de más elementos, el estudio de las soldaduras o propuestas de aumento de rigidez.

En primer lugar se puede mejorar y completar el chasis del que se parte, mediante la modelización de elementos como los brazos de suspensión delanteros y traseros. La representación de estos se haría mediante elementos BEAM, más sencillos de representar que los SHELL. No obstante, el problema asociado a la representación de los brazos de suspensión es conocer sus medidas e introducirlas correctamente en el modelo, esta tarea es compleja pero eliminaría los mencionados problemas a la hora de disponer las restricciones en los ejes. Mientras que las restricciones verticales propias de la suspensión seguirían ocupando la posición actual, las restricciones longitudinales podrían ser colocadas en el buje de la rueda, simulando de manera más real las diferentes situaciones.

Otro aspecto en el que se podría realizar una mejora global, sería el estudio de las soldaduras en las zonas críticas. Se podría conocer las sollicitaciones a las que están sometidos los diferentes cordones de soldadura y actuar sobre las zonas más críticas incluyendo por ejemplo elementos de refuerzo. Este estudio sería llevado a cabo en las zonas más críticas del chasis, pues es necesaria la representación en elemento SOLID de la parte de la estructura que se pretenda estudiar.

Un campo en el cual se pueden obtener mejores resultados es el de la rigidez torsional. Aunque como se ha comentado los valores de rigidez torsional son difícilmente comparables debido a la disparidad de simulaciones que pueden llevarse a cabo, sí se pueden efectuar mejoras sustanciales de esta. Un ejemplo de mejora consistiría en modelizar los anclajes del motor y el propio motor para considerarlo en el análisis, con lo que se conseguiría una mejora inmediata de la respuesta torsional.



Existe la posibilidad de realizar una búsqueda más avanzada y detallada de los materiales que pueden ser usados para la fabricación del chasis. Se puede avanzar hacia aceros más ligeros o con mejor soldabilidad, o bien proponer la introducción de nuevos materiales en partes concretas del chasis. De este último modo se podría conseguir una mejora sustancial de peso, habiendo estudiado las solicitaciones presentes en cada zona para escoger la más adecuada.

Avanzar en la modelización del resto de componentes del vehículo también podría ser una futura vía de trabajo. Por ejemplo realizar la modelización de la suspensión y estudiar su comportamiento para así poder realizar mejoras sobre su geometría, dureza de muelles etc. sería una posibilidad que podría ser llevada a cabo.

Si se pretendiera enfocar un futuro trabajo que hiciera mayor hincapié en el mundo de la competición, se podría llevar a cabo la realización y el estudio de una estructura antivuelco que cumpla con las normativas vigentes. Sobre este campo las posibilidades de ampliación son enormes, pudiendo incluso realizar un proyecto completo de preparación para una determinada competición, y finalmente comparar los datos del vehículo original con el mejorado.

Por último una vez ha sido estudiado en la presente memoria el comportamiento dinámico de un chasis tubular, se barajaría la opción de realizar un estudio sobre un chasis autoportante como el presente en la mayoría de vehículos de la actualidad.



10. Referencias bibliográficas.

Páginas web consultadas.

- [1] <http://www.motorpasionfuturo.com/mecanica-eficiente/tecnologia-del-transporte-materiales-ligeros-ii-los-materiales-no-metalicos>. Fecha de última consulta 8 julio 2015.
- [2] <http://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/111113/tipos-de-aceros-en-las-carrocerias/> Fecha de última consulta 9 julio 2015.
- [3] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4783/fichero/Vol+I.+CAP%CDTULOS%252F3.+M%E9todos+Num%E9ricos.+El+M.E.F.+y+Ansys.pdf> Fecha de última consulta 9 julio 2015
- [4] <http://uk.caterhamcars.com/cars/seven-360>. Fecha de última consulta 9 julio 2015.
- [5] https://engineering.purdue.edu/~abe601/ansys/fatigue_tutorial_v81.pdf. Fecha de última consulta 28 julio 2015
- [6] http://www.hsmwire.com/New%2520PDFs/ST-52DIN2391_2391.pdf. Fecha de última consulta 1 Agosto 2015.
- [7] <http://www.danobatbandsaws.com> Fecha de última consulta 27 agosto 2015.
- [8] http://www.metalactual.com/revista/29/soladura_doblado_tubos.pdf Fecha de última consulta 28 de agosto 2015.
- [9] <http://www.carandclassic.co.uk/car/C149979> Fecha de última consulta 7 julio 2015.
- [10] <http://eafdelautomovil.blogspot.com.es/2013/01/tipos-de-carroceria.html> Fecha de última consulta 7 julio 2015.
- [11] <http://motorhistoria.blogspot.com.es/2011/06/mercedes-benz-300-sl-alas-de-gaviota.html> Fecha de última consulta 8 julio 2015.
- [12] <http://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/140645/la-tecnologia-de-construccion-ligera-de-audi-cumple-20-anos-con-750-000-vehiculos-fabricados/> Fecha de última consulta 8 julio 2015.
- [13] <http://periodismodelmotor.com/porsche-918-spyder/44637/porsche-918-spyder-chasis/> Fecha de última consulta 8 julio 2015.
- [14] <http://www.e30tech.com/forum/showthread.php?t=103875> Fecha de última consulta 27 agosto 2015.
- [15] <http://throwate.blogspot.com.es/2013/10/carrocerias-de-vehiculos-tipos-y.html> Fecha de última consulta 23 junio 2015.
- [16] <http://trackdaycars.freeforums.org/faq-y-galeria-del-proyecto-lcct-t624.html> Fecha de última consulta 23 de junio 2015.



Bibliografía consultada.

- [17] *Sobre los estudios y la profesión de ingeniería mecánica*. Informe para la Asociación Española de Ingeniería Mecánica (AEIM). Rafael Avilés, Juan Ignacio Cuadrado.
- [18] Scharff Robert, Duffi James E., *Carrocerías del Automóvil, Procesos de Reparación* – Editorial: Paraninfo (1999) - ISBN: 8428325049 - ISBN 13: 9788428325042
- [19] José Font Mezquita, Juan F. Dols Ruiz, *Tratado sobre automóviles Tomo1, Tecnologías del automóvil*.-Editorial: Universidad Politécnica de Valencia-ISBN:84-9705-600-0
- [20] Herb Adams, *Chassis Engineering: Chassis Design, Building & Tuning for High Performance Handling*, November 19, 1992, ISBN: 978-1557880550
- [21] Pilar Ariza Moreno, Andrés Saéz Pérez, *Método de los elementos finitos: introducción a ANSYS*. Universidad de Sevilla. ISBN:9788447205554
- [22] Apuntes y transparencias de la asignatura Tecnologías de fabricación y Tecnologías de Máquinas. Universidad Carlos III de Madrid.
- [23] P.K. Mallick, *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. Woodhead Publishing 2010, ISBN 978-1-84569-463-0
- [24] Apuntes y transparencias de la asignatura Tecnología de Materiales. Universidad Carlos III de Madrid.
- [25] Proyecto fin de carrera. Diseño de chasis para vehículo FSAE. Antonio García Álvarez. Universidad Carlos III de Madrid.
- [26] Proyecto fin de máster. Diseño de la estructura del CAT-01. Carlos Sierra Sánchez. Universidad Politécnica de Madrid.
- [27] Vicente Díaz López, Ester Olmeda Santamaría, Antonio Gauchía Babé, Daniel García-Pozuelo Ramos, Beatriz López Boada, M^a Jesús López Boada, Julio Fuentes Losa. *Automóviles y ferrocarriles*. UNED 2012. ISBN:978-84-362-6568-2
- [28] Apuntes y transparencias de la asignatura Elasticidad y Resistencia de Materiales. Universidad Carlos III de Madrid.



11. Anexos.

10.1. Anexo I: Planos del chasis estudiado.

