DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA SAE

Autor: Calvo Rodríguez, Arturo.

Director: Carnicero López, Alberto.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad pontificia de comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto que se presenta a continuación forma parte de una serie de documentos que cubren la fabricación y estudio de los distintos sectores que componen un monoplaza. En este proyecto se describen cuáles han sido los pasos dados para alcanzar el diseño final de un chasis adaptado a la fórmula SAE y se presentan los resultados obtenidos al analizarlo.

En primer lugar se realizó un estudio del estado del arte, se determinaron los aspectos fundamentales a tener en cuenta en el diseño y se estudiaron las distintas tendencias en los chasis actuales. Al mismo tiempo se realizó un estudio profundo de las normas de la fórmula SAE. La seguridad es uno de los principales requisitos ya que se trata de una competición estudiantil, y por lo tanto son muchas las restricciones a las que el chasis está sometido por parte de la organización para garantizar la seguridad de los participantes.

Para realizar el diseño del chasis se partió de un modelo base formado por las partes de la estructura que se encontraban normalizadas. Una vez cumplida la normativa se introdujeron los cambios en el diseño, probando nuevas ideas y analizando los resultados obtenidos.

Para que el proceso de diseño se desarrolle de forma satisfactoria es importante que introducir un cambio y analizarlo no suponga demasiado tiempo ya que el número de modificaciones a analizar será importante. Bajo esa idea se realizó un modelado en ANSYS que permitiese estudiar el prototipo y obtener resultados de una forma rápida y utilizando la mayor cantidad de parámetros posibles. El análisis en ANSYS se estructuró de la siguiente forma:

- Un fichero independiente contiene la información sobre la geometría del chasis de forma parametrizada, con lo que cualquier cambio en el diseño del prototipo se realizará en este fichero sin tener que modificar el resto.

- Se utilizan parámetros para que se puedan evaluar los cambios en el diseño simplemente modificando los datos de entrada. Son parámetros de diseño los siguientes: diámetro y espesor de los distintos tubos, características mecánicas del material, masa del piloto, las distintas masas del vehículo tales como el motor o el carenado, las constantes del muelle K y del amortiguador C en el modelo de las suspensiones, así como la masa de las ruedas. De este modo cualquier modificación se lleva a cabo de forma casi inmediata.

El siguiente paso fue el de realizar el resto de ficheros que simulan las distintas pruebas a las que se somete el chasis para obtener resultados y analizar el comportamiento del prototipo. Se modelaron distintas pruebas centrándose en dos aspectos fundamentales:

- Un conjunto de pruebas analizan el comportamiento del chasis cuando está sometido a condiciones normales de funcionamiento y/o exigidas por la organización tales como una entrada en curva, frenada, aceleración brusca o remolcado por grúa. En estas pruebas se introducen como parámetros de diseño las aceleraciones máximas alcanzadas en cada caso.

- La otra prueba es la de rigidez a torsión. En esta prueba se somete al chasis a un par para comprobar la resistencia a torsión del chasis, este parámetro ayuda a mejorar el comportamiento del vehículo en pista. Si bien dos chasis distintos pueden soportar con facilidad los esfuerzos a los que son sometidos en pista, el que cuente con una rigidez mayor será el que ofrezca al vehículo un comportamiento mejor, por ejemplo estabilidad a la entrada de una curva.

El otro parámetro fundamental en el comportamiento del chasis es su peso, la optimización realizada en este proyecto mediante los distintos cambios de diseño estaba orientada a encontrar el punto de equilibrio entre peso, rigidez y coste, los parámetros fundamentales por los que un chasis es evaluado. Esta optimización se ha realizado mediante distintos cambios analizando los resultados del modelo tales como los estados de tensión ante distintos esfuerzos.

En lo referente a la rigidez del diseño se estableció un objetivo inicial bastante alto, las pretensiones iniciales eran las de obtener un diseño que aportase una rigidez similar al de los diseños de las universidades con más experiencia. Los mejores chasis tubulares presentados en años anteriores en esta competición alcanzaban los 3000 N·m/grado, que fue el objetivo inicial buscado durante el desarrollo de este proyecto. Ya que la competición premia (en cuanto a puntos) en mayor medida los prototipos fiables y seguros, se apostó por la rigidez otorgándole más importancia que al peso.

El objetivo inicial fijado en cuanto al peso fue de 40 kg. Mediante el estudio del estado del arte se obtuvo la información de que las universidades con más experiencia habían obtenido diseños de 27 kg, con lo que 40 kg parecía un peso adecuado dado el alto grado de rigidez deseado que perjudicaría sin duda este factor.

En cuanto al coste los problemas se eliminaron inicialmente al optar por un diseño de chasis tubular soldado frente al monocasco de fibra de carbono (altos coste por la tecnología necesaria no disponible en la universidad).

Tras las diferentes modificaciones se obtuvo el diseño final. A continuación se presentan los resultados obtenidos, superiores en gran medida a los objetivos iniciales:

- El coche presenta respuestas satisfactorias ante las distintas pruebas del comportamiento en pista deformándose en el caso más desfavorable 0.5mm, en ningún caso una deformación importante que pueda comprometer a otras partes del vehículo.

- La rigidez obtenida en el modelo es de 3061.2 N·m/grado, superior a la fijada inicialmente, con lo que se cumple en gran medida con la filosofía del proyecto, la fiabilidad. El peso del diseño final es de 31.55 kg reduciendo en casi un 25% el objetivo fijado inicialmente.

Las conclusiones son que el diseño final alcanzado presenta unas condiciones muy favorables para el comportamiento en pista del prototipo y para proporcionar una alta fiabilidad, con un peso de tan solo 4 kg más que las universidades con mayor experiencia en este tipo de competición. Por todo ello se han cumplido las expectativas iniciales y se han fijado las bases y marcado las futuras líneas de trabajo para seguir mejorando el modelo.

DESIGN AND ANALYSIS OF A CHASSIS FOR A PROTOTYPE OF FORMULA SAE

With this Project the University has started a new trend in the designing and analysis of the automotive industry. The steps of this analysis are described and the final design of the chassis with the results are presented in this document.

At the beginning a study of the state of the art was done, this way it was possible to describe the new trends and to set the main parameters of the structure. At the same time a deep study of the SAE rules was done. Safety is one of the most important topics in this rules because is a student competition, that is why the chassis is under a lot of constraints.

The initial model of the structure was made up of the different parts of the chassis under constraints. After that, the changes began aimed at getting better results and improving the design.

For succeed in the process is important that to introduce a change and to analyze it does not suppose too much time, because this has to be done many times. With this idea the development of the chassis began. The structure of the analysis was done using different parameters for helping that changes could be introduced in the design. The analysis in ANSYS was constructed of the following form:

- An independent file contains the information about the geometry of the chassis based in main parameters, with what any change in the design of the prototype will be realized in this file without having to modify the rest.

- Parameters are in use in order that the changes could be evaluated in the design simply modifying the information of entry. The following ones are design parameters: diameter and thickness of the different pipes, mechanical characteristics of the material, mass of the pilot, the such different masses of the vehicle like the engine or the aerodynamic body, the constants of the spring K and of the shock absorber C in the model of the suspensions, as well as the mass of the wheels. Thus any modification is carried out immediately.

The following step was carrying out the ANSYS documents that simulate the conditions of a normal day of competition. The different tests were focused on two main concepts:

- A set of tests analyze the behaviour of the chassis when it is under normal conditions of racing and/or demanded by the organization such as a curve, braking, acceleration or towed by a breakdown van. In these tests the inputs (design parameters) are the maximum accelerations reached in every case.

- The other test is the rigidity. The improvement of this parameter helps to improve the behaviour of the vehicle in race. Though two different chassis can support with facility the efforts to which they are subjected in race, which possesses a higher rigidity will be the one that offers to the vehicle a better behaviour, for example stability at the entry of a curve.

The other fundamental parameter that describes the behaviour of the chassis is the weight, the optimization carried out in this project tried to focus the different changes of design in order to find the point of balance between weight, inflexibility and cost, the fundamental parameters by which a chassis is evaluated. This optimization has been realized implementing changes and analyzing the results of the model as the tension states under different efforts.

In what concerns the rigidity of the model there was established an initial high enough aim, the goal was reaching the rigidity of the chassis of the most experimented universities, because that will provide the structure a really good trustworthy. The best tubular chassis presented in the previous years in this competition were reaching 3000 N·m/grado, this was the initial aim looked during the development of this project. The competition rewards (points) in major measure the trustworthy and reliability. For all of this, the rigidity was more important in the development of the project than the weight.

The initial aim fixed as for the weight was of 40 kg. By means of the study of the state of the art the information of the universities with more experience which had obtained designs of 27 kg was obtained. The initial weight target was high enough because of the high aim established in the rigidity would harm the optimization of the weight.

The problem of the cost was eliminated at the beginning when the design of tubular chassis welded was chosen instead of the carbon fibre monocoque (high cost because of the need of high technology not available in the university).

After the different modifications the final design was obtained. The final results are showed below, these results were better than the initial aims established:

- The car presents a satisfactory behaviour in the different tests of the racing conditions, being deformed in the most unfavourable case 0.5mm, in no case an important deformation that could damage to other parts of the vehicle.

- The rigidity obtained in the model is 3061.2 N·m/grado, higher to the target fixed initially, that connects with the philosophy of the project, the reliability.

- The weight of the final design is of 31.55 kg reducing in almost 25 % the aim fixed initially.

The conclusions are that the final reached design presents a few very favourable conditions for the behaviour in race of the prototype and to provide a high reliability, with a weight of only 4 kg more than the universities with major experience in this type of competition. Because all of this the initial expectations have been fulfilled and the bases have been fixed and the future lines of work for improving the model have been established.

Índice

1 OBJETIVO 2

2 EL CHASIS 5

2.1 Introducción 5

2.2 Historia del chasis 5

2.3 Tipos de chasis en la actualidad 6

2.4 El chasis en los automóviles de competición 7

2.5 Chasis en la fórmula SAE 8

3 RESTRICCIONES QUE AFECTAN AL CHASIS EN LA FÓRMULA SAE 13

3.1 Introducción 13

3.2 Especificaciones de la organización 13

3.3 Espesores de protecciones 14

3.4 Arcos de seguridad 16

3.5 Plano frontal encargado de proteger los pies del piloto 18

3.6 Protección de impactos laterales 18

3.7 Otras consideraciones 19

3.8 Cargas de competición 19

4 CARGAS EJERCIDAS SOBRE EL CHASIS POR OTRAS PARTES DEL VEHÍCULO 22

4.1 Introducción 22

4.2 Las suspensiones 22

4.3 Masas del vehículo 23

4.4 Carenado 24

5 DISEÑO DE UN CHASIS TUBULAR 26

5.1 Introducción 26

5.2 Criterios de rigidez 26

5.2.1 Rigidez a flexión *27*

5.2.2 Rigidez torsional *28*

5.3 Distribución de masas 29

5.4 Criterios sobre el espacio 29

5.5 Criterios sobre costes 30

6 ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL MODELO 32

6.1 Introducción 32

6.2 Obtención de un modelo base 32

6.2.1 Comprobación de la altura de los arcos de seguridad 37
6.3 Pruebas de diseño 39
6.3.1 Remolque 40
6.3.2 Frenada 41
6.3.3 Aceleración 41
6.3.4 Curva 42
6.3.5 Resistencia a torsión 42
7 RESULTADOS 45
7.1 Introducción 45
7.2 Resultados del modelo base 45
7.2.1 Remolque 45
7.2.2 Frenada 47
7.2.3 Aceleración 48
7.2.4 Curva 49
7.2.5 Torsión 49
7.2.6 Conclusión 51
7.3 Diseño final, análisis de los cambios 52
7.3.1 Side pods 52
7.3.2 Cruz 54
7.3.3 Secciones 54
7.3.4 Arco principal 55
7.4 Resultados del diseño final 56
7.4.1 Remolque 56
7.4.2 Frenada 57
7.4.3 Aceleración 57
7.4.4 Curva 58
7.4.5 Torsión 59
7.4.6 Conclusiones 61
7.5 Primer chasis de la universidad 61
8 ASPECTOS DE FABRICACIÓN .... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
8.1 Introducción 64
8.2 Tipos de acero 64
8.2.1 Acero conformado en caliente 64
8.2.2 Acero conformado en frío o tibio 65
8.2.3 Propiedades mecánicas y físicas 65
8.2.4 Soldabilidad del acero 66
8.3 Corte del material 67

8.4 Métodos de curvado 68
8.4.1 Curvado en frío por presión 68
8.4.2 Curvado en frío mediante caja 69
8.4.3 Curvado por rodillos giratorios 70
8.4.4 Curvado por cortes a inglete 70
8.5 Métodos de soldadura 71
8.5.1 Soldadura por arco manual con electrodos revestidos (Shield Metal Arc Welding. SMAW). 71
8.5.2 Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible (GMAW). 72
8.5.3 Soldadura con núcleo de fundente (FCAW) 74
8.6 Punteado de la soldadura 74
8.7 Tratamientos térmicos previos y posteriores a la soldadura 75
8.8 Defectología de las uniones soldadas 75
8.8.1 Fisuras 75
8.8.2 Cavidades y porosidad 76
8.8.3 Inclusiones sólidas 77
8.8.4 Falta de fusión 77
8.8.5 Falta de penetración 78
8.8.6 Defectos de forma 78
8.9 Inspección de las soldaduras 78
8.9.1 Inspección visual 79
8.9.2 Inspección mediante partículas magnéticas 79
8.9.3 Inspección mediante líquidos penetrantes 80
8.9.4 Inspección por ultrasonidos 80
8.9.5 Inspección radiográfica 80
8.10 Uniones soldadas 80
8.11 Montaje 81

9 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO 84
9.1 Introducción 84
9.2 Optimización peso-rigidez 84
9.3 Mejora del modelo para facilitar la fabricación 85
9.4 Modelo con suspensiones 86
9.5 Mejora del mallado en ANSYS 87

A CAMBIOS EN EL DISEÑO 90
A.1 Introducción 90
A.2 Pasos intermedios en el diseño que no ofrecieron resultados aceptables 90
A.2.1 Side pods 90

A.2.2 Cruz de refuerzo inferior *92*

I BIBLIOGRAFÍA.....95

Índice de Figuras

Figura 1. Chasis de fibra de carbono del Porsche Carrera GT, 100 kg [W 4]. 6
Figura 2. Space Frame de aluminio, Audi A8. [W 8]. 7
Figura 3. Monocasco de fibra de carbono de un Fórmula 1. [W 9]. 7
Figura 4. Chasis tubular como refuerzo del vehículo. [Unzu02]. 8
Figura 5. Chasis de fibra de carbono de un fórmula SAE. [W 10]. 8
Figura 6. Chasis tubular de acero con uniones soldadas. [W 1]. 9
Figura 7. Ejemplo de utilización de distintas geometrías de tubos en el chasis. [W 11]. 10
Figura 8. Ejemplo de utilización de varios materiales en un mismo chasis. [W 11]. 10
Figura 9. Representación del piloto. 14
Figura 10. **:** Croquis de disposición de los arcos de seguridad. [Norm05]. 16
Figura 11. Estructura de seguridad lateral. [Norm05]. 19
Figura 12. Prueba de inclinación. [W 1]. 20
Figura 13. Imagen de la unión de rueda y chasis. [W 12]. 22
Figura 14. Imagen de chasis tubular y motor. 23
Figura 15. Side pod. Renault F1. [W 14]. 24
Figura 16. Ejemplo de estructura de side pods aplicable a SAE. [W 14]. 24
Figura 17. Representación de la flexión del chasis. 27
Figura 18. Esquema del ensayo a torsión. 28
Figura 19. Croquis del piloto. 30
Figura 20. Tubos especificados en las normas. 32
Figura 21. Croquis del motor. 33
Figura 22. Detalle de la parte trasera del chasis base. 34
Figura 23.Diseño base de la parte delantera chasis. 36
Figura 24. Croquis de los arcos de seguridad y hombros del piloto. 38
Figura 25. Esquema de comprobación de la altura del piloto. 38
Figura 26. Muestra de la simulación estructural adoptada. 40
Figura 27. Grados de libertad de los apoyos en la aceleración. 42
Figura 28. Desplazamientos del chasis al someterlo a la prueba de remolque. 45
Figura 29. Deformación en el eje Y. 46
Figura 30. Tensión máxima de Von Mises en cada punto. 47
Figura 31. Desplazamiento total en cada punto. 47
Figura 32.Tensión máxima de Von Mises en cada punto en la frenada. 48
Figura 33. Tensión máxima de Von Mises en cada punto en la prueba de aceleración. 49
Figura 34. Desplazamientos en el eje Z en la prueba a torsión. 50
Figura 35. Tensión máxima de Von Mises en cada punto (torsión chasis base). 51

Figura 36. Modelo chasis final. 52
Figura 37. Detalle de los side pods utilizados. 53
Figura 38. Detalle de la cruz de refuerzo en la parte inferior del chasis. 54
Figura 39. Representación de los ejes en una corona circular. 55
Figura 40. Tensión de Von Mises máxima en cada punto (chasis final). 56
Figura 41. Desplazamientos totales en cada punto en la frenada (chasis final). 57
Figura 42. Desplazamiento total de cada punto en la aceleración (chasis final). 58
Figura 43. Tensión máxima de Von Mises en cada punto en curva (chasis final). 59
Figura 44. Tensión de Von Mises máxima en cada punto, torsión (chasis final). 60
Figura 45. Desplazamientos en el eje z, torsión (chasis final). 60
Figura 46. Unión de tubos con corte plano. 68
Figura 47. Esquema del curvado por presión. 69
Figura 48. Esquema de curvado en frío con caja. 69
Figura 49. Esquema de curvado en frío con rodillos giratorios. 70
Figura 50. Curva mediante corte a inglete. 70
Figura 51. Radiografía de soldaduras con distintos defectos de fisuras [Rein86]. 76
Figura 52. Radiografía mostrando las inclusiones en la soldadura [Rein86]. 77
Figura 53.Esquema del proceso de inspección por partículas magnéticas. 80
Figura 54. Esquema de una pletina en una unión indirecta. 81
Figura 55. Bastidor de madera de la universidad de Montreal. 81
Figura 56. Defecto en la soldadura entre tubos. 86
Figura 57. Utilización de una sección rectangular facilitando la fabricación. 86
Figura 58. Comparación entre dos tipos de mallado. 88
Figura 59. Modelo de side pods. 90
Figura 60. Desplazamiento en el eje Z, prueba de torsión. 91
Figura 61. Modelo reforzado de side pods. 92
Figura 62. Segunda cruz de refuerzo. 92

Índice de Tablas

Tabla 1. Espesores de acero en protecciones. [Norm05]. 15
Tabla 2. Espesores alternativos de acero según [Norm05]. 15
Tabla 3. Espesores de aluminio según [Norm05]. 16
Tabla 4.Dimensiones de tubos con perfil tubular del catálogo de condesa [W 17]. 36
Tabla 5. Dimensiones de sección iniciales en el chasis base. 37
Tabla 6. Secciones del modelo final. 54
Tabla 7. Tipos de acero y límites elásticos según EN 10210, parte 1. 65
Tabla 8. Propiedades físicas de los aceros estructurales. 66
Tabla 9. Diferencias entre MIG y MAG. 74

1

Objetivo

1 Objetivo

El proyecto fin de carrera que se presenta a continuación tiene un objetivo final claro, la obtención del diseño de un chasis válido para competir en la fórmula SAE, así como el estudio de su respuesta ante distintas cargas y/o pruebas a las que será sometido por la organización.

Este es el primer proyecto que se realiza en la universidad sobre este tema, y se pretende que con la realización de proyectos sobre la fórmula SAE de este año se haya iniciado un movimiento en el centro en torno al automovilismo. La intención inicial de los promotores de esta idea era la de crear un área de proyectos acerca de la automoción con una aplicación práctica inmediata, la fabricación de un monoplaza en la universidad. Se pretende que este conjunto de proyectos tenga continuidad en el tiempo mejorando cada año los principales sectores en los que se ha dividido el diseño del automóvil.

En concreto, en el diseño del chasis se buscaba un modelo que sobre todo fuese fiable. El trabajo del desarrollo y optimización de la estructura se prolongará a lo largo de varios años, con lo que con este primer proyecto se buscaba fijar una base sólida sobre la que seguir progresando, un comienzo en el que se diese el primer paso y se marcarse la dirección a seguir. No se pretendía obtener un chasis revolucionario ya que, al carecer de la experiencia necesaria, esto podría causar que se avanzase en un camino equivocado teniendo que dar marcha atrás en un futuro, o necesitando incluso comenzar de nuevo. Por lo tanto las características principales que se marcaron como objetivos al comenzar el trabajo eran las de elaborar un diseño válido, que cumpliese la normativa, un diseño fiable sobre el cuál ir acumulando experiencia y una base sobre la que poner en práctica nuevas ideas.

La filosofía del grupo de proyectos fue la de realizar un conjunto de diseños compatibles entre sí, y que cada uno en su sector, alcanzase una serie de objetivos básicos para el funcionamiento correcto del conjunto. Se pretendía comenzar la difícil tarea de diseñar un monoplaza de competición, fijando el primer objetivo en que el automóvil anduviese y utilizando el resto de tiempo disponible en preparar el camino, para que en años posteriores fuese el que más corriese.

Al final del año y con el término de este proyecto se debía haber alcanzado un diseño del chasis y haber realizado un análisis de la respuesta del mismo cuando se somete a varias pruebas.

Por supuesto una vez alcanzado el diseño base, objetivo principal del proyecto, se dispondría del tiempo restante para mejorar e introducir nuevas ideas que mejorasen los parámetros funcionales del chasis.

Concretando, en el diseño del chasis se fijó el objetivo inicial de alcanzar una rigidez torsional cercana a los 3000 N·m/grado, con un peso inferior a los 40 kg. Una vez alcanzado este objetivo será el momento de comprobar que la deformación sufrida por la estructura al someterse a distintas simulaciones, que representarán las cargas del paso por la pista, no es mayor que la deseada.

Los pasos dados hasta alcanzar el chasis final y la exposición del método de trabajo utilizado se encuentran en los capítulos que se presentan a continuación.

2

El chasis

2 El chasis

2.1 Introducción

El chasis de un vehículo es la estructura en la que se montan y sujetan los demás componentes. Soporta sus cargas y ofrece una resistente protección en caso de accidente.

En la construcción de un chasis existen tres parámetros fundamentales:

- Ligereza. Se puede mejorar mucho la potencia y rendimiento de un motor, pero debe ir acompañado de un chasis ligero, en otro caso se está desperdiciando potencia. Por otro lado, el chasis es uno de los elementos más pesados del vehículo, y un aumento de ligereza proporciona una disminución de consumo importante.
- Rigidez. Sin duda éste es el parámetro fundamental de funcionamiento del chasis. Es importante conseguir una estructura resistente a impactos para la protección del piloto, siendo la rigidez el factor del chasis que más influye el comportamiento del vehículo en pista.
- Economía. La fabricación debe ser económicamente viable. Los chasis con presupuestos elevados son únicamente utilizados en series cortas de vehículos de gama alta.

2.2 Historia del chasis

En el comienzo de la industria del automóvil (Karl Benz 1885) con motores de combustión interna, el diseño de la estructura del chasis se consideraba un factor secundario, debido a las bajas potencias de los automóviles de la época. Poco a poco y con el desarrollo de motores más potentes, el estudio de la estructura principal del coche toma una vital importancia en la evolución del automóvil. Este breve paso por la historia ayudará a entender la tendencia actual en el diseño de chasis y carrocerías tanto en los coches de serie como en los automóviles de competición.

Al comienzo y hasta 1910, tanto la estructura como carrocería de los coches de la época eran de madera, muy similares a los coches de caballos. A partir de 1910 se comienza a trabajar con acero y aluminio en las estructuras de coches. Es en esto años cuando se empieza a evolucionar buscando una mayor rigidez torsional del chasis. En 1934 Citroën es la primera marca que introduce el monocasco en un modelo fabricado en serie (Traction avant). Tras la Segunda Guerra Mundial y con una

gran carencia de acero en Europa, se desarrollan aleaciones de aluminio y se aumenta su uso en los chasis de la época. En 1953 Chevrolet, saca al mercado su Corvette, con un chasis tubular y carrocería completa de fibra de vidrio. Durante los años sesenta, mientras que en Estados Unidos se seguía utilizando el chasis y montado sobre él la carrocería, en Europa se empieza a investigar sobre materiales compuestos, y cada vez más se busca un diseño integrado de carrocería y chasis. Con la crisis energética a finales de los sesenta, las compañías dirigen sus esfuerzos a la reducción de peso, llegando en algunos casos a rebajarlo en 500 kg. En 1979 Ford termina su primer vehículo fabricado totalmente en fibra de carbono. A partir de estos años el objetivo de las empresas es mejorar las ideas existentes para reducir peso, la meta ahora es reducir consumos y emisiones.

2.3 Tipos de chasis en la actualidad

El modelo de mayor implantación en la actualidad, es el que integra chasis y carrocería, el llamado monocasco. Puede encontrarse de distintos materiales, como acero, aluminio o materiales compuestos (Figura 1), dándose éstos últimos sólo en algunos coches de lujo debido a su alto coste y en coches de competición como los fórmula 1. Sin duda el modelo más utilizado en la actualidad es el monocasco de acero.

Figura 1. Chasis de fibra de carbono del Porsche Carrera GT, 100 kg [W 4].

Otro tipo de chasis desarrollado en la actualidad, es el basado en la tecnología llamada Space Frame (Figura 2). Este tipo de estudio se basa en una estructura teórica de enlaces infinitamente fuertes unidos en nodos libres para rotar. Es una estructura que hace la función de soportar y de aportar rigidez al vehículo, a la vez que protege a los ocupantes. La estructura forma un marco, en el que luego se fijan los paneles. Éstos tienen también una función activa en el soporte de las cargas del coche. Audi es una de las marcas que más ha desarrollado esta tecnología, fabricando

muchos de sus modelos en aluminio, reduciendo en algunos casos el peso en un 40%, con las ventajas que eso conlleva de maniobrabilidad y consumo.

Figura 2. Space Frame de aluminio, Audi A8. [W 8].

2.4 El chasis en los automóviles de competición

Los chasis de competición son en su inmensa mayoría (siempre que el presupuesto y las normas lo permitan) monocascos de materiales compuestos. Éste es el caso de la Fórmula 1 (Figura 3) y de competiciones inferiores a ésta, pero similares en cuanto a diseño y funcionamiento del vehículo.

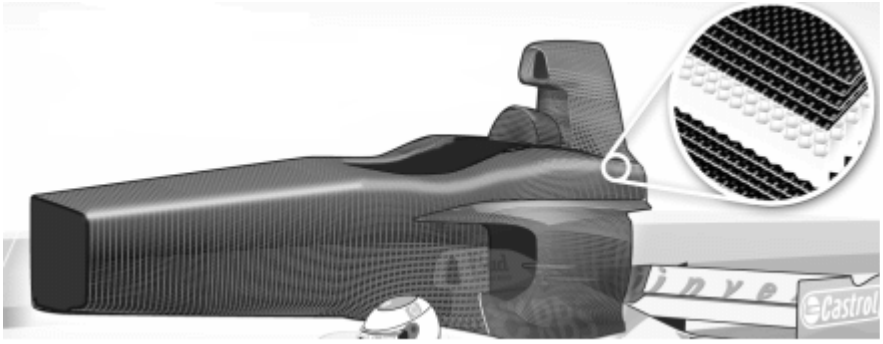


Figura 3. Monocasco de fibra de carbono de un Fórmula 1. [W 9].

En la Figura 3 se pueden observar las distintas capas de fibra carbono, con una interior de aluminio que aporta rigidez.

Si se observan competiciones de Rally o de fórmulas con un nivel inferior se utilizan en muchos casos chasis convencionales, y se refuerzan con estructuras internas tubulares, con protecciones más resistentes para vuelco o colisiones. Este es el caso que se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Chasis tubular como refuerzo del vehículo. [Unzu02].

2.5 Chasis en la fórmula SAE

En las competiciones de fórmula SAE, se encuentran diversos tipos de chasis. Las universidades que disponen de un presupuesto alto y que cuentan con una experiencia de varios años en competición optan en algunos casos por el monocasco de fibra de carbono. De todos modos, este tipo de chasis tiene una participación minoritaria en los monoplazas de esta competición.

Figura 5. Chasis de fibra de carbono de un fórmula SAE. [W 10].

Los equipos que tienen los recursos económicos y técnicos necesarios para fabricar este tipo de chasis tienen la ventaja de obtener una estructura muy resistente y con un comportamiento excelente en pista, ya que este tipo de estructuras ofrecen gran resistencia a torsión y su peso es menor que el de las estructuras de acero.

Por otro lado las estructuras más comunes en la fórmula SAE son las tubulares de acero, este tipo de estructuras ofrecen una buena respuesta a los esfuerzos aunque su principal inconveniente es el aumento del peso respecto a las anteriores con la ventaja de un coste mucho más reducido.

Como se presentará posteriormente, en el capítulo 3, los espesores de tubo de algunas partes de la estructura vienen especificados por la normativa SAE, así como la geometría de las protecciones del piloto.

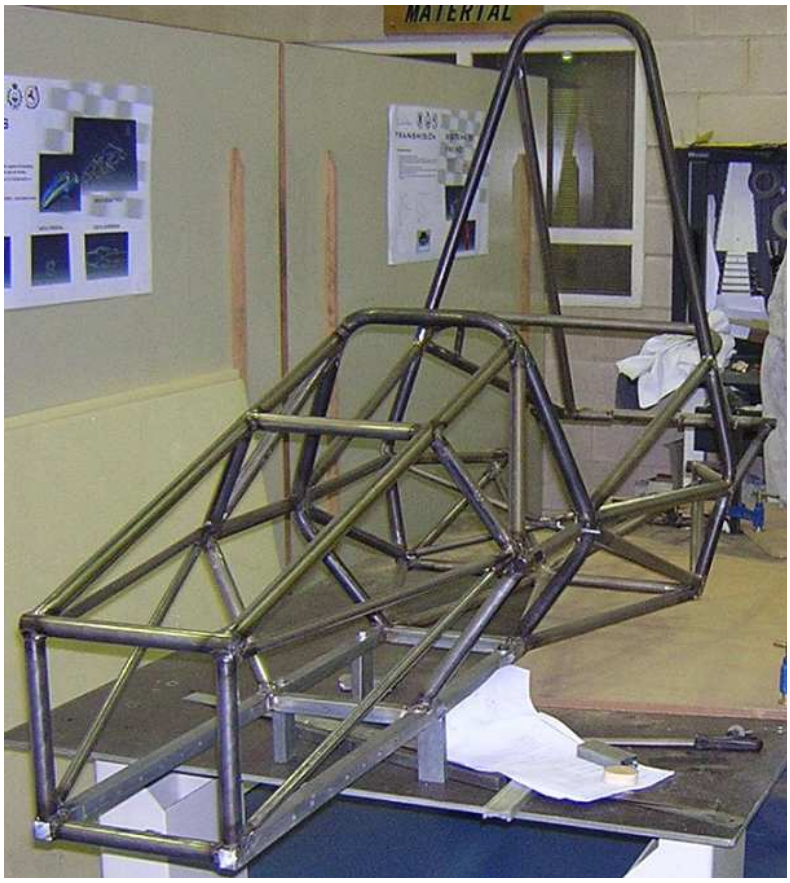


Figura 6. Chasis tubular de acero con uniones soldadas. [W 1].

Dentro de las estructuras de acero tubulares, la mayoría de ellas son soldadas (Figura 6), aunque existe la posibilidad de optar por uniones atornilladas en ciertas partes del chasis, pero normalmente los equipos no utilizan este tipo de uniones. Otra posibilidad a tener en cuenta es la opción de incluir partes de aluminio en el chasis con la ventaja de la reducción de peso que esto supone, aunque con los inconvenientes de incurrir en otro coste al incluir un nuevo material tanto en los costes como en el diseño.

Aunque la mayoría de los grupos se dedican al estudio de un chasis tubular en cuanto a la disposición y geometría de materiales, hay algunos equipos que han ido más allá utilizando tubos de secciones variadas, cuadradas, circulares y en algunos

casos chapas enfrentadas rellenas de ciertos materiales para conseguir siempre el mismo objetivo, mayor rigidez a torsión con el menor peso y coste posible.

Figura 7. Ejemplo de utilización de distintas geometrías de tubos en el chasis. [W 11].

Como se puede ver en la Figura 7 y Figura 8 hay bastantes posibilidades en lo que es refiere al diseño, este equipo realizó una combinación de acero, aluminio, fibra de carbono y una resina entre placas.

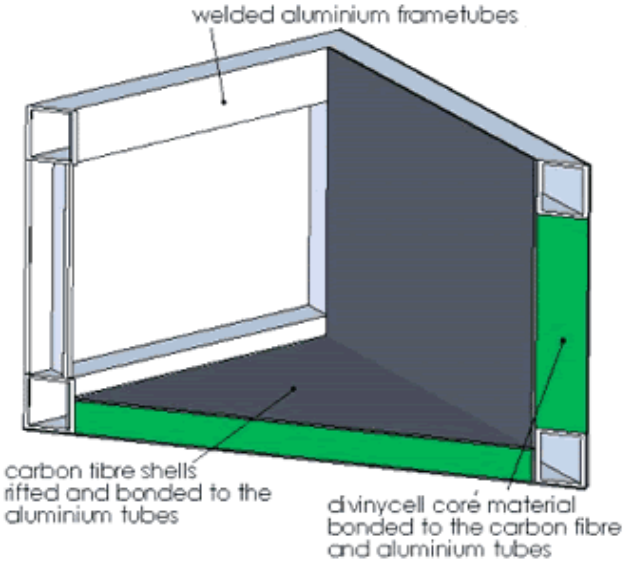


Figura 8. Ejemplo de utilización de varios materiales en un mismo chasis. [W 11].

Con esto se ha dado un repaso a los diseños que los equipos de fórmula SAE están desarrollando, de esta forma se adquiere una idea general de hacia que punto se enfocan los estudios de chasis en la fórmula SAE y las posibilidades que se barajan en esta competición.

Este proyecto, siendo pionero en la universidad se centrará en los chasis de acero tubulares, que con un coste mínimo tan buenos resultados están dando en esta competición, ganándola en ciertas ocasiones, coches con este tipo de chasis.

3

Restricciones que afectan al chasis en la fórmula SAE

3 Restricciones que afectan al chasis en la fórmula SAE

3.1 Introducción

Como en toda competición, en la fórmula SAE existen una serie de especificaciones que vienen dadas por parte de la organización. También hay cargas que derivan de las diferentes pruebas a las que el vehículo va a ser sometido, y que deben de tenerse en cuenta a la hora de abordar el problema de diseño del chasis. Estas cargas serán transmitidas al chasis por medio de los apoyos en los que se fijan las distintas partes que forman el coche.

3.2 Especificaciones de la organización

- La distancia mínima entre ejes o batalla, será de 1525 mm (midiendo esa distancia desde el centro del contacto de la rueda delantera con el suelo, al centro del contacto de la rueda trasera con el suelo, con las ruedas delanteras rectas).

- La vía (distancia entre ruedas del mismo eje) del vehículo más pequeña, no ha de ser en ningún caso inferior al 75% de la vía mayor.

- La distancia al suelo de la parte inferior del chasis ha de ser la suficiente para no contactar en ningún momento con la pista, o partes de ella (pianos…).

Para ello se deberá tener en cuenta que las ruedas han de ser de un diámetro superior a 203.2[1] mm (esta medida no tiene en cuenta el neumático).

- En la parte posterior del coche se debe facilitar un punto de enganche que debe soportar el peso del vehículo. Debe estar orientado perpendicularmente a la línea longitudinal del vehículo, y debe ser horizontal. Debe ser de forma tubular de un diámetro de 25.4 mm. La longitud debe ser mayor que 300 mm, y la altura mínima al suelo debe superar los 75mm medida desde la parte más baja del tubo de enganche. Por otro lado los 180º inferiores del tubo deben de estar descubiertos a lo largo de una distancia mínima de 280 mm. Esto es necesario para la sujeción y remolque del vehículo por parte de los jueces o empleados de pista en caso de ser necesario. En

[1] Aunque en algún caso los decimales puedan parecer excesivos, se ha decidido mantener la décima de mm dada la importancia de pasar el examen de la organización. En su mayoría estos datos tienen su origen en sistema métrico inglés, de ahí que no sean valores enteros.

coordinación con la suspensión del vehículo, se debe tener en cuenta que a una altura de 200 mm medida desde el suelo al punto más bajo del enganche, las ruedas en rebote completo no deben tocar el suelo.

- El diseño se realizará para que sea válido para el piloto más alto del equipo y para un hombre elegido entre la población al azar en el 95% de los casos. La plantilla de este hombre en 2D viene dada por la organización (Figura 9). Un círculo de 300 mm representará la cabeza con el casco del piloto. Otro círculo de 200 mm representará los hombros y las cervicales. Otro de 200 mm es el que simulará las caderas. Una línea recta de 490 mm unirá los centros de los dos círculos de 200 mm, y una línea recta de 280 mm conectará los hombros con la cabeza y el casco. Este modelo debe estar situado en la posición normal de conducción, con la espalda en el respaldo, y con la cabeza a 25.4 mm del acolchado posterior al casco.

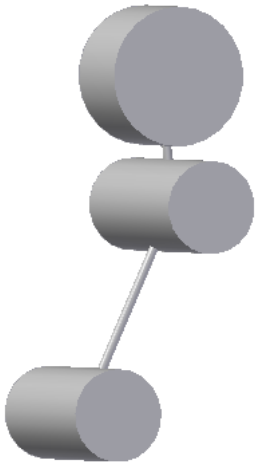


Figura 9. Representación del piloto.

3.3 Espesores de protecciones

La estructura principal del coche ha de ser construida de acero bajo en carbono o aleado, en tubos (mínimo 0.1% de carbono), con las dimensiones especificadas en la Tabla 1.

ARTÍCULO o USO	DIÁMETRO EXTERIOR x ESPESOR DE PARED
Arcos principales y delanteros	25.40 mm x 2.40 mm o 25.0 mm x 2.50 mm
Soporte de la mampara delantera.	25.40 mm x 1.25 mm
Protección lateral del impacto, mampara delantera, tirantes del aro de vuelco y accesorio del arnés de seguridad	25.40 mm x 1.60 mm o 25.0 mm x 1.75 mm

Tabla 1. Espesores de acero en protecciones. [Norm05].

El uso de aleaciones no permite utilizar un grosor de pared menor que el especificado para acero bajo en carbono.

También podrán ser utilizados otros materiales bajo las siguientes condiciones:

- Que la disposición de materiales alternativos adoptada tenga un E·I mayor o equivalente sobre el eje más débil.
- El tubo no podrá ser de un grosor más fino de lo especificado en la Tabla 2 y Tabla 3.
- El arco principal y su apoyo deben estar hechos de acero.

- Requisitos de tubos de acero:

MATERIAL Y APLICACIÓN	ESPESOR DE PARED MÍNIMO
Tubos de acero para aros delanteros y principales	2.1 mm
Tubos de acero para apoyo de los aros de vuelco, mampara delantera y sujeción del arnés de seguridad	1.65 mm
Tubos de acero para protección de impacto lateral.	1.25 mm

Tabla 2. Espesores alternativos de acero según [Norm05].

- Tubos de aluminio:

MATERIAL Y APLICACIÓN	ESPESOR DE PARED MÍNIMO
Tubos de aluminio	3.17 mm

Tabla 3. Espesores de aluminio según [Norm05].

Los tubos de aluminio deben ser tratados térmicamente y endurecidos tras la soldadura. El equipo deberá presentar en este caso un informe del proceso.

3.4 Arcos de seguridad

La estructura de protección del piloto consta entre otras partes de dos arcos de seguridad, uno frontal justo anterior al volante de dirección, y otro (el principal) colocado detrás de la cabeza y espalda del piloto. La cabeza del conductor debe estar protegida del suelo en todo momento en caso de vuelco. Por ello teniendo en cuenta el piloto más alto, o el modelo de piloto que se ha dado anteriormente, en ningún caso debe quedar un distancia menor de 50.8 mm entre la parte superior del casco del piloto y la tangente a los dos arcos de seguridad (como se muestra en el croquis de la Figura 10.

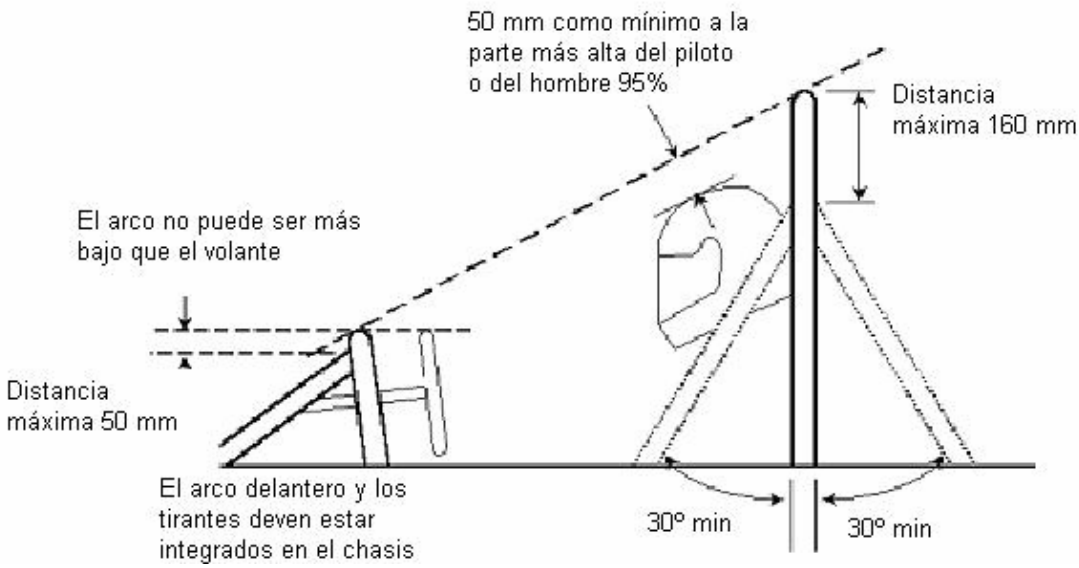


*Figura 10. **:** Croquis de disposición de los arcos de seguridad. [Norm05].*

En la construcción se debe tener en cuenta que no puede haber fisuras u ondulaciones en los tubos de los arcos de seguridad. Por otra parte, las curvas en ellos, medidas en su línea central han de tener un radio mínimo de tres veces el diámetro exterior del tubo.

Arco principal:

- El arco principal debe estar construido de una sola pieza de acero de las características (espesor y diámetro) especificadas para tubos de acero anteriormente.

- El arco principal debe prolongarse desde la parte más baja de un lado del chasis hasta la parte más baja del otro lado.

- En una vista lateral del vehículo, la parte del arco principal que asoma por encima del punto de unión de éste con el chasis ha de tener una inclinación menor de 10º con la vertical.

- En una vista frontal del vehículo, los miembros verticales del arco principal de seguridad, deben de estar al menos 38 mm separados del lugar en el que el arco principal se une con el resto del chasis.

Arco frontal:

- El arco frontal debe estar construido de acero de las mismas características dimensionales que el arco principal.

- Por otro lado con un buen estudio, triangulación, y refuerzos, este arco no será obligatoriamente de una pieza.

- El arco debe ir desde la parte más baja de un lado del chasis hasta la parte más baja del otro lado.

- En ningún momento la parte más alta del arco frontal ha de ser más baja que la parte más alta del volante (en cualquier posición de éste).

- En una vista lateral el arco frontal no podrá tener una inclinación mayor de 20º sobre la vertical.

Tirantes del arco principal:

- Deben ser construidos en acero de la sección antes mencionada en los dos arcos.

- El arco principal debe ir reforzado con dos tirantes, hacia delante o hacia atrás, pero éstos no podrán estar al mismo lado al que se inclina (en caso de que se incline) el arco principal.

- Los tirantes deben estar soldados a la parte más alta posible del arco principal, nunca en un lugar más bajo que 160 mm desde la parte superior del arco.

- Los tirantes deben ser rectos.

Tirantes del arco delantero:

- Los tirantes del arco frontal deben ser de la misma sección que los del arco principal.

- Los tirantes han de proteger las piernas del conductor, por lo que deberán estar a ambos lados y han de llegar hasta la estructura de protección de los pies del piloto.

- Han de ser soldados lo más cerca de la parte superior del arco posible, nunca más bajos de 50 mm (de la parte superior del arco).

3.5 Plano frontal encargado de proteger los pies del piloto

- Por delante del plano frontal debe de haber un atenuador de impacto que absorba de energía.

- El plano frontal debe estar construido con tubos de las mismas características geométricas que los usados para los arcos de seguridad.

- Debe estar situado de tal forma que los pies del piloto (sin estar presionando los pedales) queden protegidos por él.

- Como mínimo debe tener tirantes en la parte más alta (no más bajos de 50mm) hacia el arco frontal, así como en la parte más baja.

- Debe estar sujeto, nodo a nodo, triangulando, con al menos una diagonal por lado.

3.6 Protección de impactos laterales

- La protección lateral está formada al menos por tres piezas tubulares de sección igual a la de los arcos de seguridad.

- Con un piloto de 77 kg sentado en el coche, la pieza más alta de la protección lateral, debe unir el arco frontal y el principal a una altura del suelo mayor de 300 mm y menor de 350 mm. En el caso de que hubiese otra pieza del chasis que cumpla estas características, podría ser utilizada como protección.

- La pieza inferior de la protección lateral, debe conectar la base del arco frontal con la base del arco principal.

- Con la adecuada triangulación y estudio es posible construir las piezas con más de un tubo.

- Se deberá poner una diagonal que complete la protección como muestra el croquis de la Figura 11.

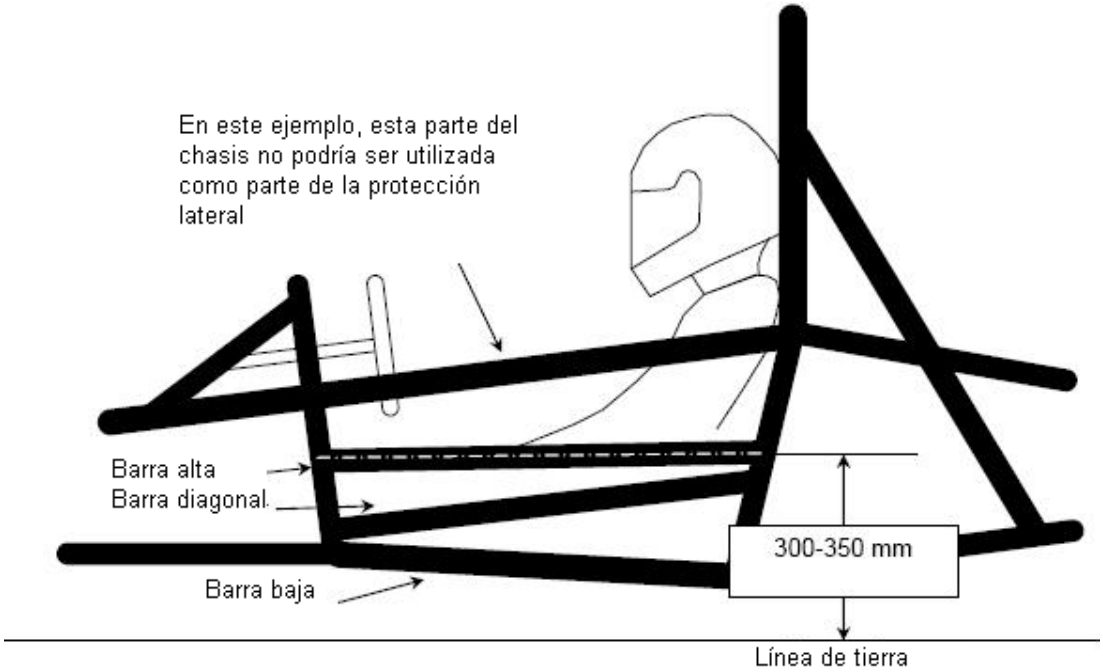


Figura 11. Estructura de seguridad lateral. [Norm05].

3.7 Otras consideraciones

Si algún tirante o tubo queda a la altura del cuello del conductor, se fijará una chapa o protección firmemente al chasis para evitar que el hombro del conductor pase por debajo del tubo y su cuello pueda contactar con él.

3.8 Cargas de competición

Aparte de la cantidad de restricciones impuestas por los organizadores, se deben tener en cuenta cargas muy importantes que derivan directamente de la competición. Una muy importante para el diseño del chasis, es que hay que tener en cuenta que en un plano inclinado lateralmente de 60º, y con el piloto más alto dentro del coche, el vehículo no podrá volcar. En la Figura 12 se puede observar una imagen de la prueba.

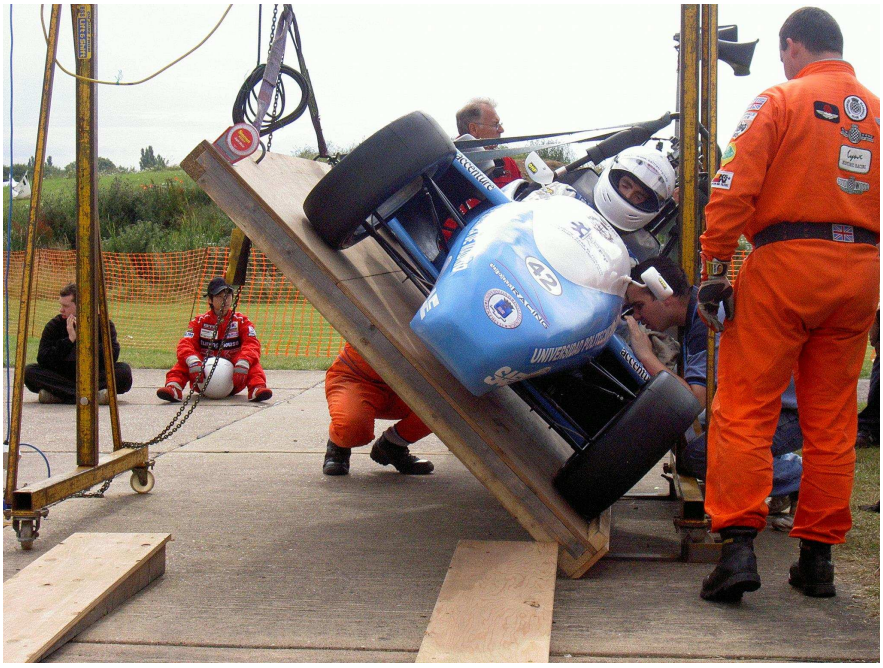


Figura 12. Prueba de inclinación. [W 1].

Otra carga importante será la fuerza lateral ejercida sobre el chasis, se debe tener en cuenta que hay una prueba en la que se mide precisamente la aceleración lateral que el vehículo es capaza de soportar sin perder el control. Estas aceleraciones rondan valores superiores a 1 g (0.9 g valor mínimo para puntuar).

4

Cargas ejercidas sobre el chasis por otras partes del vehículo

4 Cargas ejercidas sobre el chasis por otras partes del vehículo

4.1 Introducción

El chasis es la estructura principal de un coche y por lo tanto es la parte del vehículo que tiene que soportar los esfuerzos que ejercen el resto de los componentes de éste. Al analizar a fondo un chasis y su comportamiento real, hay que prestar atención a la serie de reacciones que en él se ejercen, en situaciones estáticas y en comportamiento dinámico en pista.

4.2 Las suspensiones

Las ruedas, por medio de las suspensiones son unas de las principales cargas que tiene que soportar un chasis (Figura 13). Muchas veces estas cargas ejercen un par torsor en el chasis, y la rigidez de la estructura a esta torsión condicionará en gran parte el comportamiento del coche en pista.

Figura 13. Imagen de la unión de rueda y chasis. [W 12].

Las suspensiones son un conjunto que se puede modelar por un sistema masa-muelle-amortiguador. Las constantes del elemento elástico y del amortiguador serán las que determinen en parte las reacciones en la estructura, sus cargas, vibraciones…

Para ello será necesario trabajar conjuntamente con los responsables de esta parte del vehículo para intentar alcanzar un buen resultado en conjunto. Siendo básico para el diseño del chasis conocer las constantes del citado muelle, amortiguador, de la masa no suspendida (al otro lado de la suspensión, ruedas, llantas…), así como de la masa de los elementos de la suspensión. Ya que esto es clave para calcular los distintos esfuerzos en nuestro chasis tubular al someterlo a distintas pruebas.

4.3 Masas del vehículo

El motor es una de las mayores masas en el vehículo. Por ello hay que tener en cuenta su peso (en nuestro caso 58 kg en seco), y las reacciones que esta masa pueda ejercer en el chasis cuando el vehículo entre en una curva, frene o acelere (se alcanzarán valores en curva cercanos a 1.3g laterales, 1.2g en frenada y 0.7g en la aceleración).

Por otro lado el motor hace de elemento de unión en la estructura entre la parte posterior del piloto y el final del chasis (como se puede ver en la Figura 14), dónde va instalado el eje trasero, diferencial, y el punto de agarre exigido por la organización para una posible retirada del vehículo de la pista en caso de que quedase inmovilizado.

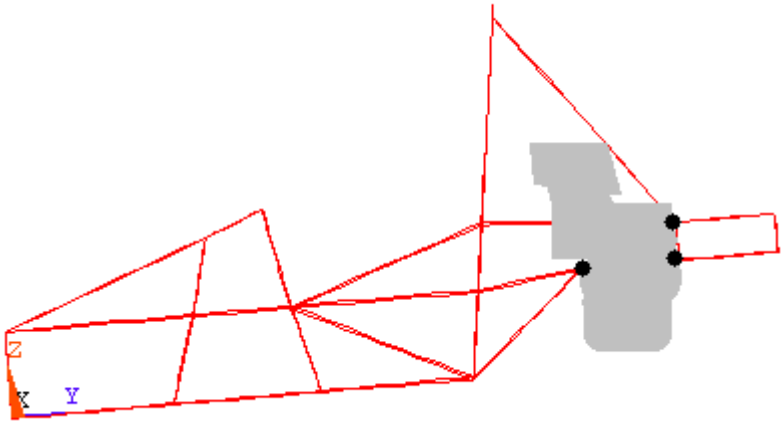


Figura 14. Imagen de chasis tubular y motor.

Se puede observar en la Figura 14 que la ausencia de motor dejaría los puntos marcados en negro (puntos de anclaje del motor) sin unir, quedando una estructura más débil que la real con el motor instalado.

Más masas que se deberán tener en cuenta a la hora de diseñar el chasis son:

- La batería: que tendrá un peso aproximado de 9 kg, e irá situada en la parte baja del arco de seguridad principal, justo detrás del asiento del piloto.

- El depósito de combustible: se tendrá que estimar cuál es el máximo peso de combustible que el vehículo va a necesitar en la prueba más larga y realizar los cálculos con ese dato.

- El piloto: Los cálculos se realizarán con un piloto de 75 kg, supone la masa más importante del vehículo.

- El diferencial: que estará situado en la parte posterior del vehículo.
- Los ejes de las ruedas, así como los distintos elementos de transmisión y dirección.

4.4 Carenado

El carenado es otra parte del vehículo a tener en cuenta, tanto por su masa como por las fuerzas que ejerce el viento a través de él en el chasis. Las fuerzas aerodinámicas que vendrán dadas del estudio del coche sometido a una cierta velocidad y que acabarán pasando esas reacciones al chasis del monoplaza pueden llegar a ser en algunos casos la mayor fuerza ejercida sobre el chasis. En este caso las reacciones nos serán facilitadas por el estudio aerodinámico que no entra dentro de este proyecto.

Por otro lado, la colaboración entre sectores es especialmente importante en el diseño de un automóvil, ya que se encuentran elementos que podrían pertenecer, por ejemplo al chasis, a la aerodinámica o al motor. Se trata de los llamados side pods (Figura 15).

Figura 15. Side pod. Renault F1. [W 14].

Tienen una función estructural a la vez que sirven para la colocación y refrigeración de los radiadores del motor. Claramente en el diseño de los mismos se ha de tener en cuenta la aerodinámica para que el resultado final sea satisfactorio. En la Figura 16 vemos un ejemplo aplicable a la fórmula SAE.

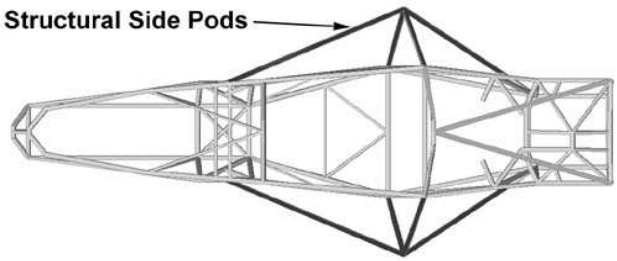


Figura 16. Ejemplo de estructura de side pods aplicable a SAE. [W 14].

5

Diseño de un chasis tubular

5 Diseño de un chasis tubular

5.1 Introducción

El fin del chasis de un vehículo es ejercer de elemento de unión entre el eje delantero y trasero del mismo, soportar las masas del automóvil y proteger al piloto de un posible accidente. En este capítulo se introducirán cuales son los parámetros que se deben optimizar para mejorar el comportamiento del chasis. A continuación se estudiarán estos factores clave que son: la rigidez, el peso y el coste.

El comportamiento de un coche en pista mejora con el incremento de la rigidez del chasis, la rigidez forma junto con el peso los dos factores funcionales principales del chasis. La dificultad de optimizar estos factores radica en que el incremento de rigidez supone en muchos casos un incremento de peso y de coste. Dependiendo tanto de las restricciones técnicas como económicas de la competición a la que se destina el monoplaza (tiene que tener un coste total de inferior a 25000 $) se deben ponderar de distinta forma estos factores. Al igual que el coste es el factor menos importante en competiciones como la Fórmula 1, en una competición como la fórmula SAE toma un valor importante ya que un exceso del mismo implica reducir el presupuesto en otras secciones del vehículo.

5.2 Criterios de rigidez

Se puede estimar que la rigidez es una función lineal que se podría definir según la fórmula:

$$K = \frac{P}{\Delta}$$

Dónde K representa el parámetro de rigidez, P la fuerza ejercida y Δ el desplazamiento.

En el mundo del automóvil se emplea la rigidez a torsión, quedando la fórmula como sigue:

$$K = \frac{M}{\theta}$$

Es el caso más común y normalmente se utilizan las unidades: [N·m / grado def], siendo lo más habitual expresar el par ejercido para 1º de deformación.

Es cierto que esta relación puede no ser lineal y variar dependiendo de la θ, pero en este caso θ se considera pequeño, con lo que K se tomará simplemente como un parámetro que mide el comportamiento del chasis, no como un valor que se pueda extrapolar a momentos o a θ mayores.

En un principio se podría pensar en estudiar dos tipos de rigidez en un chasis, la rigidez a flexión y la rigidez a torsión.

5.2.1 Rigidez a flexión

El coche va a estar sometido a unas cargas que tienden a deformar el chasis cuando el automóvil se apoya en las suspensiones como se muestra en la Figura 17.

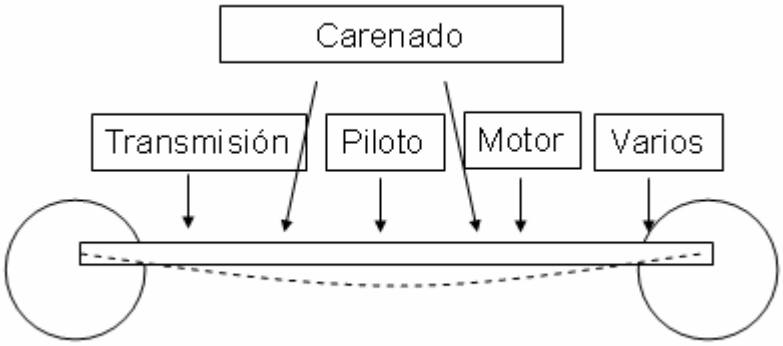


Figura 17. Representación de la flexión del chasis.

Sin embargo la experiencia de los fabricantes de chasis admite que no es un problema a la hora del diseño, ya que al ser más restrictivas las condiciones de rigidez torsional, si se sobrepasan éstas, se superan también los requisitos de rigidez a flexión.

5.2.2 Rigidez torsional

Se suele expresar en N·m de par por grado de deformación. En el caso de la fórmula SAE los resultados de los equipos que llevan más tiempo en la competición se sitúan alrededor de los 3000 N·m / grado. Esta medida se toma al ejercer un par torsor en una de las suspensiones mientras que se fijan los desplazamientos de la otra, como se puede observar en la Figura 18.

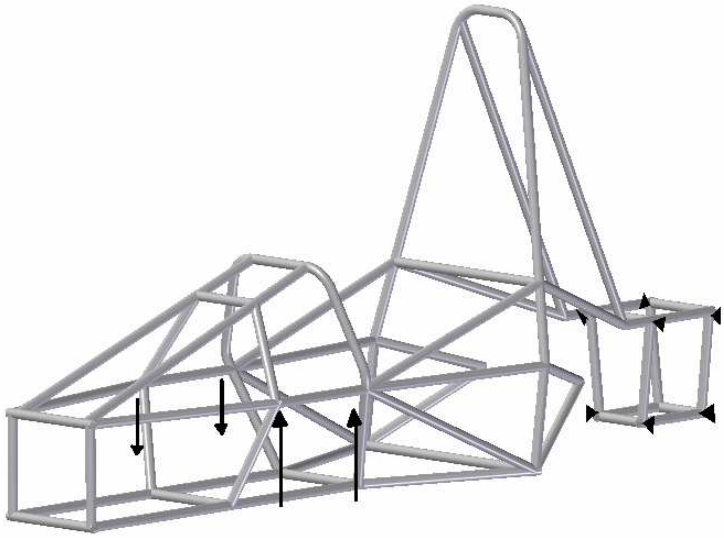


Figura 18. Esquema del ensayo a torsión.

En los coches convencionales se pueden encontrar valores muy dispares de rigidez, desde los 7000 N·m / grado hasta los 40000 N·m / grado de un Rolls-Royce Phantom [W 16]. Por otro lado los avances dan grandes resultados también en el mundo de las carreras, pasando de los chasis tubulares del Porsche 917 con 6000 N·m / grado al monocasco con 20000 N·m / grado del Porsche 962 C [W 15].

Estos esfuerzos son causados por las suspensiones cuando el coche entra en una curva, o pasa por un bache, alcanzando su valor máximo cuando la rueda de un lado del vehículo pasa por encima de un piano a una velocidad alta.

Para la construcción del chasis hay que tener en cuenta distintos factores tales como:

- Hay elementos que no forman parte directa de la estructura pero que aportan rigidez y han de tenerse en cuenta, como por ejemplo el motor.
- Los elementos que suponen las mayores masas del vehículo deben anclarse en los nodos.

- Si se utilizan materiales con menor módulo elástico E como el aluminio o el titanio en tubos que estén sometidos a esfuerzos importantes, será necesario aumentar la sección o cambiar la disposición de algunas barras para conseguir los mismos resultados.

5.3 Distribución de masas

El centro de gravedad de un automóvil juega un papel fundamental en el comportamiento del mismo sobre la pista. Para evitar el balanceo en las suspensiones y mejorar el comportamiento global del monoplaza el centro de gravedad ha de estar lo más bajo posible. El chasis es uno de las masas más importantes del vehículo pero por otro lado el diseño del chasis determina donde estarán situados el resto de componentes del monoplaza.

Otro dato a tener en cuenta sobre la disposición de las masas en el vehículo es que en una vista lateral del mismo el centro de gravedad ha de estar por delante del centro de presiones. Esto garantiza una mayor estabilidad por ejemplo ante una racha de viento lateral. En este caso no se dispone de una gran libertad a la hora de situar las masas dentro del vehículo, por lo que la variación posible de la posición del centro de gravedad es bastante limitada. De este modo corresponderá al diseño aerodinámico asegurarse de que el centro de presiones está en un punto posterior.

5.4 Criterios sobre el espacio

Los siguientes puntos se han de tener en cuenta ya que en algunos casos pueden actuar como restricciones dimensionales sobre el diseño del chasis:

- Debe considerarse cierta facilidad de acceso a las partes mecánicas del vehículo para actuar en caso de avería.

- Se debe cumplir la restricción de la organización en cuanto al espacio destinado al piloto, pero también hay que tener en cuenta las dimensiones del piloto real, para otros datos de interés como tener suficiente línea de visión, o la longitud de la parte frontal dónde deberá haber espacio suficiente para alojar las piernas (las piernas no vienen determinadas por la organización). Para ello se ha realizado un croquis de una persona de estatura y corpulencia normal (1.80 m y 75 kg) con el fin de comprobar con ese modelo que el diseño es adecuado.

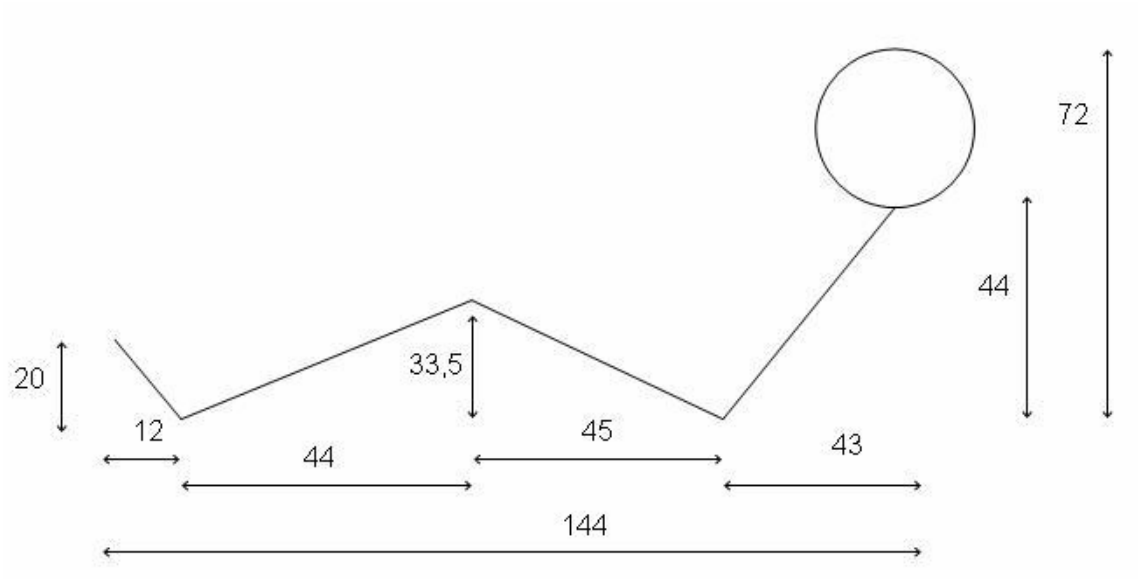


Figura 19. Croquis del piloto.

- Es necesario comprobar que la línea de visión del piloto está por encima del arco frontal del chasis.

- El piloto debe ser capaz de salir del coche en un tiempo inferior a 5 segundos según las normas de la competición, por lo que el diseño debe facilitar la salida del conductor.

5.5 Criterios sobre costes

Al contar con un presupuesto limitado es necesario disminuir los costes lo máximo posible. Por ello se han tomado las siguientes medidas:

- La selección de tubos variará lo menos posible en cuanto a diámetros se refiere.

- Se intentará reducir el número de uniones con gran número de tubos, ya que cuántos más tubos haya se dificulta más la soldadura.

- Dada la gran gama de precios que existe para tubos estructurales, ya sean distintos aceros como otros materiales, será importante escoger un tipo de material que cumpla nuestros requisitos y que a su vez no dispare los costes.

- Los perfiles escogidos serán aquellos que se encuentren en las empresas distribuidoras en stock permanente. Por un lado tienen un coste más bajo, y además no es necesario encargarlos, con el retraso y problemas que esto podría conllevar.

6

Análisis y estudio del modelo

6 Análisis y estudio del modelo

6.1 Introducción

En este capítulo se va a exponer cuál será la metodología mediante la que se llevará a cabo el proceso de diseño y estudio del chasis. Se realizará un primer paso en el que se obtendrá un modelo base, un chasis que sin estar perfeccionado cumpla las funciones básicas para las que está diseñado. Posteriormente se describirán las pruebas a las que será sometido con lo que se podrá obtener una visión global del problema, determinando cuáles son los puntos críticos del diseño, centrando así el posterior estudio y desarrollo en mejorar esos parámetros.

6.2 Obtención de un modelo base

El primer paso que se debe dar, tras haber realizado el estudio de las condiciones de la organización que afectan al chasis (capítulo 3), es llevar a la práctica la información adquirida realizando un primer diseño en el que consten simplemente estos tubos y utilizarlo como base para el desarrollo futuro.

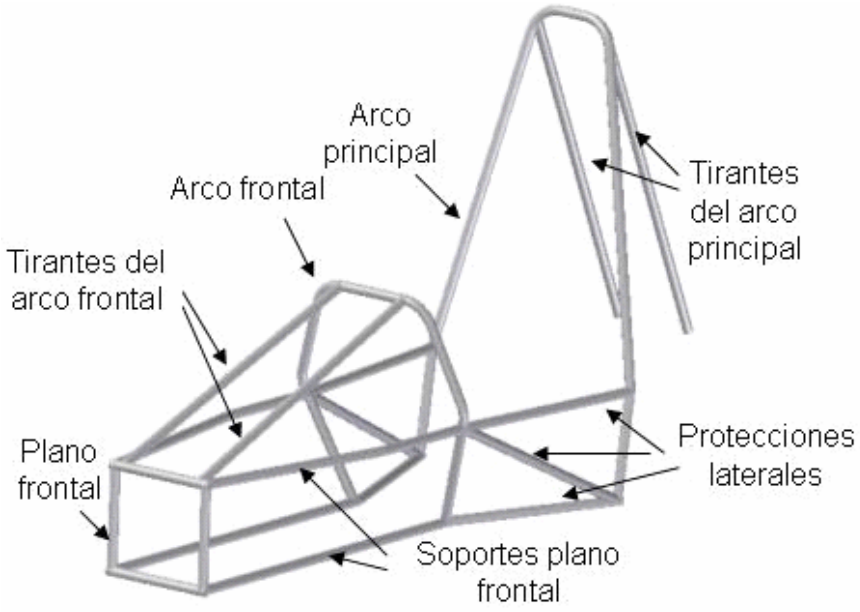


Figura 20. Tubos especificados en las normas.

En la Figura 20 se pueden distinguir con claridad las partes especificadas por las normas de la organización:

- Los arcos de seguridad: en este caso la altura de los mismos se obtendrá de la altura del piloto, su línea de visión etc… y se han inclinado lo máximo que deja las normas respecto a la vertical para facilitar la entrada y salida del vehículo del piloto que cuenta de esta manera con más espacio.

- Las medidas del plano frontal se obtienen de la longitud de los pedales y de los pies del piloto.

- Los soportes superiores del plano frontal no son paralelos a los inferiores, se pretende de este modo dejar más espacio a la altura de las rodillas.

- Las protecciones laterales ensanchan el chasis al igual que los soportes del plano frontal para dejar más espacio en este caso a las caderas y a los hombros del piloto.

- Los tirantes del arco frontal se limitan a unir éste con el plano frontal del chasis protegiendo las piernas

- Los tirantes del arco principal variarán en longitud y ángulo según la posición de los puntos de enganche del motor, ya que dichos puntos estarán soldados al otro extremo de los tirantes. El motor irá situado en la parte trasera del vehículo.

- En un principio el diámetro y espesor de los tubos es el mínimo que cumple las normas de la fórmula SAE.

El paso siguiente es el de realizar un croquis del motor que se va a utilizar, localizando los puntos de enganche para integrarlos en el chasis. El motor es el de una honda CBR 600 del 2003. Consta de tres puntos de enganche que son los mismos dónde se fijará al chasis. El motor es el que determinará las dimensiones de la parte trasera del vehículo.

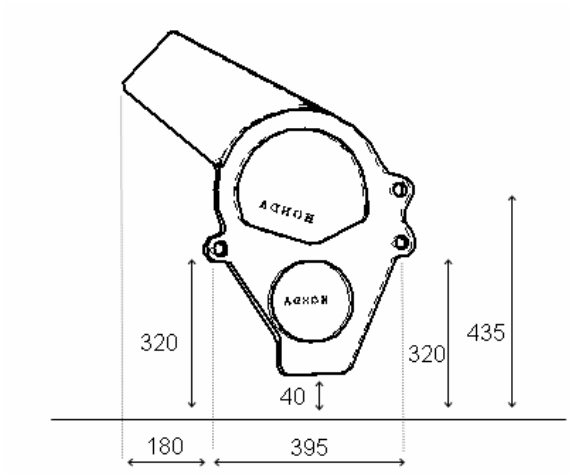


Figura 21. Croquis del motor.

Una vez obtenidos los puntos de sujeción del motor y las medidas del mismo se comienza a diseñar la parte trasera del chasis. El motor irá situado como en el croquis de la Figura 21, esto viene determinado por la sección de estudio del motor que decidió que una posición similar a la que lleva en la moto es la más conveniente. La altura a la que va situado ha de ser la más baja posible (mejorando así la posición del centro de gravedad).

Por lo tanto justo detrás del arco frontal ha de haber unos tirantes que proporcionen dos puntos de sujeción, y en la zona posterior del motor cuatro puntos de enganche.

La disposición adoptada en un principio ha sido la que muestra la Figura 22.

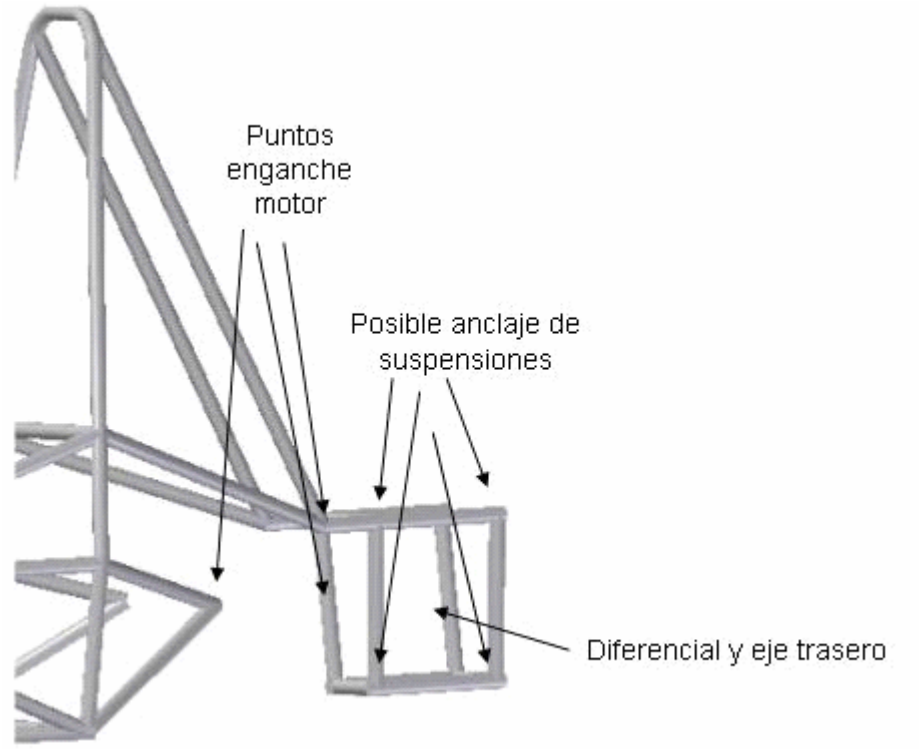


Figura 22. Detalle de la parte trasera del chasis base.

Las medidas de la parte trasera dependerán del tamaño del diferencial ya que debe ir situado en esa zona. Por otro lado las suspensiones pueden ir ancladas en diversos puntos, pero esa decisión pertenece a los encargados de su desarrollo.

El tirante que va desde la mitad del arco principal al punto de sujeción trasero del motor se ha puesto para no dejar que el motor sólo (como elemento estructural) uniese la parte trasera y delantera del chasis, ya que el rendimiento del motor podría verse afectado en caso de estar sometido a grandes esfuerzos. Es una medida de apoyo o de seguridad para reducir dichas cargas. Posteriormente tras el estudio que se llevará

a cabo se decidirá sobre la conveniencia de quitarlo para disminuir el peso, o de dejarlo porque si realiza la función anteriormente indicada.

Respecto de la parte delantera, se comenzará examinando la parte del chasis que cubre y protege las piernas. Entre el arco frontal de seguridad y el plano frontal hay una gran distancia con lo que se optó por añadir un refuerzo en forma de arco entre los dos, aumentando de este modo la rigidez de la estructura. Además esa es la zona de sujeción de las suspensiones delanteras con lo que de este modo se proporciona un punto sólido de enganche, y se protegen las piernas del piloto en caso de accidente.

En la zona de la cabina se decidió poner un tirante que uniera el arco principal con el frontal sobre las protecciones laterales por dos motivos: el primero es el de la seguridad del piloto, las protecciones laterales son bajas y cubren la mayor parte del torso del piloto pero dejan la zona de los hombros al descubierto con lo de esta forma se protege más en caso de accidente. El otro motivo es que la zona trasera del chasis quedaba unida a la zona delantera sólo por las tres barras de protección lateral, que al estar situadas tan bajas (debido a las normas), dejaban un espacio muy grande en la zona alta de la cabina del piloto sin estar reforzado, lo que podía debilitar la estructura.

Por último se han cerrado las estructuras de los tres arcos en la parte de abajo, ya que en caso de dejarlos abiertos la resistencia a torsión sería claramente menor.

En cuanto a secciones se ha tomado la decisión inicial de utilizar las secciones mínimas aceptadas por las normas (Tabla 1,Tabla 2 y Tabla 3) y variarlas posteriormente en función de los resultados. Existen tres radios y espesores mínimos que dependen de la zona del vehículo en la que están siendo utilizados, se comenzará utilizando estas medidas, y en las partes que no hay nada especificado se pondrá la sección más pequeña de las anteriores, utilizando en un principio sólo tres medidas de tubos diferentes.

En la Figura 23 se muestra la disposición de los tubos comentados anteriormente.

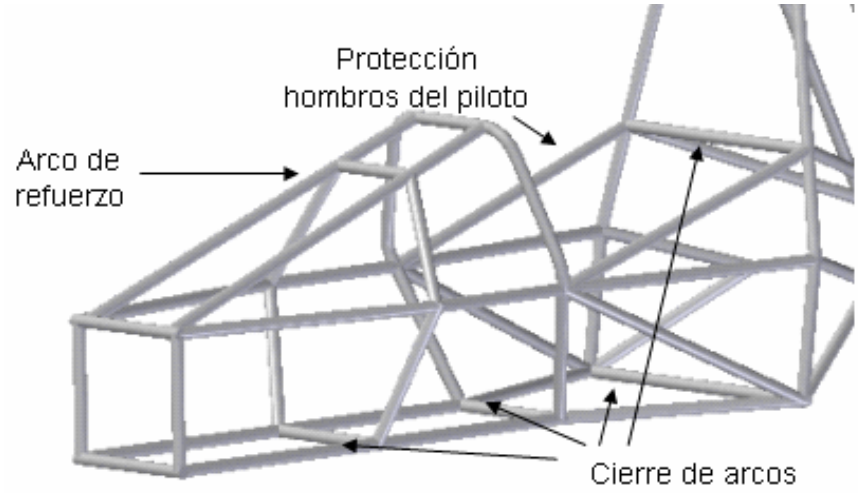


Figura 23.Diseño base de la parte delantera chasis.

Para las secciones se ha consultado el catálogo de una empresa fabricante y distribuidora de tubos de acero para distintos fines industriales y mecánicos. La Tabla 4 muestra los valores de las secciones de tubos que están disponibles.

Diámetro exterior	Tolerancias	Espesor Medio					
		1	1,25	1,5	2	2,3	2,5
(mm)	(mm)	Masas por unidad de longitud (kg/m)					
22	+/- 0,15	0,518	0,640	0,758	0,986		
25	+/- 0,15	0,592	0,732	0,869	1,13	1,29	1,39
26	+/- 0,15	0,617	0,763	0,906	1,18	1,34	1,45
28	+/- 0,15	0,666	0,825	0,980	1,28	1,46	1,57
30	+/- 0,15	0,715	0,886	1,05	1,38	1,57	1,70
32	+/- 0,20	0,765	0,948	1,13	1,48	1,68	1,82
35	+/- 0,20	0,838	1,04	1,24	1,63	1,85	2,00
36	+/- 0,20	0,863	1,07	1,28	1,68	1,91	2,07
38	+/- 0,20	0,912	1,13	1,35	1,78	2,02	2,19
40	+/- 0,20	0,962	1,19	1,42	1,87	2,14	2,31

Tabla 4.Dimensiones de tubos con perfil tubular del catálogo de condesa [W 17].

Por lo tanto las secciones iniciales elegidas son las siguientes:

Sección 1 Φ ext = 26 mm Esp = 2,5 mm	Arco frontal y principal.
Sección 2 Φ ext= 26 mm Esp= 2 mm	Plano frontal y tirantes del arco frontal, protecciones laterales y tirantes del arco principal.
Sección 3 Φ ext= 26 mm Esp= 1,25 mm	Soportes del plano o mampara frontal y el resto de tubos.

Tabla 5. Dimensiones de sección iniciales en el chasis base.

Así se ha obtenido un chasis base que será sometido a diversas pruebas para determinar los puntos más débiles e intentar mejorarlos.

6.2.1 Comprobación de la altura de los arcos de seguridad

El proceso que se siguió fue el de dar una altura inicial a los arcos que pareciese razonable y reducirla o aumentarla al comprobar las distancias de seguridad exigidas por las normas.

En este apartado se muestra la comprobación teórica de que las medidas finales adoptadas cumplen los requisitos de la fórmula SAE.

El arco de seguridad principal tiene 8º de inclinación vertical y el arco frontal está 11,1º inclinado en sentido contrario quedando como en la Figura 24. El arco principal se eleva a 1109 mm mientras que el frontal alcanza una cota de 560 mm

El piloto real (Figura 19) tiene el punto más alto de su cabeza a 720 mm del suelo, si se supone una altura de casco por encima de la cabeza de 150 mm resulta que el punto más alto estará a 870 mm.

Por otro lado el piloto representado por las normas según la Figura 9 estando situado en un asiento igual que la posición que adopta el piloto real (asiento a 45º) alcanza una altura máxima de 890 mm, con lo que si se comprueba que la altura de los arcos es suficiente para el piloto de las normas SAE lo será también para el piloto que aquí se ha propuesto como real.

Al estar situado en un asiento a 45º, resulta que el centro del círculo que representa los hombros está a una altura de 446 mm, y ya que el círculo es de diámetro 200 mm,

el centro del círculo se encuentra a 100 mm del respaldo tal como muestra la Figura 24. De este modo ya está situado el piloto en su posición normal de conducción.

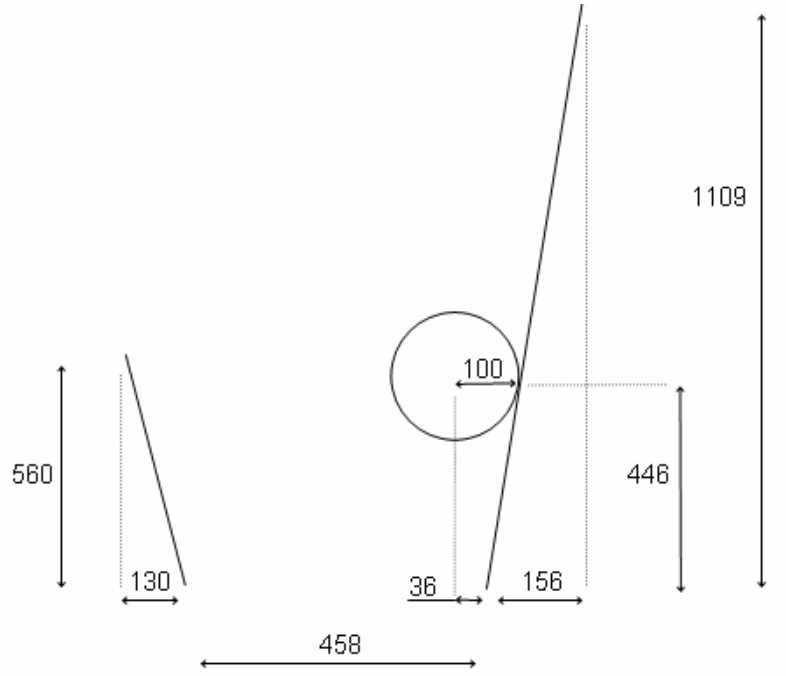


Figura 24. Croquis de los arcos de seguridad y hombros del piloto.

Para estudiar la parte superior se ha decidido cortar por un plano horizontal por la parte superior del arco frontal (como muestra la Figura 25) ya que el esquema queda bastante más claro para realizar los cálculos.

A la altura del límite superior del arco frontal el arco principal se separa 115 mm de la vertical que pasa por el centro del círculo que representa el cuello del piloto. En la Figura 25 se puede observar como queda el esquema.

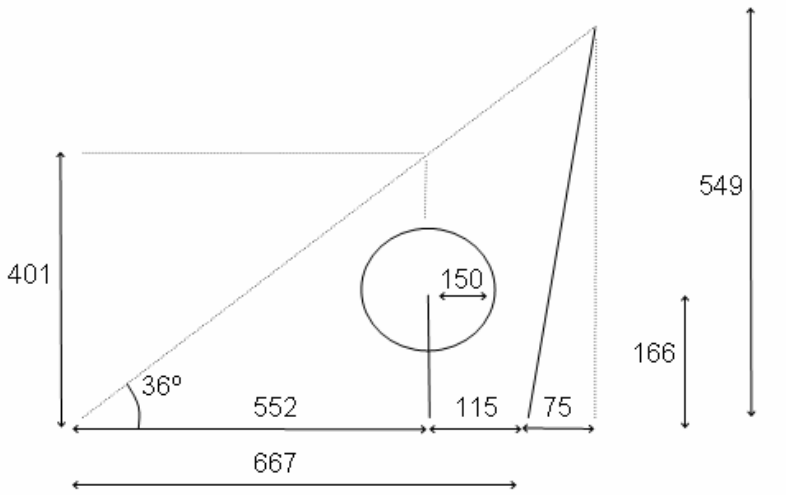


Figura 25. Esquema de comprobación de la altura del piloto.

Se puede ver que la altura máxima del piloto en el esquema es de 166+150=316 mm mientras que la línea de unión de los dos arcos pasa por encima de esa vertical a una altura de 401mm. La diferencia mínima necesaria según las normas es de 50 mm mientras que la diferencia del diseño es de 85 mm. Se ha creído conveniente no ajustar los arcos y dejar esa holgura con las normas de 35 mm porque no se han tenido en cuenta ciertas cosas como la altura del asiento o un casco mayor.

Por otro lado la línea de visión no se encuentra obstaculizada. El arco delantero alcanza una altura máxima de 560 mm mientras que los ojos del piloto se encuentran a unos 670 mm del suelo, teniendo en cuenta el modelo del piloto considerado en la Figura 19.

6.3 Pruebas de diseño

En este capítulo se explicarán cuáles son las pruebas en las que se basará el estudio del chasis y cuáles son las variables a tener en cuenta en cada una de ellas para analizar los resultados. Un detalle importante a tener en cuenta es que hay elementos en el coche que no forman parte directa de la estructura pero que si ayudan a obtener una rigidez mayor, por ejemplo el carenado o el mismo asiento del piloto. En estos dos casos el nivel funcional que aportan en cuanto a características estructurales es difícil de analizar teóricamente. En la práctica se podría medir la resistencia a torsión que aportan con un experimento con y sin los elementos y determinar así la diferencia. Otro elemento que hace una función estructural importante es el motor. El motor es una masa pesada de distintos metales que tiene una resistencia a torsión importante y que habrá que tener en cuenta al estar integrado en la estructura. En este caso el análisis teórico es más sencillo ya que lo que se hará es simular el motor con unos tubos altamente rígidos entre los puntos de unión de éste como se muestra en la Figura 26.

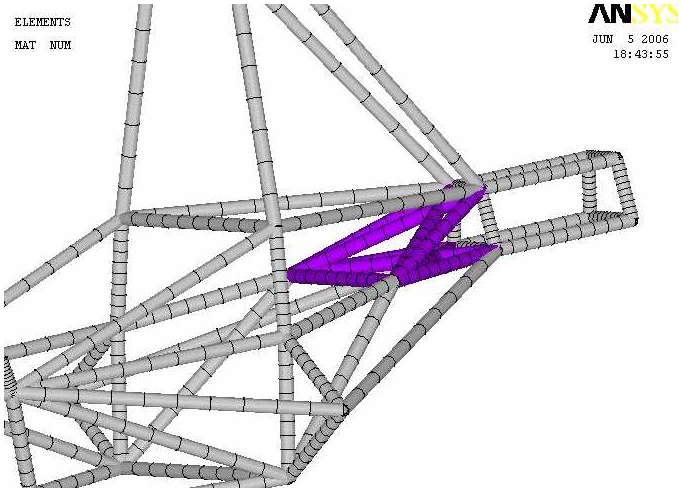


Figura 26. Muestra de la simulación estructural adoptada.

En la mayor parte de los casos los centros de gravedad de las masas ancladas al chasis del vehículo están muy cercanos a los puntos de sujeción de las mismas con lo que se ha optado por situar masas puntuales que las representen en dichos puntos. El caso del piloto es distinto, el centro de gravedad queda bastante alejado de los puntos en los que este contacta con la estructura por medio del asiento, y los efectos de los pares creados podrían ser importantes, con lo que se ha decidido situar una masa puntual representándolo en el centro de gravedad y unirla a la estructura mediante el uso de barras articuladas. De este modo la simulación es más fiel a la realidad. Las coordenadas del centro de gravedad del piloto fueron halladas dividiendo el modelo de la Figura 19 en masas puntuales que representaban partes más pequeñas tales como: muslos, cabeza, torso, gemelos y pies.

6.3.1 Remolque

Una de las especificaciones de las normas es que el chasis ha de tener un tubo auxiliar situado en la parte trasera de la estructura, cuya finalidad es la de servir como punto de enganche. Esto sería necesario si tras cualquier fallo, ya sea mecánico o una salida de pista, el coche tuviese que ser remolcado por una grúa.

Por lo tanto parece razonable que una de las primeras restricciones técnicas que deben ser impuestas a la estructura es que soporte (siendo sujetado por la parte trasera) el peso de sus componentes y de la estructura en sí misma sin sufrir ninguna deformación grave.

Para este análisis se utilizarán como datos de entrada: la estructura con las características del material e el peso aproximado de los elementos del vehículo, motor,

asiento, depósito de combustible, batería, carenado, ruedas, suspensiones y el diferencial.

Uno de los factores a tener en cuenta son las tensiones máximas que alcanza la estructura y en qué puntos se dan. Será necesario comparar los resultados con las tensiones máximas que puede soportar el material y comprobar que no corre peligro. Como tensión de análisis se va a utilizar la de Von Mises:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (\sigma 1 - \sigma 2)^2 + (\sigma 1 - \sigma 2)^2 + (\sigma 2 - \sigma 3)^2}$$

Otra de las variables que se tendrá que comprobar es la deformación máxima que sufre la estructura.

6.3.2 Frenada

Al igual que en la prueba anterior las dos variables que hay que controlar en esta situación son la tensión máxima de Von Mises y las deformaciones más importantes. En este caso es importante que las deformaciones que se den por causa de una frenada brusca al entrar en curva estén dentro de un límite razonable y que no sean perceptibles a simple vista.

La prueba de frenada se realizará poniendo unos apoyos fijos en los ejes de las ruedas y simulando la gravedad y la inercia de frenada.

Por datos de algunos equipos se sabe que las fuerzas de frenada rondan un valor aproximado de 1.2 g.

6.3.3 Aceleración

Prueba idéntica a la de frenada con lo que se deben tener en cuenta las mismas variables para el análisis de resultados. En este caso la diferencia radica en que en la aceleración el único eje que transmite fuerza de aceleración a la estructura es el trasero con lo que la simulación se realizará fijando el eje trasero y los movimientos verticales y laterales del delantero, pero dejando en el eje delantero el grado de libertad para moverse paralelamente al suelo y en el sentido longitudinal del coche tal como se muestra en la Figura 27.

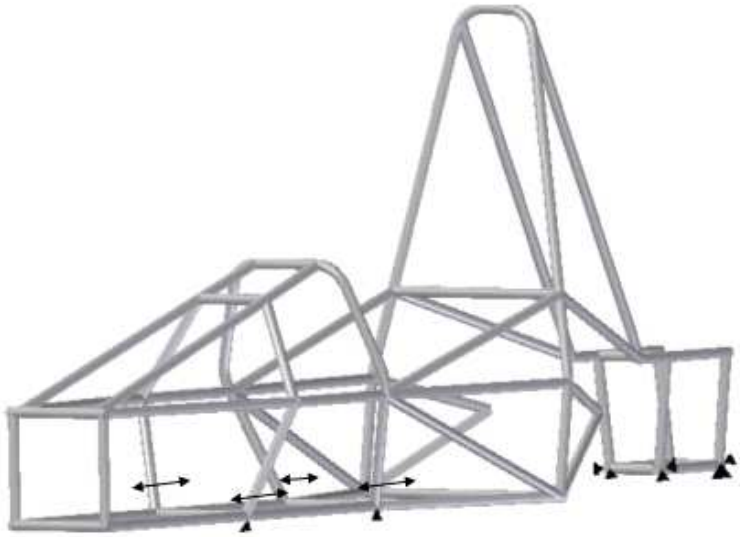


Figura 27. Grados de libertad de los apoyos en la aceleración.

Para la aceleración en este tipo de competiciones se alcanzan valores como 0.7 g.

6.3.4 Curva

El empuje lateral que experimenta un coche a su paso por una curva es otra situación que debe ser estudiada en el análisis de un chasis. Las variables importantes en este caso son las mismas que en la frenada y en la aceleración, y los puntos de apoyo se sitúan al igual que la frenada, fijos.

En la fórmula SAE el chasis ha de soportar valores de aceleración centrifuga cercanos a 1.3 g.

6.3.5 Resistencia a torsión

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, esta es la prueba clave, la rigidez a torsión define en gran parte el comportamiento de un coche y por ello, aumentar la rigidez supone estar mejorando el chasis.

La prueba se llevará a cabo sujetando la parte trasera del vehículo y ejerciendo unas fuerzas en la zona de la suspensión delantera que deformen por torsión la estructura. Como se comentó anteriormente, antes equipos con experiencia en la competición están satisfechos cuando consiguen alcanzar los 3000 N·m /grado, por lo que se comenzará aplicando este valor de par y observando los grados de deformación iniciales.

Es importante destacar que las tensiones obtenidas en la estructura en esta simulación no son importantes en sí mismas, ya que el par supuesto de 3000 N·m no se aplicará en el funcionamiento normal del coche. Este estudio es necesario para determinar el comportamiento del chasis pero si bien el tipo de simulación representa una acción real los valores de fuerzas utilizados no lo hacen. Las tensiones obtenidas en este caso si pueden ser útiles si se las compara con otras tensiones obtenidas de la misma simulación pero con variaciones de diseño en el chasis, así se puede observar si los esfuerzos están más repartidos o más centrados en ciertos puntos dependiendo de los distintos diseños.

Tras el estudio de los resultados de las pruebas descritas anteriormente se tendrá una idea de lo cercano que está el diseño al objetivo prefijado, y de cuáles son las líneas futuras de trabajo a seguir para mejorar los parámetros que estén más alejados de los niveles buscados.

7

Resultados

7 Resultados

7.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos con el chasis base y las conclusiones que resultan de la interpretación de dichos resultados. Posteriormente se describirán los cambios de diseño que se hicieron para obtener el chasis final y se mostrarán los resultados obtenidos con la estructura definitiva. Este capítulo, en particular la parte del análisis de los resultados del chasis final, será la base para definir las líneas futuras de trabajo y para determinar los puntos fuertes y débiles del diseño.

7.2 Resultados del modelo base

7.2.1 Remolque

El primer punto que se observará en la Figura 28 es la deformación que se produce al remolcar y levantar el chasis con las masas del vehículo.

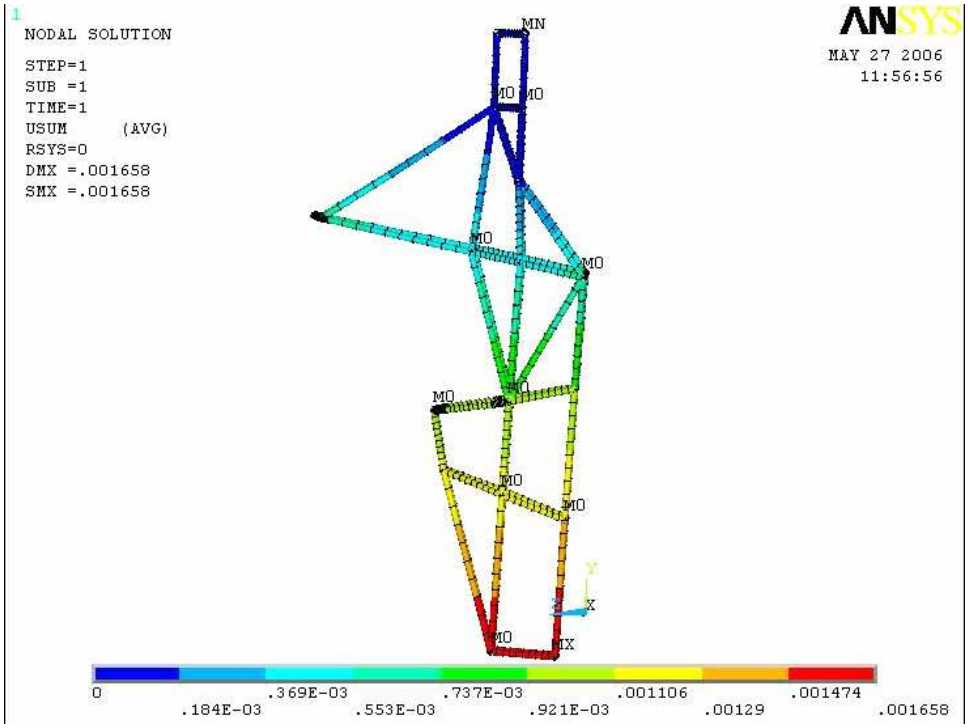


Figura 28. Desplazamientos del chasis al someterlo a la prueba de remolque.

Como se puede apreciar el desplazamiento máximo se produce en la parte inferior del chasis y alcanza un valor de 1.6 mm. Este valor, que en un principio podría parecer

excesivo, no representa peligro para el chasis porque lo que ocurre es que el chasis ha girado sobre los soportes superiores debido a que el centro de gravedad no quedaba en su vertical. El desplazamiento se debe a ese giro más que a la deformación longitudinal (eje Y) de la estructura que como se puede ver en la Figura 29 alcanza un valor mínimo pequeño de -0.3 mm en la parte inferior y 0.5 mm (sentido positivo, desde la parte delantera a la trasera) máximos en la zona de los arcos debidos al giro antes mencionado.

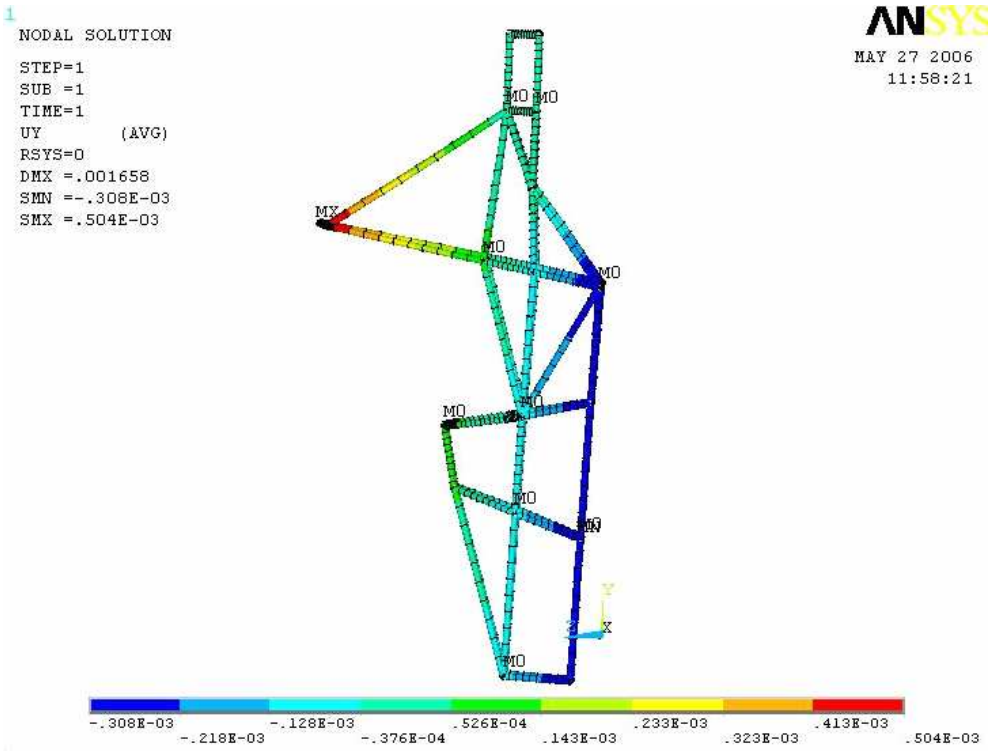


Figura 29. Deformación en el eje Y.

Si se atiende a la tensión máxima de Von Mises en cada punto (Figura 30) se observa que la máxima alcanzada es de 26.8 MPa. Dependiendo del tipo de acero la tensión máxima soportada varía, pero un valor razonable para este tipo de diseños es de 260 MPa con los que los esfuerzos a los que está sometido el chasis no son peligrosos para la estructura. Además el estado de tensiones está concentrado en la zona trasera, el resto del chasis no está sometido a esfuerzos de consideración (tensiones inferiores a 2.9 MPa).

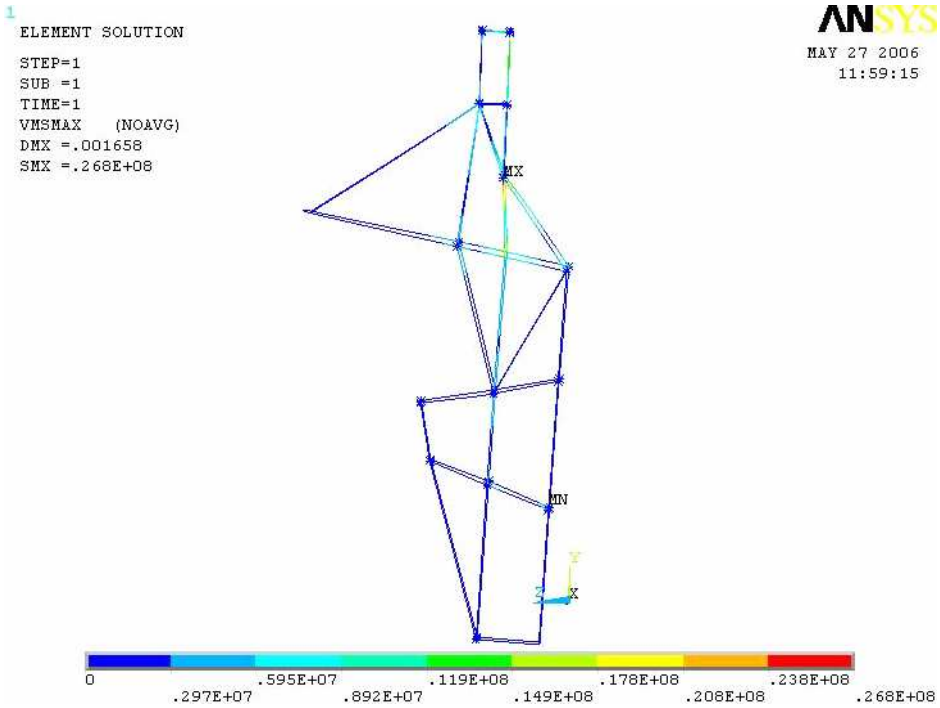


Figura 30. Tensión máxima de Von Mises en cada punto.

7.2.2 Frenada

La deformación máxima alcanzada (Figura 31) en la prueba de frenada (1.2 g) ha sido de 0.5 mm. Es un valor aceptable para el momento de la frenada más brusca. Por otro lado en el eje Y, longitudinal al chasis, el desplazamiento máximo ha sido de 0.007 mm (insignificante) y el mínimo de -0.1 mm.

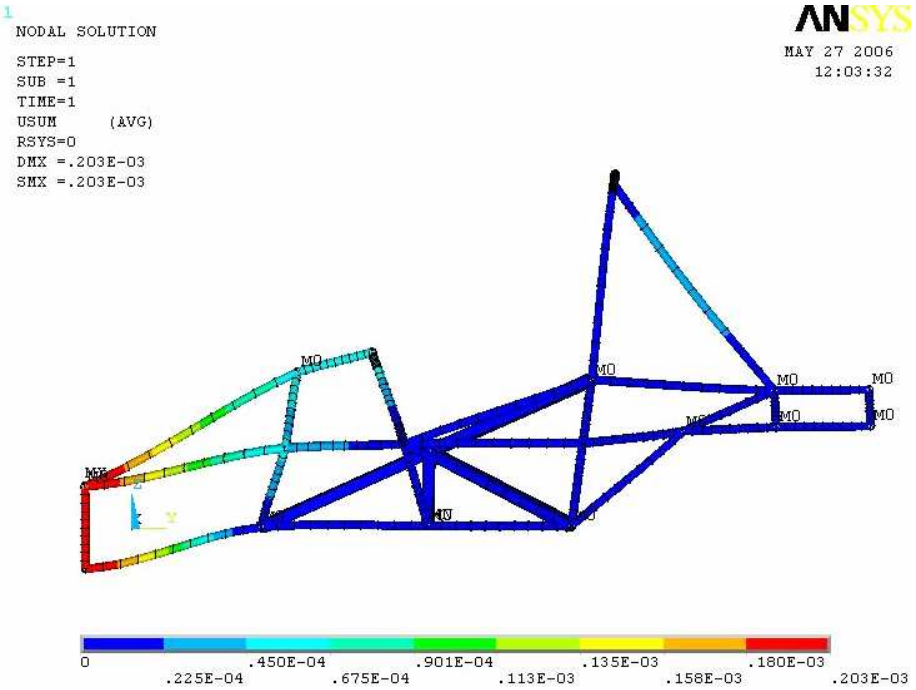


Figura 31. Desplazamiento total en cada punto.

La tensión máxima alcanzada es de 30.5 MPa (Figura 32) con lo que es soportada sin problemas por la estructura.

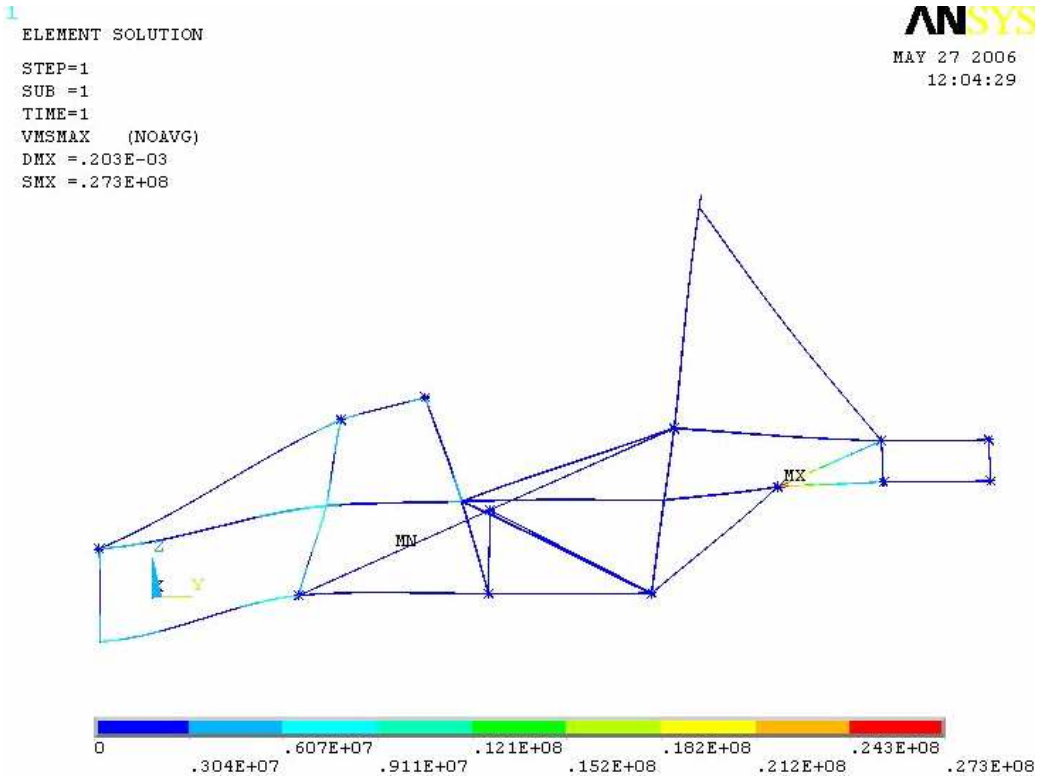


Figura 32.Tensión máxima de Von Mises en cada punto en la frenada.

Como se puede observar los esfuerzos se concentran en la zona delantera y en los puntos de sujeción del motor, pero sin hacer peligrar la estructura en ningún caso.

7.2.3 Aceleración

El desplazamiento máximo es de 0.26 mm, y el desplazamiento en el eje Y máximo es de 0.03 mm y el mínimo es de -0.03 mm. Por lo que el chasis prácticamente no se deforma durante la aceleración (0.7 g).

La tensión de Von Mises máxima alcanza un valor de 44 MPa y tal y como se observa en la se encuentra mucho más concentrada que en la frenada, los esfuerzos recaen totalmente sobre la zona trasera del vehículo en este caso. La tensión alcanzada sigue sin hacer peligrar la estructura del vehículo.

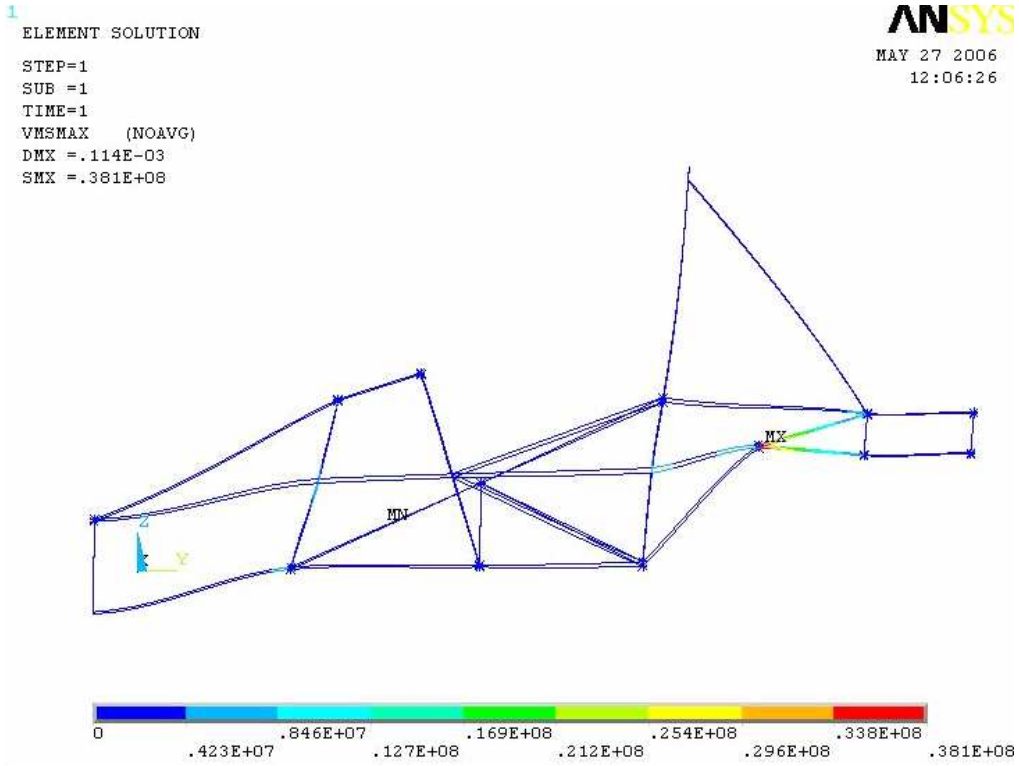


Figura 33. Tensión máxima de Von Mises en cada punto en la prueba de aceleración.

7.2.4 Curva

En este caso el desplazamiento máximo alcanzado al someter al vehículo a una curva con una aceleración lateral de 1.3 g es de 0.79 mm. La deformación lateral (eje x) máxima es de 0.75 mm y la mínima -0.17 mm. Como se puede apreciar las deformaciones son pequeñas y aceptables.

La tensión de Von Mises máxima es de 107 MPa que es bastante más alta que la que se da en la frenada o en la aceleración, pero sigue estando lejos de los límites soportados por el material. Por otro lado las tensiones en este caso se encuentran muy concentradas en los puntos de unión con el motor y en la zona inferior del arco frontal y del de refuerzo.

7.2.5 Torsión

Al someter el chasis a una torsión de 3000 N·m se obtuvo un desplazamiento total máximo de 16.8 mm, este dato no es significativo ya que como se ha mencionado en capítulos anteriores esta prueba de torsión es interesante para obtener un indicador pero no porque sea una situación real, en cuanto a los valores que se barajan, a la que el chasis se vea sometido (si en el modo). Lo importante de esta prueba es obtener el ángulo girado por el chasis con lo que los desplazamientos que adquieren verdadera

importancia son los que se dan en el eje Z. En este caso el máximo es de 10.5 mm y el mínimo de -10.5 mm (Figura 34). En la zona de las suspensiones delanteras (dónde se medirá el ángulo girado) los desplazamientos son de 10.5 mm y de -10.5 mm en el lado opuesto. Estos puntos están separados una distancia de 476.4 mm con lo que el ángulo girado resultante es de 2.52º. Este ángulo es muy superior al objetivo fijado inicialmente.

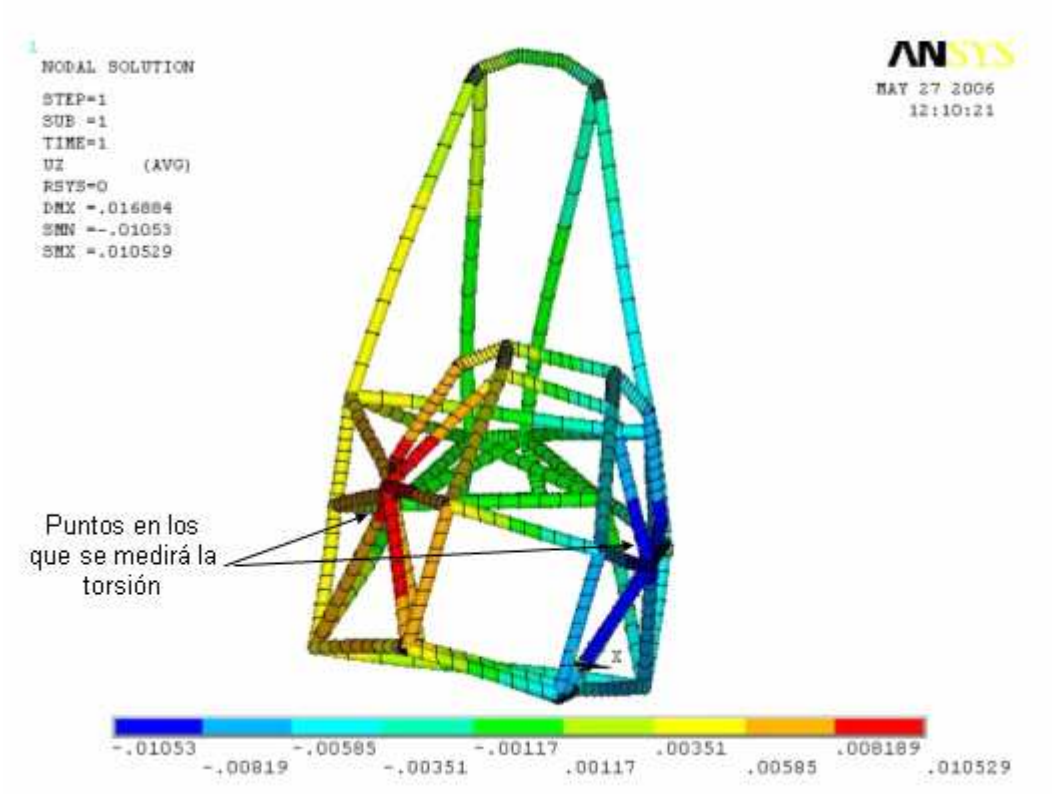


Figura 34. Desplazamientos en el eje Z en la prueba a torsión.

La tensión máxima alcanzada es de 665 MPa que sobrepasa mucho la máxima soportada por el material, pero en esta prueba esto no es importante ya que el monoplaza no se verá sometido a estos pares en su funcionamiento normal. Lo que resulta interesante es observar la distribución de tensiones a lo largo de la estructura ya que esto puede dar una idea que cuáles son las zonas más cargadas, para posteriormente reforzarlas y estudiar si se produce una reducción en la deformación de la estructura.

En la Figura 35 se puede ver que una vez más las tensiones más altas se alcanzan en los puntos de unión con el motor, pero en este caso también se alcanzan tensiones importantes en la zona frontal del chasis, en la parte del suelo. Los tubos que cierran el arco frontal y el arco de refuerzo están sometidos también esfuerzos muy importantes.

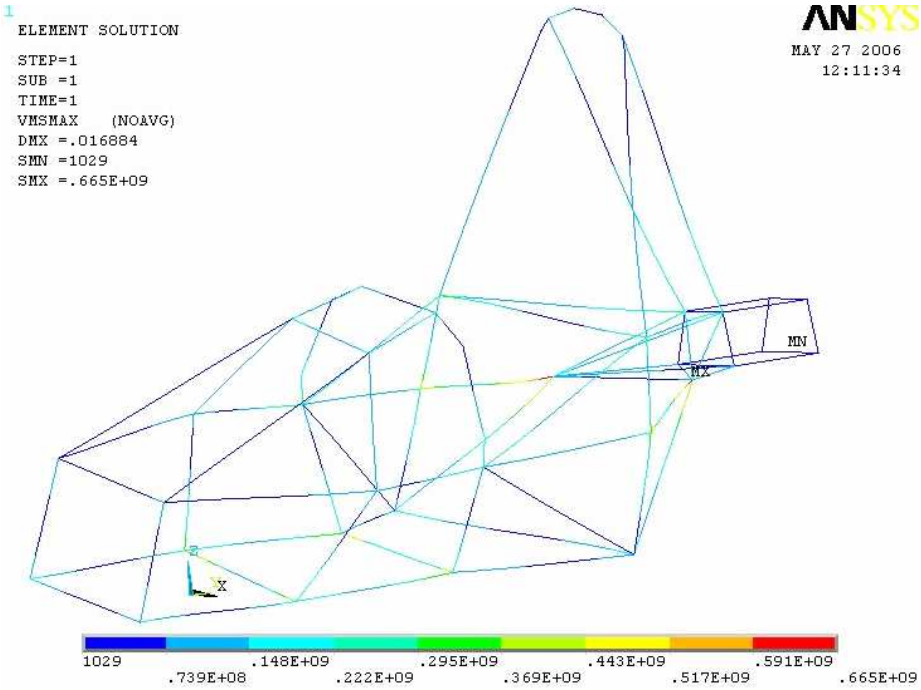


Figura 35. Tensión máxima de Von Mises en cada punto (torsión chasis base).

7.2.6 Conclusión

La conclusión que se obtiene de este estudio del chasis base es que: la afirmación, basada en la experiencia de los fabricantes y diseñadores de chasis, de que la prueba de torsión es la más exigente y a su vez crítica para un chasis es cierta. En este estudio se ha podido observar como el chasis base pasaba sin dificultad las pruebas de aceleración, frenada, curva y remolque, pero sin embargo fracasa totalmente en la prueba de torsión, sin duda mucho más exigente que las anteriores.

Es necesario mejorar el diseño del vehículo ya que podría acelerar o frenar en una pista, pero tener un chasis tan poco rígido proporcionaría una mala base para un buen comportamiento en carrera. Por otro lado, al carecer de datos experimentales que especifiquen los valores de los pares ejercidos, se desconoce cuál sería la respuesta de la estructura al paso del monoplaza por encima de un piano. El nuevo diseño del chasis se ha de centrar en mejorar la respuesta a torsión ya que si se alcanzan buenos resultados en esta prueba también se sobrepasarán los requisitos de las demás.

Un dato de interés es que el chasis base pesa 25.43 kg, que es un peso realmente bueno para una estructura de estas características.

7.3 Diseño final, análisis de los cambios

En este apartado se analizará el diseño final deteniéndose en los cambios que lo distinguen del modelo base. Para alcanzar el modelo final (Figura 36) que se expone a continuación han sido necesarias varias pruebas con distintos diseños. Los resultados de las pruebas mencionadas no se muestran a continuación, dejándolas expuestas en el anexo.

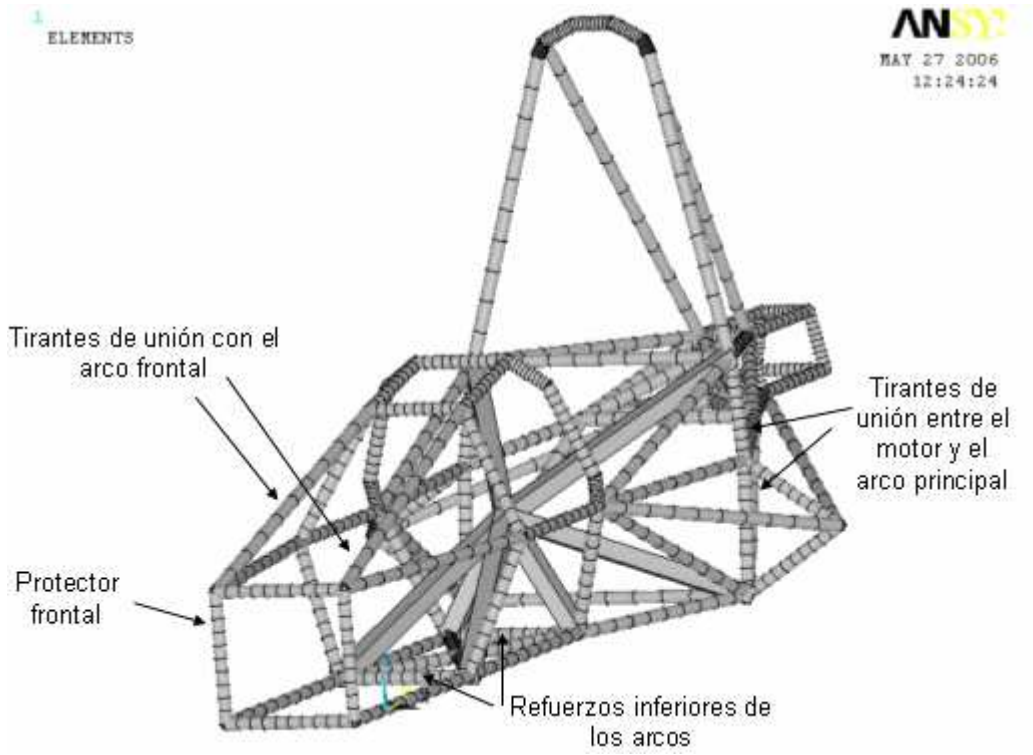


Figura 36. Modelo chasis final.

7.3.1 Side pods

En la competición de la fórmula SAE se han observado coches con side pods y coches sin ellos. La función principal de los side pods es la de actuar como elementos de aerodinámica interna. En ellos pueden ir situados los radiadores del coche. Lo que se ha intentado en este apartado es aprovechar ese aumento en el carenado, que probablemente fuese necesario para colocar elementos funcionales del sistema de refrigeración, para situar en el interior una estructura que permita aumentar la resistencia del chasis.

Se han probado distintas configuraciones, y si bien es cierto que todas ellas aumentaban considerablemente la rigidez del vehículo, la que se ha escogido como configuración final es la que presentaba una mayor mejora en la resistencia torsional.

Por otro lado es curioso que la configuración escogida es la más ligera de todas las probadas, con lo que la optimización rigidez-peso ha sido total.

En el momento de añadir esta parte de la estructura se redujeron los grados de deformación a torsión en casi 0.5º por lo que la decisión de ponerlos o no, al estimar la aportación de rigidez frente al peso aumentado, fue clara. Mientras que el aumento de peso en el que se incurría era mínimo comparado con el total, se estaba ganando un aumento de rigidez considerable.

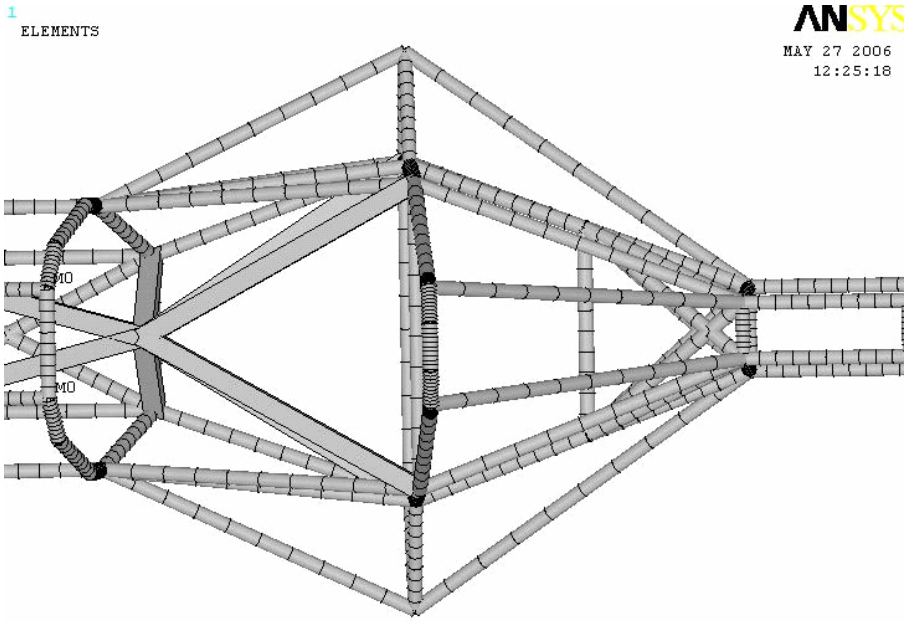


Figura 37. Detalle de los side pods utilizados.

A simple vista la peor característica de la configuración mostrada en la Figura 37 es que los tubos que forman parte de dicha estructura salen del futuro carenado pudiendo crear problemas aerodinámicos en el flujo de aire externo. La aerodinámica es importantísima en los vehículos de carreras con lo que si este factor estropease el flujo de aire que tanto tratan de cuidar en el sector aerodinámico, claramente se estaría perdiendo en esta sección del coche tanto o más de lo que se gana en la estructura. Pero este no es el caso, el flujo de aire posterior a las ruedas (en los automóviles de competición, con las ruedas descubiertas) es completamente turbulento por lo que no se perjudica la aerodinámica si los tubos de la estructura se mantienen en la parte posterior a las ruedas. Además las velocidades alcanzadas en este tipo de competición superan por poco los 100 km/hora lo que reduce la importancia de la aerodinámica en el diseño.

7.3.2 Cruz

Incluso aumentando las secciones, la zona comprendida entre el arco frontal y el arco de refuerzo seguía siendo una de las zonas sometidas a mayores esfuerzos, por lo que con distintas configuraciones de tubos se intentaban reducir las tensiones de la zona, en algunos casos se conseguía pero sin aumentar demasiado la resistencia a la torsión, pero con la configuración adoptada se consigue reducir el estado de tensiones y deformaciones a torsión mucho menores.

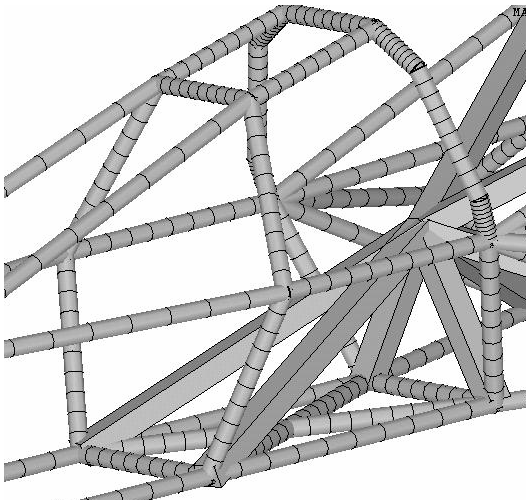


Figura 38. Detalle de la cruz de refuerzo en la parte inferior del chasis.

7.3.3 Secciones

La prueba en la variación de las secciones de los tubos ha sido constante. En este proyecto se ha intentado utilizar únicamente tres secciones de tubos diferentes intentando de este modo reducir los costes y facilitar el montaje del chasis. Tras las distintas pruebas intentando reducir la deformación, reforzando con secciones mayores las partes más perjudicadas del chasis y utilizando secciones menores en otras partes que no se encontrasen forzadas con el ánimo de reducir el peso, se llegó al modelo final de secciones que se muestra en la Tabla 6.

Sección1 Rext1=14 mm Esp1=2.3 mm	Arco frontal y principal, tubos inferiores de los arcos de refuerzo y frontal, cruz inferior y uniones del motor al arco principal.
Sección2 Re2=13 mm Esp2=2 mm	Frontal y tirantes que lo unen con el arco frontal, protección lateral y tirantes del arco principal.
Sección3 Re3= 13 mm Esp3=1.25 mm	El resto de tubos.

Tabla 6. Secciones del modelo final.

Como se puede observar en la Tabla 6 la sección 1 tiene un espesor menor que el exigido por las normas en la Tabla 1, en la que el tubo mínimo era de diámetro 25.4 mm y un espesor de 2.4 mm. Según la Tabla 2 el espesor mínimo para los tubos afectados podía llegar a ser de 2.1 mm siempre que el nuevo producto E·I (siendo I el momento de inercia del área respecto al eje más débil, que en este caso es cualquiera ya que la sección es una corona circular) fuese mayor que el E·I del tubo de la Tabla 1. A continuación se expone dicha comprobación.

Los materiales son en ambos casos acero, con lo que la comprobación queda reducida a los momentos de inercia.

El momento de inercia del área de una corona circular es:

$$Iz = Iy = \frac{\Pi}{4} \cdot \left(\mathrm{Re}\, xt^4 - R\,\mathrm{int}^4\right)$$

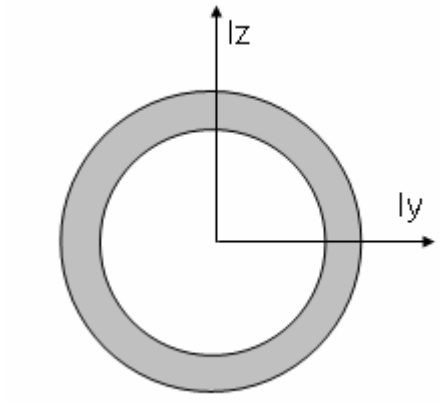


Figura 39. Representación de los ejes en una corona circular.

Por lo que la primera sección (Φext = 25.4 mm y espesor 2.4 mm) da un valor del momento de inercia de 1.159e-8 m^4.

La sección utilizada en el diseño teórico (Φext = 28 mm y espesor 2.3 mm) tiene un momento de inercia de 1.545e-8 m^4. De este modo se comprueba que la sección escogida para el diseño cumple las normas de la fórmula SAE.

7.3.4 Arco principal

Tras comprobar la anchura de hombros de una persona de constitución normal, como la del croquis de la Figura 19, se decidió aumentar un poco el espacio existente

en la cabina dejando unos centímetros más por si el monoplaza tuviera que ser pilotado por un piloto más corpulento.

Para obtener el chasis definitivo deberán de hacerse muchas modificaciones de este estilo cuando se tengan más datos definitivos de otras partes del vehículo, si bien estos cambios son insignificantes a la hora del diseño, pueden ser muy importantes desde el punto de vista práctico.

7.4 Resultados del diseño final

7.4.1 Remolque

La deformación máxima en la prueba de remolque fue de 1.7 mm, mientras que los desplazamientos en el eje y (sentido positivo de la parte delantera a la trasera del vehículo), que son los realmente significativos de esta prueba, fueron: el máximo 0.5 mm y el mínimo -0.2 mm. La deformación es muy similar a la producida en el chasis base, en valores y en la distribución de los desplazamientos.

La tensión máxima de Von Mises (cuya distribución se muestra en la Figura 40) es de 21.5 MPa, un valor perfectamente aceptable.

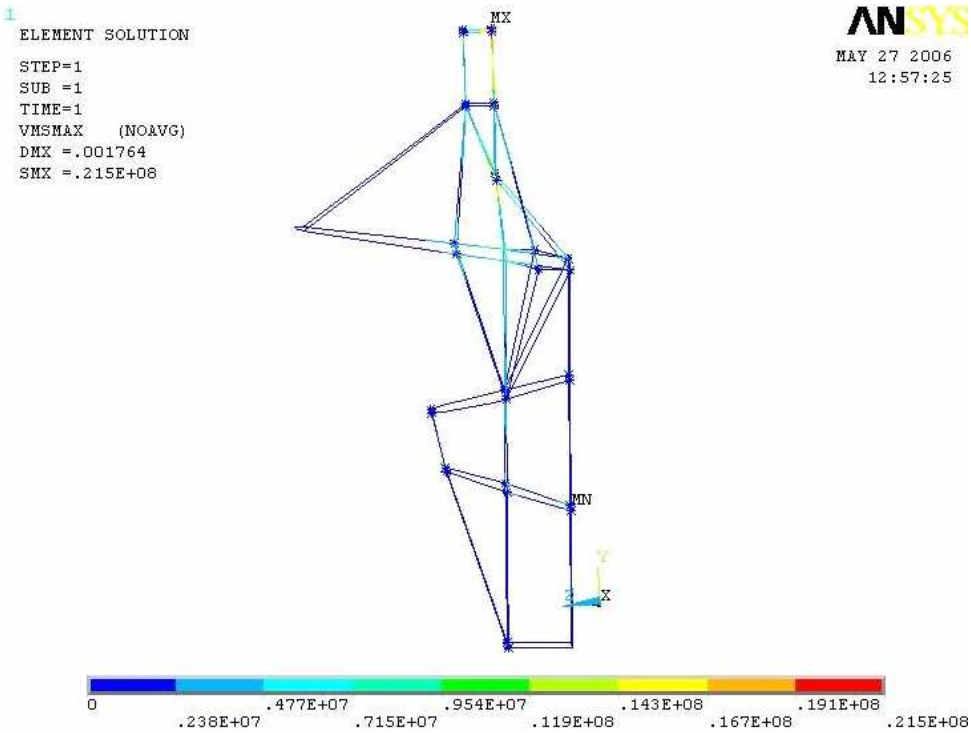


Figura 40. Tensión de Von Mises máxima en cada punto (chasis final).

Como se puede ver la parte trasera del vehículo es la que está sometida a más esfuerzo mientras que la delantera está totalmente descargada.

7.4.2 Frenada

En la prueba de frenada el desplazamiento máximo ha sido de 0.5 mm (Figura 41), y los desplazamientos en la dirección longitudinal del chasis han sido: el máximo 0.006 mm y -0.1 el mínimo.

Las deformaciones obtenidas son realmente pequeñas ya que se trata de la frenada más brusca que realiza el coche.

En la Figura 41 se puede ver (aumentada la escala) la deformación que sufre el coche en la frenada.

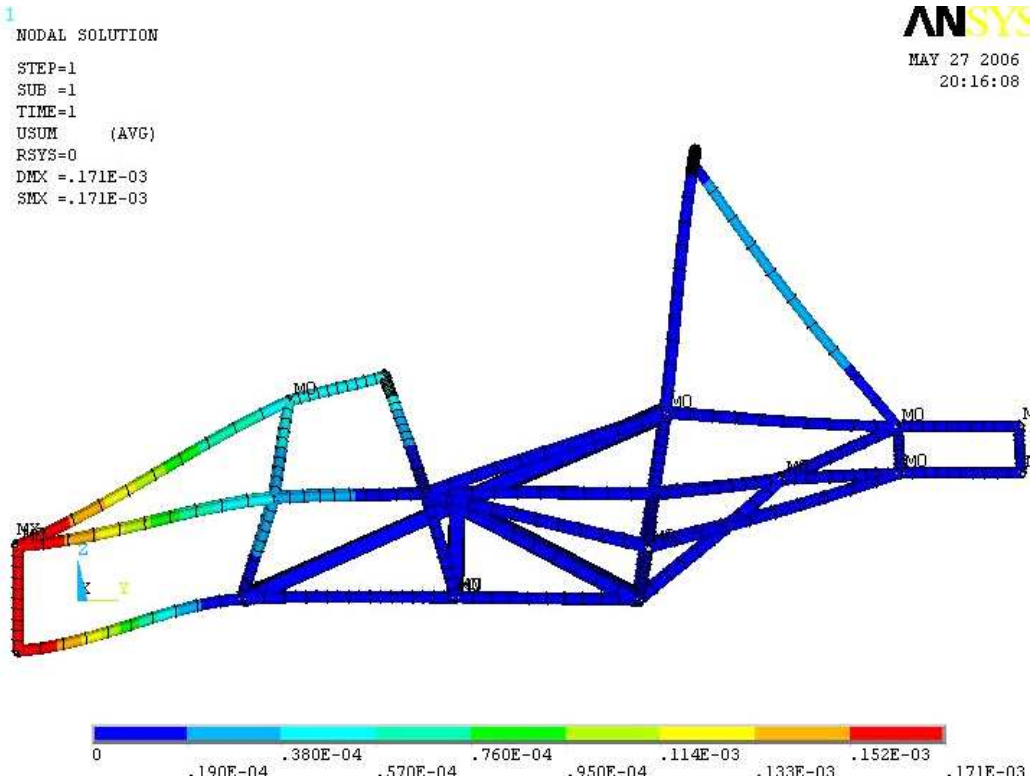


Figura 41. Desplazamientos totales en cada punto en la frenada (chasis final).

La tensión máxima de Von Mises es de 31.3 MPa. La distribución es muy similar a la del chasis base (Figura 32), concentrándose en los puntos de unión con el motor y en la parte frontal del vehículo.

7.4.3 Aceleración

En este caso la deformación máxima alcanzada en el chasis es de 0.23 mm (Figura 42), alcanzando una deformación en el eje longitudinal del coche de 0.03 mm máxima, y una deformación mínima de -0.02. Estas deformaciones son muy pequeñas y en ningún caso ponen en peligro el correcto funcionamiento del monoplaza.

La tensión máxima de Von Mises alcanzada en este caso es de 43.6 MPa, con una distribución similar a la de la frenada del chasis base (Figura 33). El valor alcanzado no hace peligrar la estructura, es una tensión baja y se encuentra concentrada en la zona de unión del chasis y del motor. Por lo tanto la estructura pasa también esta prueba de forma satisfactoria.

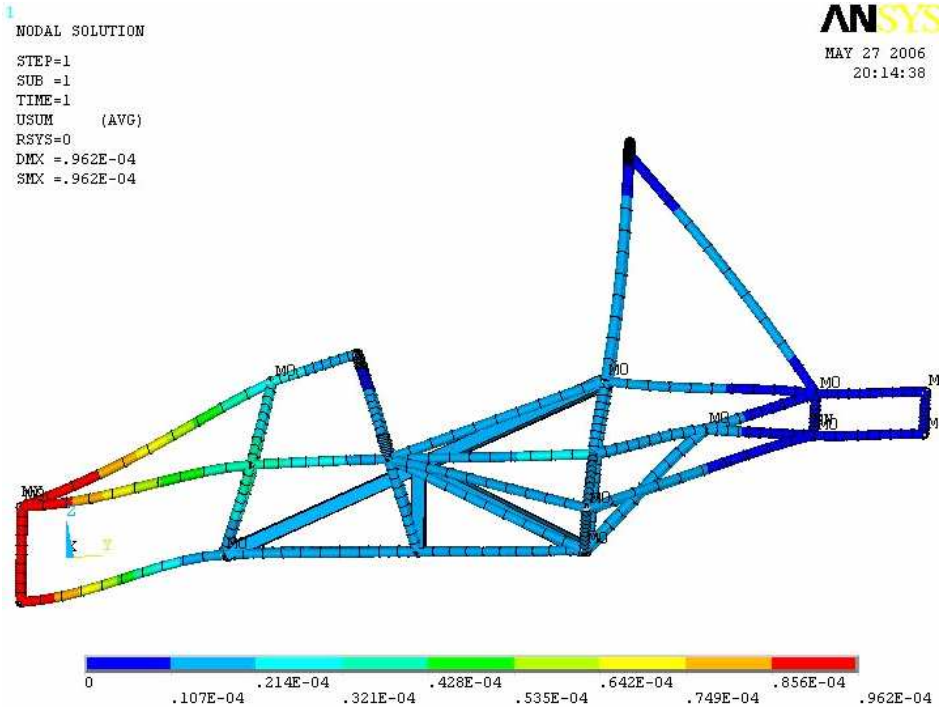


Figura 42. Desplazamiento total de cada punto en la aceleración (chasis final).

7.4.4 Curva

El desplazamiento máximo de un punto al someter al chasis a la aceleración de la gravedad y a una lateral de 1.3g ha sido de 0.5 mm. El desplazamiento lateral del chasis ha alcanzado un valor máximo de 0.49 mm en sentido centrífugo y de 0.07 en sentido centrípeto. Las deformaciones son pequeñas al igual que en los casos anteriores, como era de esperar el comportamiento de la estructura es el correcto.

La tensión máxima asciende en este caso a 147 MPa, que siendo una tensión considerable, está dentro de los límites que soporta el material. Esta tensión se da en la zona crítica de tensiones en cuanto a este tipo de estructuras se refiere, los puntos en los que la zona delantera se une a la trasera por medio del motor. El resto de la estructura se encuentra sometida a esfuerzos mucho más pequeños. La distribución de las tensiones se puede observar en la Figura 43.

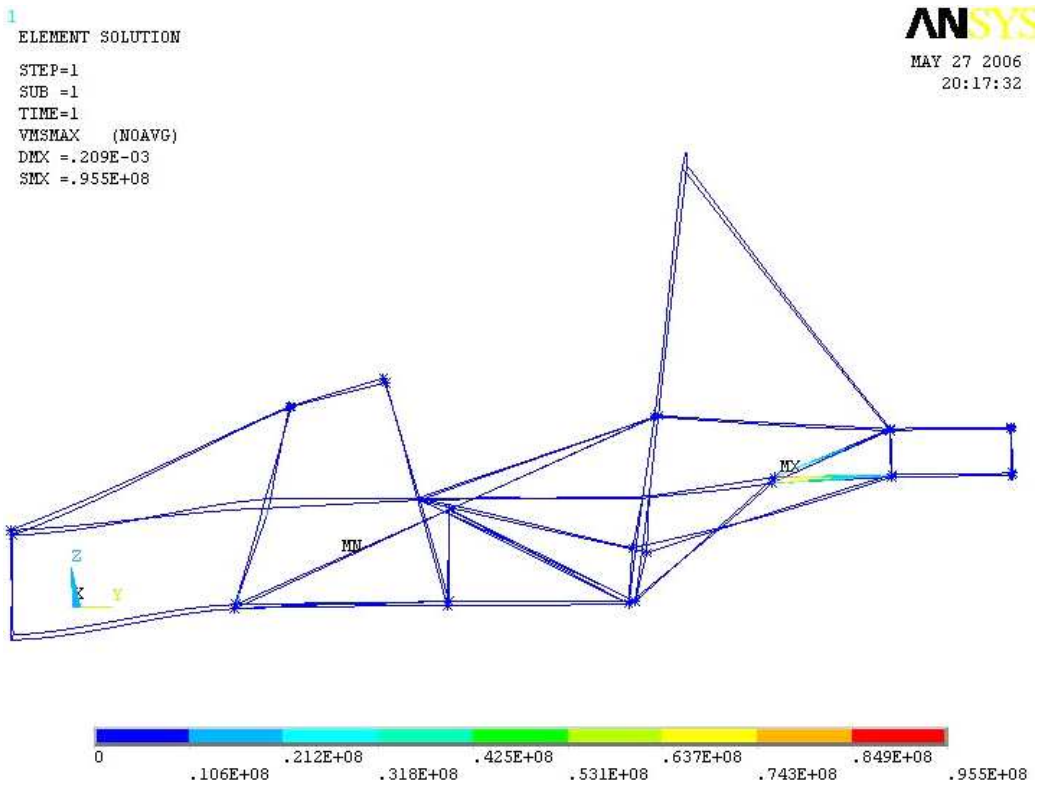


Figura 43. Tensión máxima de Von Mises en cada punto en curva (chasis final).

7.4.5 Torsión

Como se pudo comprobar anteriormente, esta es la prueba crítica en el estudio de un chasis. Conseguir un diseño que soporte bien esta simulación es lo más complicado del estudio de este modelo, y por otro lado si se consigue, se está obteniendo un chasis que será la base de un buen comportamiento del monoplaza en la pista.

Los cambios en el diseño efectuados para pasar del chasis base al final tenían el objetivo de mejorar los resultados de esta simulación. Al someter al chasis final a la torsión de 3000 N·m/grado se obtuvo una deformación máxima de 6.6 mm frente a los 16.8 mm de deformación que se daban en el chasis base.

El desplazamiento en el eje z (se utiliza para obtener el ángulo girado, Figura 45) presenta un máximo de 5.3 mm y un mínimo de -5.3 mm. En el chasis base se obtenían unos desplazamientos máximos y mínimos según la vertical (eje z) de 10.5 mm. En los puntos dónde se sitúan las suspensiones delanteras y se mide la torsión los desplazamientos son 4.1 mm y -4.1 mm en el lado opuesto. Esto supone un ángulo de torsión de 0.98º.

La tensión máxima de esta prueba alcanza 386 MPa. Se ha reducido casi a la mitad la tensión máxima que en el chasis base alcanzaba los 665 MPa. La tensión máxima se da en este caso en varios puntos de la zona dónde van ancladas al chasis las suspensiones delanteras. En los puntos de unión del motor al chasis también se alcanzan valores altos de tensión.

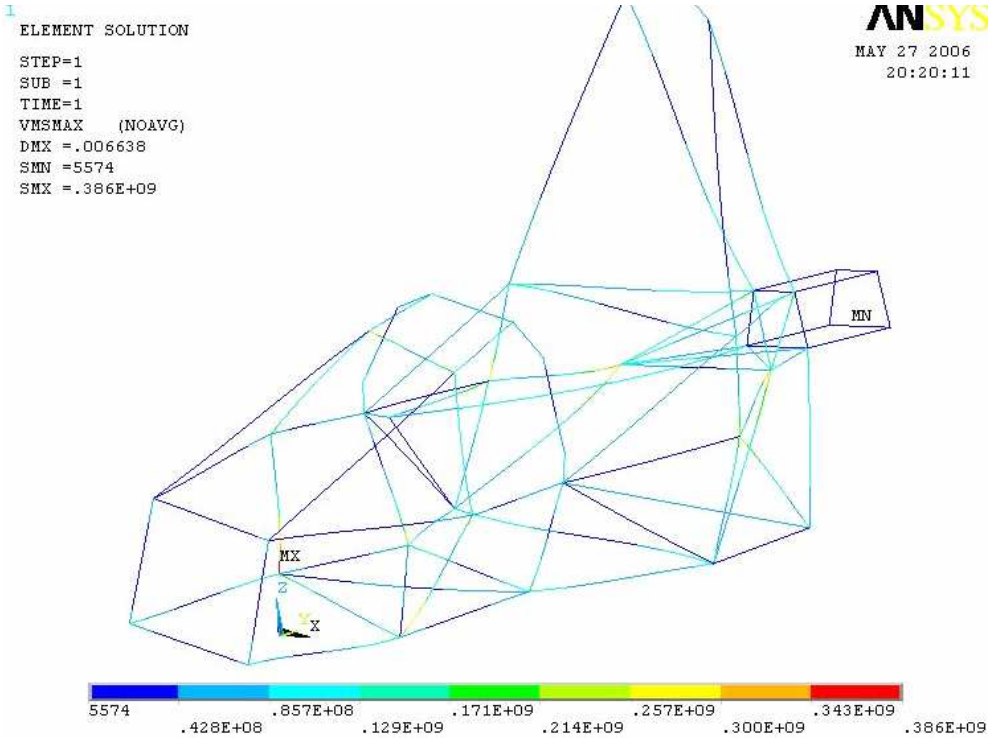


Figura 44. Tensión de Von Mises máxima en cada punto, torsión (chasis final).

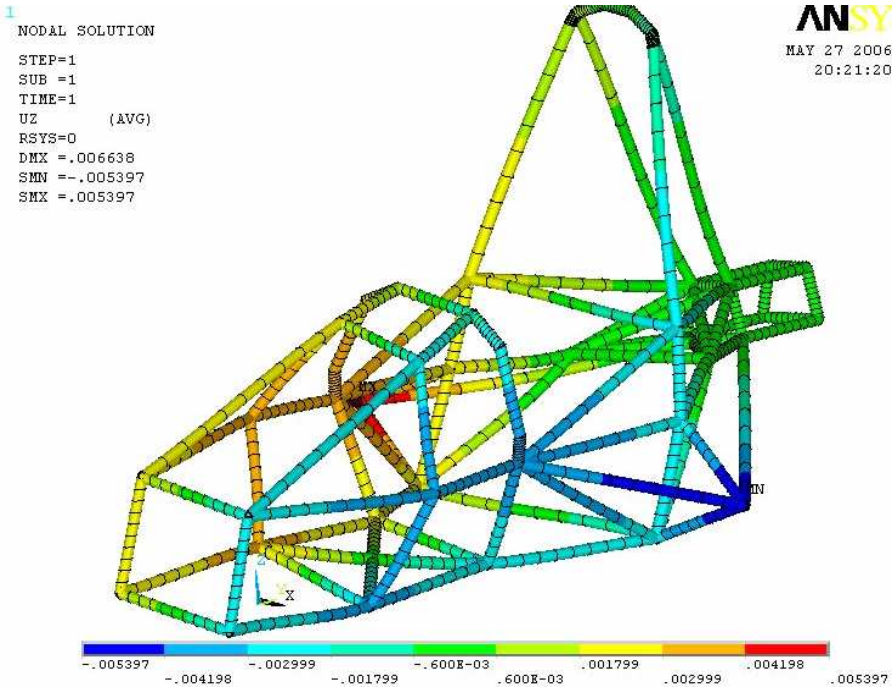


Figura 45. Desplazamientos en el eje z, torsión (chasis final).

7.4.6 Conclusiones

Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, el chasis presenta la siguiente resistencia a torsión:

- Par ejercido: 3000 N·m.
- Grados de deformación: 0,98º.
- Resistencia final a torsión: $\frac{3000}{0.98} = 3061.2$ N·m/grado.

Se ha conseguido sobrepasar el valor de 3000 N·m/grado, cifra que varios equipos consideran como ideal para esta competición, y se ha logrado utilizando tan solo 3 tipos de secciones, lo que supone que todavía existe margen de mejora. El peso del chasis en el modelo final es de 31.55 kg, que sin ser el más ligero de los que se encuentran en la competición (los tubulares de acero más ligeros pesan sobre 27 kg) sí que es un valor competitivo.

Como conclusión final se puede decir que el diseño es mejorable pero que se han alcanzado altos valores de rigidez torsional sin utilizar para ello un chasis pesado, con lo que el diseño final se puede considerar realmente competitivo.

7.5 Primer chasis de la universidad

Con la intención de adquirir conocimientos y experiencia a la hora de la fabricación, para realizar las soldaduras y las distintas uniones, la universidad ha adquirido un primer conjunto de tubos para realizar el primer chasis a modo de prueba, y comprobar así en la práctica cuáles son los principales problemas en la fabricación del mismo. Los tubos adquiridos para este primer chasis son tubos de acero, todos de la misma sección y sin ningún tipo de tratamiento especial. Para este primer chasis la elección de los tubos se ha centrado en el coste.

Lo que se pretende en este apartado es comprobar brevemente que el chasis construido con ese tipo de tubos resiste los esfuerzos normales y básicos del automóvil, aunque no sea un chasis apto para la competición.

Los tubos utilizados tienen un radio exterior de 13.5 mm y un espesor de 2.6 mm.

En la prueba de remolque la deformación máxima en el sentido longitudinal del coche fue de (sentido desde la parte delantera a la trasera) 0.3 mm y de -0.2 mm en sentido contrario. La tensión máxima alcanzada en esta prueba fue de 17.2 MPa.

La deformación máxima en la frenada es de 0.5 mm. La deformación máxima en el eje y fue de 0.006 mm y la mínima de – 0.1 mm. Los puntos sometidos a máxima tensión son los de la unión con el motor, con una tensión máxima de 31.3 MPa.

En la aceleración se ha alcanzado un desplazamiento máximo de 0.2 mm. Los desplazamientos en el eje longitudinal del coche han alcanzado un máximo de 0.03 mm y un mínimo de -0.02 mm. La tensión máxima alcanzada en esta prueba es de 43.6 MPa.

El desplazamiento máximo que se da en el chasis al pasar por una curva es de 0.5 mm, y la tensión máxima alcanzada es de 147 MPa.

En el ensayo de torsión se alcanza un desplazamiento máximo en el eje z de 4,3 mm. En los puntos dónde se mide la torsión el desplazamiento en z es de 3.02 mm y de -3.02 mm en el lado opuesto, lo que supone un ángulo de torsión de 0.72º. Esto supone un rigidez torsional de 4166.6 N·m/grado. El valor de la tensión máxima de Von Mises es de 270 MPa.

Este valor tan alto de resistencia a la torsión se debe a que este chasis ha sido construido con un único tipo de tubo, con una sección mayor que cualquiera de la de los tubos utilizados en el diseño teórico de la estructura. Este aumento de rigidez viene dado directamente por la sección de los tubos, que provoca también un aumento en el peso de la estructura. Este chasis tendrá un peso total de 47.46 kg, excesivo e inadmisible para un chasis de competición, pero perfectamente válido para chasis de prueba y para adquirir conocimientos y experiencia en la fabricación.

8

Consideraciones sobre la fabricación del chasis

8 Consideraciones sobre la fabricación del chasis

8.1 Introducción

Este capítulo está centrado en la fabricación del prototipo. El objetivo final de este proyecto es obtener un modelo de chasis con el cuál la Universidad pueda competir en la fórmula SAE. Para ello un factor muy importante es la fabricación. Se evaluarán distintas técnicas atendiendo a las ventajas y desventajas que se presentan, con el fin de proporcionar información en la cuál basarse para escoger el procedimiento más adecuado a la hora de la fabricación.

8.2 Tipos de acero

El chasis de este proyecto ha sido diseñado completamente en acero, queda para proyectos posteriores la posibilidad y estudio del uso de otros materiales en ciertas piezas que puedan mejorar el comportamiento de la estructura. En cualquier caso el material base de la gran mayoría de chasis en la fórmula SAE es el acero, posiblemente porque resulta un material relativamente barato, se puede soldar con facilidad, y si bien es más pesado que algunos materiales como el titanio (módulo de elasticidad 1.16e11 N/m^2 [W 18], densidad 4510 kg/m^3 [W 19]) o el aluminio (0.63-0.7e11 N/m^2 [W 18], densidad 2700 kg/m^3 [W 20]), también tiene un módulo de elasticidad mayor (2.1e11 N/m^2).

Los perfiles tubulares de acero pueden estar conformados en caliente, que pueden presentar costura o no, o conformados en frío que siempre van soldados.

Como el chasis está protegido de factores agresivos externos (lluvia…) por una primera barrera que forma el carenado, y por otro lado la mayor parte del tiempo el chasis está bajo techo, no es necesario utilizar aceros especiales, ni pinturas especiales que lo protejan de los fenómenos atmosféricos.

8.2.1 Acero conformado en caliente

El acero conformado en caliente presenta un tamaño de grano grande por lo que después de ser conformado ha de ser sometido a otro tratamiento para mejorar sus propiedades mecánicas ya que éstas mejoran con el tamaño de grano fino). Actualmente la implantación de los aceros microaleados, y la tecnología de nuevos

procesos han permitido eliminar los costosos tratamientos finales que eran necesarios para conseguir las propiedades mecánicas necesarias.

8.2.2 Acero conformado en frío o tibio

Esta técnica elimina los procesos finales obteniendo una ventaja competitiva en el mercado ya que el coste es menor. En algunos casos se puede obtener directamente la pieza final dentro de tolerancias, mientras que en el conformado en caliente es realmente difícil ya que no se tiene el control durante el proceso de contracción.

Por este método se consiguen buenas propiedades mecánicas sin necesidad de tratamientos térmicos posteriores. El laminado en frío de los perfiles proporciona un incremento del límite elástico debido al endurecimiento por deformación. Sin embargo este incremento puede utilizarse en el diseño solamente para perfiles RHS (perfiles tubulares rectangulares) en elementos a tracción y compresión, y no puede tenerse en cuenta si los miembros están sometidos a flexión.

Los tubos utilizados en este proyecto son de sección circular, con lo que no se considera el poder utilizar esta aplicación de los aceros. Además como se ha observado en los resultados obtenidos de las pruebas, las tensiones máximas no alcanzan valores demasiado altos en el funcionamiento normal del chasis, con lo que se puede escoger un acero de la Tabla 7 sin tener que someterlo posteriormente a ningún tratamiento.

8.2.3 Propiedades mecánicas y físicas

Existe en el mercado una gama variada de aceros con distintas propiedades mecánicas. Una de las principales opciones es la de poder escoger entre distintos límites elásticos. La Tabla 7 muestra una pequeña referencia a alguno de ellos.

Tipo de acero	**Límite elástico [N/mm^2]**
S235	235
S275	275
S355	355
S460	460

Tabla 7. Tipos de acero y límites elásticos según EN 10210, parte 1.

En la Tabla 8 se muestran las propiedades físicas recomendadas, válidas para todos los aceros estructurales.

Módulo de elasticidad	E = 210000 N/mm^2
Módulo de elasticidad transversal	G = $\frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$ = 81000 N/mm^2
Coeficiente de Poisson	ν = 0.3
Coeficiente de dilatación lineal	α = 12·10^{-6}/ºC
Densidad	ρ = 7850 kg/m^3

Tabla 8. Propiedades físicas de los aceros estructurales.

8.2.4 Soldabilidad del acero

El parámetro fundamental de los aceros desde el punto de vista de la soldabilidad es el valor de carbono equivalente (CEV), que se establece para cada tipo de acero según la siguiente fórmula que depende de sus componentes.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Cada elemento químico representado en la fórmula ha de ser sustituido por su valor en tanto por ciento.

Este parámetro mide en parte la susceptibilidad de fractura en frío de la zona afectada térmicamente.

Para espesores inferiores a 16 mm se considera que si el CEV es menor que 0.4 no aparecerán grietas. Si está entre 0.4 y 0.45 dependerá del proceso de soldadura utilizado. Si es superior a 0.45 se necesitará un precalentamiento.

La finalidad del precalentamiento es favorecer las transformaciones metalúrgicas a estructuras más blandas, reduciendo de este modo la fragilidad del material. Las consecuencias favorables del precalentamiento son:

- Reduce las tensiones de la zona afectada térmicamente.
- Facilita la difusión del hidrógeno.
- Disminuye el riesgo de formación de poros.

La soldabilidad del material mejora con el bajo contenido de carbono en el acero, así como con la microestructura de grano fino que reduce la posibilidad de fractura frágil del material. Se denominan aceros de grano fino a los aceros con un índice equivalente de tamaño de grano ferrítico igual o mayor que 6, determinado según la Euronorma 103:1971.

8.3 Corte del material

Se suelen utilizar dos métodos para el corte de perfiles tubulares, el corte por aserrado y el corte por soplete. El corte por aserrado presenta la ventaja de que es más barato y su ejecución es más sencilla. Con el corte por soplete se puede obtener un acabado mejor en la zona de corte, pero en este caso no es necesario porque al final siempre se tendrá que realizar una preparación de los extremos de los tubos para la soldadura.

Se pueden utilizar distintas herramientas para el corte de los tubos de sección circular, siendo una de las más comunes la sierra circular, de avance hidráulico o manual. Otras posibles herramientas de corte son la fresadora, la muela de rectificar... La elección para el proceso de fabricación en la universidad dependerá sobre todo de la disponibilidad de herramientas y no tanto de las ventajas o inconvenientes de cada una.

Para la unión entre tubos, dependiendo de la calidad que se requiera en la soldadura, se pueden escoger distintos tipos de preparación. Si se necesita una precisión alta se prepararán los extremos de los tubos con la curva de intersección que depende de los radios relativos entre los elementos a soldar, por el contrario si no se necesita una precisión alta puede hacerse un corte plano que se aproxime a la curva mencionada anteriormente como muestra la Figura 46.

En la distancia que queda entre los tubos al utilizar este tipo de unión influyen diversos factores tales como el número de planos de corte, los diámetros de los tubos, los espesores…en general todos los parámetros de la geometría. Por ello existen tablas normalizadas de recomendaciones en este tipo de uniones.

Otra desventaja de este tipo de unión es que el coste del material aportado en la soldadura aumenta ya que la cantidad es mayor.

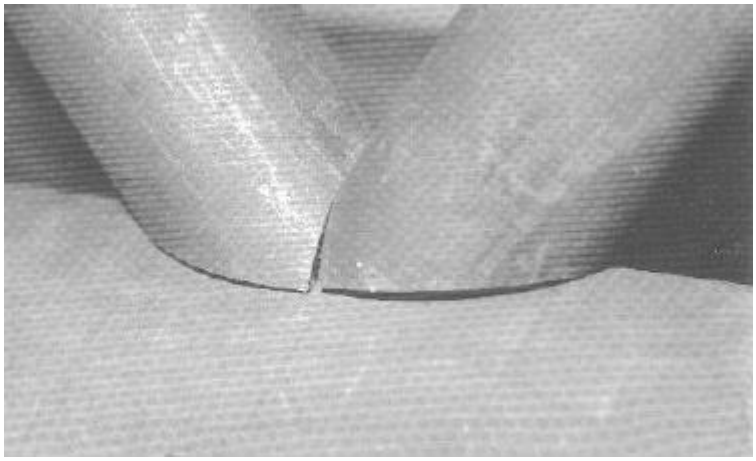


Figura 46. Unión de tubos con corte plano.

8.4 Métodos de curvado

En este proceso pueden aparecer pliegues en la parte interna del material y reducirse el espesor de la parte externa. El material utilizado influye directamente en la formación de estos defectos.

Los parámetros del material que influyen en los defectos de este proceso:

- Bajo límite elástico.
- Alta resistencia última del material
- Considerable alargamiento en la rotura a tracción.

Factores geométricos:

- Espesor del perfil con respecto al diámetro del perfil de sección circular hueca.
- Relación del radio de curvado con respecto al diámetro del perfil (radio mínimo regulado por las normas SAE, radio de curvado mínimo, 3 veces mayor que el diámetro exterior del tubo).

8.4.1 Curvado en frío por presión

Se coloca el perfil entre dos rodillos fijos (en los extremos), mientras que se ejerce presión con un rodillo central curvando el perfil.

Figura 47. Esquema del curvado por presión.

En este proceso es necesario tener en cuenta el diámetro del rodillo que ejerce la presión en función del radio de curva que se desea, así como la separación de los rodillos.

8.4.2 Curvado en frío mediante caja

Este proceso no es muy útil en el caso de la fabricación del chasis, ya que la curvatura debe darse cerca de los extremos del tubo y tener que realizar muchas curvaturas iguales para que salga rentable, puesto que la caja que sirve de guía tiene un coste bastante alto. Las curvas en los tubos del modelo no son muy numerosas y además se dan en zonas centrales del tubo con lo que este proceso pierde su atractivo, ya que reduce costes sólo para altas cantidades de producción.

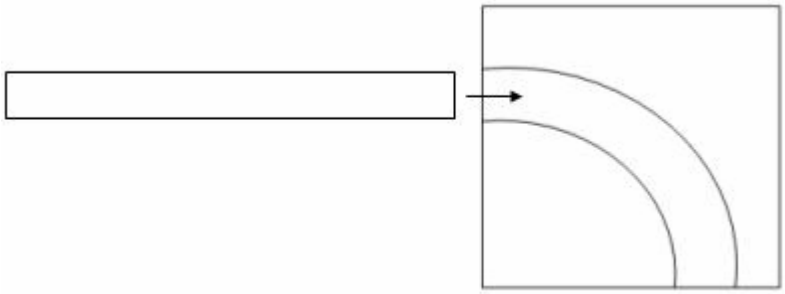


Figura 48. Esquema de curvado en frío con caja.

8.4.3 Curvado por rodillos giratorios

Es una de las técnicas más utilizadas por los fabricantes que necesitan curvar tubos. El radio de los rodillos depende del radio del perfil y para obtener el radio de curvatura se debe tener en cuenta la separación de los rodillos.

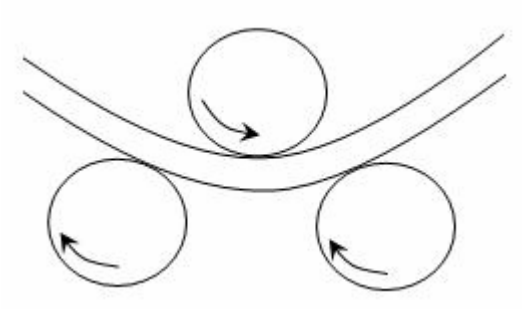


Figura 49. Esquema de curvado en frío con rodillos giratorios.

Para conformado en frío, el límite mínimo de radio de curvatura es aproximadamente igual a 5 veces el diámetro exterior del perfil.

Por lo tanto, si se quiere hacer una curvatura de radio 3 veces el diámetro exterior (límite mínimo de las normas SAE) habrá que pensar en utilizar este método sin ser en frío.

8.4.4 Curvado por cortes a inglete

Consiste en cortar el perfil con el ángulo deseado y soldarlo al siguiente extremo del tubo para conseguir de este modo la curva deseada.

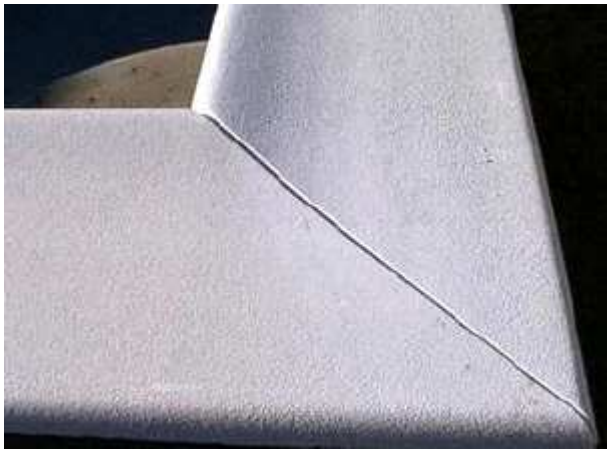


Figura 50. Curva mediante corte a inglete.

En la Figura 50 se puede observar una curva de 90º realizada por corte a inglete. En otros casos se pueden realizar curvas con ángulos menores y realizadas por diversos cortes con los que se crea un perfil de la curva más “suave”.

8.5 Métodos de soldadura

Centrándose en el equipo la soldadura puede ser manual, con máquina semiautomática o completamente automática. Las dos primeras predominan en la unión de los perfiles tubulares.

En la unión de perfiles tubulares la técnica de soldadura más utilizada es la soldadura por arco. Tres métodos que se comentan a continuación de este tipo de soldadura son los más utilizados para las uniones de los perfiles tubulares.

8.5.1 Soldadura por arco manual con electrodos revestidos (Shield Metal Arc Welding. SMAW).

En este proceso el recubrimiento del electrodo forma una capa de escoria que protege el baño fundido. La composición del revestimiento es muy compleja, se suele tratar de varias sustancias orgánicas y minerales. Anteriormente se utilizaba asbesto, prohibido hoy en día por efectos nocivos.

El revestimiento cumple tres funciones:

Eléctrica:

- El revestimiento de los electrodos facilita el cebado y la estabilidad del arco.

Física:

- Forma un gas protector en el camino que han de seguir las gotas de metal fundido, y posteriormente forma una capa de escoria que protege el metal fundido del contacto con el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno del aire.
- El revestimiento se funde a una velocidad lineal inferior a la del metal con lo que al final del electrodo queda una porción de revestimiento que sobresale formando un pequeño cráter, cuya función no es otra que la de ayudar a posicionar correctamente el material fundido.

Metalúrgica:

- La escoria reduce la velocidad de enfriamiento de la soldadura por su efecto aislante.

- Elimina impurezas reduciendo el número de inclusiones.
- Aísla el baño de elementos no deseados, ya sea por medio de la escoria o por medio de un gas protector.

Hay una gran gama de revestimientos, cuya elección depende del resultado deseado, de los materiales empleados, de las condiciones de la soldadura…

Una de las características principales por las que se utiliza este proceso es por su versatilidad, tanto en taller como a pie de obra.

Los espesores soldados por este proceso suelen ser superiores a 1.5 mm. Sus aplicaciones más comunes son la construcción naval, estructuras, calderas…

Este sistema se puede utilizar para efectuar trabajos submarinos aunque el caso más general en el que se utiliza es el de estructuras sometidas a cargas estáticas.

8.5.2 Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible (GMAW).

En un principio se utilizaban gases inertes (MIG), pero dado el elevado precio que presentaban se comenzaron a utilizar gases activos (MAG).

En este proceso se produce un arco entre el electrodo de hilo continuo y la pieza a soldar, mientras que el entorno se encuentra protegido por uno de los gases mencionados anteriormente.

Este proceso puede ser semiautomático, automático o robotizado. En el último caso se determinan las coordenadas y todos los parámetros de la soldadura tales como velocidades, temperaturas…y posteriormente es un brazo robotizado el que realiza el trabajo.

El gas inerte más empleado en Europa es el Argón mientras que en Estados Unidos se utiliza más el Helio.

Al realizar una soldadura MAG, el gas activo utilizado va a desprender O_2 con lo que podría oxidar la soldadura, en este caso es importante utilizar en el material de aporte elementos desoxidantes.

Las ventajas de este proceso se presentan a continuación:

- Ausencia de escoria.
- Alimentación automática del hilo.

- La gran densidad de corriente que admite.
- Gran flexibilidad de regulación.

De las características técnicas anteriores se derivan las siguientes ventajas:

- Reduce el tiempo y el coste de las operaciones.
- No se requiere un operario tan experimentado como en el otro proceso.
- Se obtiene un alto rendimiento de soldeo con buena calidad.
- Buena seguridad e higiene.
- Evita impurezas en el baño fundido.
- Versátil, ya que es un proceso aplicable a una gama alta de materiales.

Sin embargo presenta las siguientes limitaciones:

- El ambiente en el que se suelda no puede ser agitado, de lo contrario se pierde protección gaseosa.
- Tiene menos movilidad que el proceso SMAW.
- La gama de los materiales de aporte es limitada.
- Hay que aplicarlo correctamente o sino se corre el riesgo de tener una falta de fusión.
- El defecto de la porosidad es más frecuente en este proceso de soldeo.

A continuación, la Tabla 9 muestra las diferencias existentes entre el proceso MIG y MAG.

Criterio	MIG	MAG
Gas de protección	Normalmente Argón	CO_2 o mezclas
Generador	Potencial constante o característica descendente (gran capacidad)	Potencial constante
Metales a soldar	Acero inoxidable, cobre y aluminio	Sólo aceros ordinarios
Espesores a soldar	Medios y gruesos	Todos
Posiciones de soldeo	Sólo fáciles	Todas
Visibilidad	Buena	Regular
Limpieza bordes	Exige mucha limpieza	Admite piezas oxidadas
Humos	Poco molestos	Pueden ser nocivos

Tabla 9. Diferencias entre MIG y MAG.

8.5.3 Soldadura con núcleo de fundente (FCAW)

Es un proceso de soldadura similar al anterior pero en este caso se evita utilizar la atmósfera de gas de protección, en vez de ello el electrodo cuenta con un núcleo central que al fundirse realiza la función de protección.

En este caso, como en el anterior, el proceso es más o menos rápido y no se necesita una experiencia especialmente alta para llevarlo a cabo. Por este método se pueden soldar acero dúctil, inoxidable y aluminio.

8.6 Punteado de la soldadura

El punteado de la soldadura es una técnica que se utiliza para mantener los perfiles unidos con unos puntos de soldadura, y así realizar la soldadura final con mayor comodidad. Debe ser realizado por un soldador experimentado ya el punteado formará parte de la soldadura final, y si no se realiza del modo adecuado debilitará considerablemente la soldadura.

8.7 Tratamientos térmicos previos y posteriores a la soldadura

En los aceros sin alear no es necesario normalmente un precalentamiento. Sólo si la temperatura ambiente es inferior a 5ºC y el espesor mayor de 30 mm se recomienda el precalentamiento.

Después de haber realizado la soldadura se puede realizar un tratamiento térmico para aliviar las tensiones provocadas por el proceso. Este tratamientos e suele realizar a una temperatura entre 530ºC y 580ºC.

En la unión soldada de perfiles tubulares las tensiones residuales pueden estar causadas por distintos factores como:

- Espesor de la soldadura.
- Número de pasadas de la soldadura.
- Ángulo de inclinación existente entre los ejes a unir.
- Secuencia de la soldadura.
- Método para soldar.

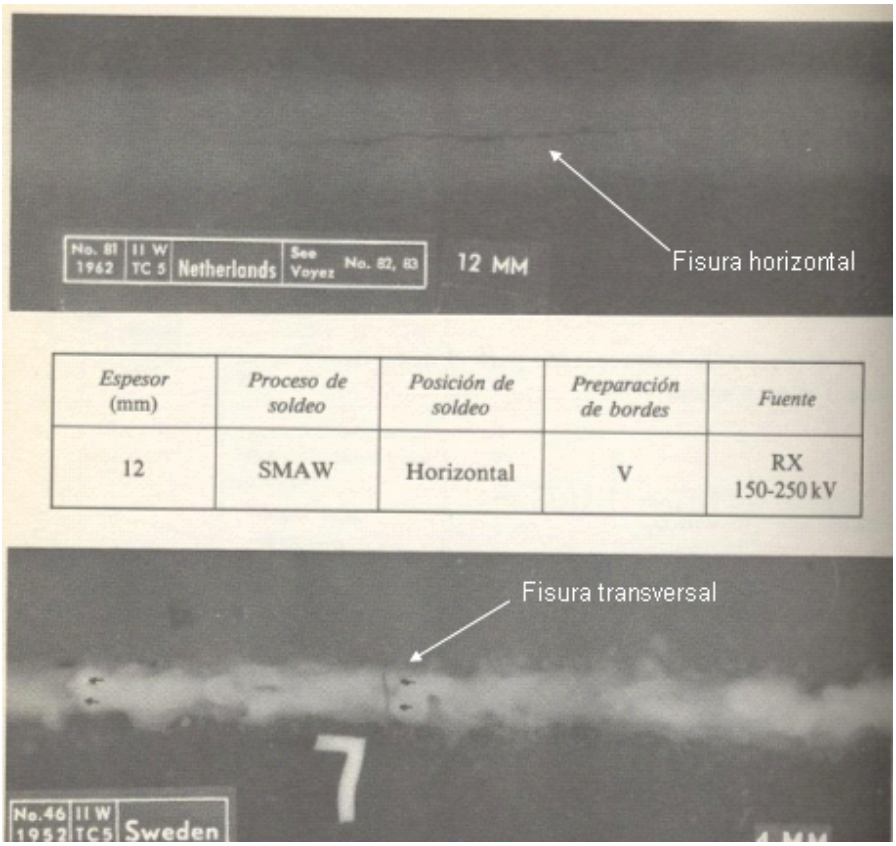
Las deformaciones posibles causadas por las tensiones de soldadura pueden ser tratadas posteriormente con trabajos de alineamiento o anteriormente mediante predeformaciones. También se pueden reducir las deformaciones por el calentamiento de ciertas zonas.

8.8 Defectología de las uniones soldadas

Existen diferentes defectos en la soldadura que se tratan a continuación.

8.8.1 Fisuras

Existen diferentes tipos de fisuras (Figura 51): microfisuras, transversales, longitudinales, radiales, de cráter, discontinuas…



Espesor (mm)	Proceso de soldeo	Posición de soldeo	Preparación de bordes	Fuente
12	SMAW	Horizontal	V	RX 150-250 kV

Figura 51. Radiografía de soldaduras con distintos defectos de fisuras [Rein86].

Las más graves son las fisuras superficiales y perpendiculares a la dirección de máxima solicitación. Las fisuras internas, aunque son de menor severidad pueden agravarse en caso de fatiga.

Las causas más probables de que aparezca este defecto son las siguientes:

- Excesiva rigidez de la pieza, suele darse en aceros con excesivo contenido de C, Mn, S y P.
- Uso de electrodos equivocados para el material que se va a soldar.
- Un fallo en el proceso al soldar. Puede ser un enfriamiento demasiado rápido por un precalentamiento insuficiente, por una baja energía aportada al proceso o por factores externos tales como: lluvia, viento…
- Se pueden ocasionar también si durante el proceso o en el periodo inicial de servicio la soldadura se encuentra sometida a vibraciones o a ambientes corrosivos.

8.8.2 Cavidades y porosidad

Los diferentes tipos son: sopladura, poro esferoidal, poros esferoidales distribuidos regularmente, poro pequeño abierto a la superficie…

Entre las causas más probables se encuentran:

- Aceros con excesivo contenido de C, S o P.
- Falta de limpieza en los bordes de la junta con posible presencia de óxidos hidratados.
- Excesiva longitud del arco.
- Mala técnica en el proceso.

Causas particulares del proceso SMAW:

- Electrodo demasiado caliente debido a intensidad excesiva.
- Revestimiento húmedo.
- Empleo de electrodos con el extremo desprovisto de recubrimiento.

8.8.3 Inclusiones sólidas

Existen diferentes tipos: inclusión de óxido, capa de óxido, inclusión metálica, inclusión de escoria…En la Figura 52 se muestra una radiografía de una soldadura con este defecto.

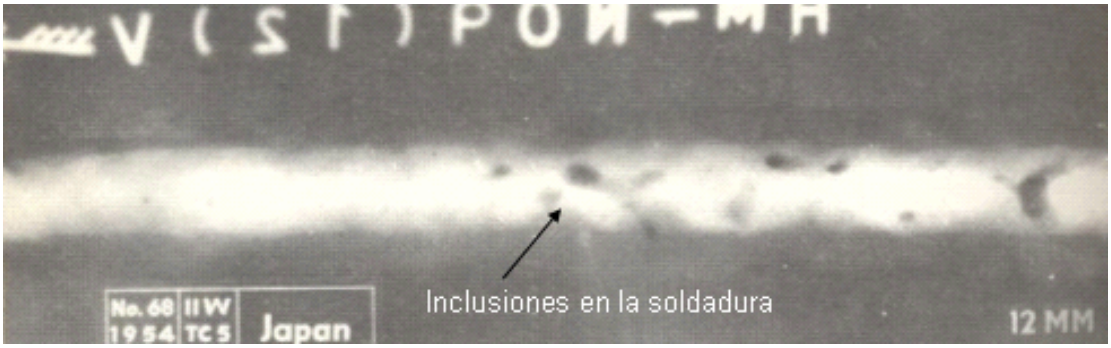


Figura 52. Radiografía mostrando las inclusiones en la soldadura [Rein86].

Las causas más probables son:

- Falta de limpieza de los cordones de soldadura en varias pasadas.
- Cordones mal distribuidos.
- Inclinación incorrecta del electrodo.
- Intensidad muy débil.

8.8.4 Falta de fusión

Es la falta de ligazón entre el metal depositado y el material base, o entre dos capas del metal depositado.

Las causas más probables son:

- Defectuosa preparación de bordes.
- Insuficiente energía aportada porque el arco es demasiado largo, se realiza con una intensidad muy débil o se hace con una excesiva velocidad de avance del electrodo.

8.8.5 Falta de penetración

Existe una fusión parcial de los bordes que da lugar a una discontinuidad en los mismos.

Las causas más probables de que se produzca este defecto son:

- Una separación de bordes incorrecta.
- Diámetro del electrodo demasiado grande.
- Excesiva velocidad de avance del electrodo.
- Baja intensidad en el proceso.

8.8.6 Defectos de forma

Puede haber distintos tipos como: mordedura, sobreespesor excesivo, convexidad excesiva, exceso de penetración...

Las causas más comunes son:

- Manejo del electrodo con una inclinación inadecuada.
- Electrodo demasiado grueso.
- Intensidad excesiva.

8.9 Inspección de las soldaduras

Existen dos tipos de ensayos para comprobar las soldaduras: las de ensayo destructivo y las de no destructivo. Las de ensayo destructivo se suelen realizar en el laboratorio antes de comenzar a soldar la estructura final. Las de ensayo no destructivo intentan detectar defectos en la soldadura para evitar posibles roturas en un futuro.

Las técnicas de ensayo no destructivo se tratan a continuación, describiendo brevemente en que consiste cada una.

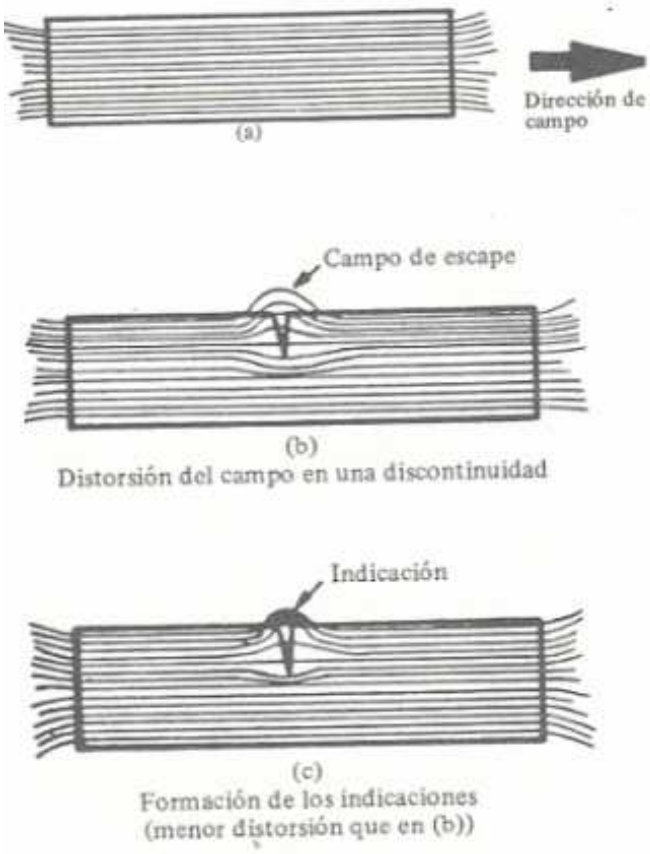
8.9.1 Inspección visual

La inspección visual debe realizarse en un primer momento cuándo los materiales llegan al almacén, posteriormente en el momento de comenzar la soldadura y tras finalizar el proceso. Esta técnica llevada a cabo por un operario con experiencia puede detectar bastantes fallos, con la reducción de coste que puede suponer para la empresa el corregirlos a tiempo.

Los instrumentos necesarios para este tipo de inspección son: galgas, dispositivos de iluminación, reglas metálicas, termómetros, lupas…

8.9.2 Inspección mediante partículas magnéticas

Es un método rápido para descubrir ciertos defectos como las fisuras superficiales de pequeño tamaño. El ensayo consiste en pulverizar partículas magnéticas sobre la superficie a comprobar. Posteriormente se aplica un campo magnético a la superficie que sufre ciertas distorsiones si existen defectos tales como fisuras. Las distorsiones en el campo magnético hacen que las partículas se dispongan a lo largo del defecto situándolo. Posteriormente se toman fotografías para registrar la medición. La Figura 53muestra un esquema del proceso.



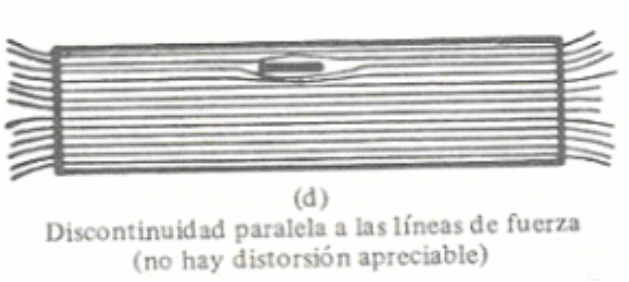


Figura 53.Esquema del proceso de inspección por partículas magnéticas [Rein86].

8.9.3 Inspección mediante líquidos penetrantes

En este ensayo se dispone una capa de líquido especial sobre la soldadura, el líquido penetra por capilaridad en los defectos existentes. Posteriormente se elimina el líquido superficial, pero el que ha penetrado se mantiene descubriendo el defecto.

8.9.4 Inspección por ultrasonidos

El proceso consiste en un palpador que vibra a alta velocidad produciendo ondas ultrasónicas que atraviesan el material. Tras tomar las mediciones necesarias se pueden detectar defectos internos y superficiales.

8.9.5 Inspección radiográfica

Se realiza una radiografía de la soldadura con la finalidad de obtener una imagen nítida y establecer de este modo los defectos que se han producido durante el proceso.

La inspección radiográfica goza de gran aceptación entre los métodos no destructivos ya que es el único que proporciona un documento real de la inspección, ya que la placa radiográfica puede ser consultada años más tarde si se ha guardado en las condiciones adecuadas.

En general el método visual es el más utilizado siempre y cuando se disponga de un operario con la experiencia suficiente para ofrecer cierta garantía.

8.10 Uniones soldadas

Dentro de la gran gama de uniones que existen en la soldadura, se puede hablar de dos grandes subconjuntos, las uniones directas y las indirectas.

Las directas son aquellas en las que los tubos o piezas se sueldan una a la otra directamente.

Las indirectas tienen un elemento de unión entre las dos piezas, como por ejemplo una pletina (Figura 54) o cartela. Es posible que en los puntos en los que el diseño del

chasis exige la unión de más de tres tubos, se tenga que pensar en una unión indirecta si no se dispone una tecnología alta de fabricación.

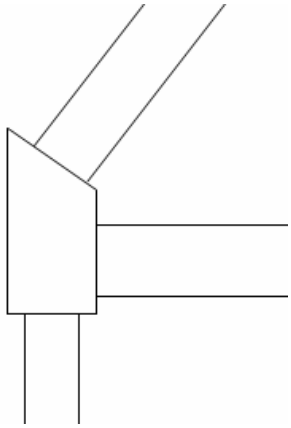


Figura 54. Esquema de una pletina en una unión indirecta.

8.11 Montaje

Para la facilidad de montaje es conveniente disponer de un bastidor ya sea en el taller (en el caso de este proyecto) o a pie de obra. En la fabricación del bastidor se deben tener en cuenta las contracciones de la soldadura para obtener con cierta precisión la estructura deseada.

Una de las formas típicas de construir un bastidor es sobre una mesa plana (en la Figura 55 se puede observar un bastidor fijo construido en madera sobre una mesa plana). La disposición y tecnología del bastidor (puede ser giratorio o estático) depende de diversos factores tales como el presupuesto disponible, la precisión final necesaria en la pieza, el número de piezas iguales a fabricar…

Figura 55. Bastidor de madera de la universidad de Montreal.

Otros factores a tener en cuenta para elegir el tipo de bastidor son el espacio disponible, la experiencia de la mano de obra, el equipamiento de soldadura disponible…

La elección de bastidor para la fabricación del chasis en la universidad será probablemente la de un bastidor en mesa plana fabricado de madera, ya que su construcción es relativamente sencilla y su coste no es elevado.

9

Futuras líneas de trabajo

9 Futuras líneas de trabajo

9.1 Introducción

El diseño y sobre todo la optimización de un chasis es un trabajo continuo, las nuevas tecnologías, las ideas nuevas en el diseño hacen que siempre sea posible dar un paso más en el desarrollo del modelo. En el siguiente capítulo se apuntarán algunas de las líneas de trabajo que han quedado abiertas en este proyecto y que son susceptibles de mejora.

9.2 Optimización peso-rigidez

Sin duda uno de los trabajos futuros en la mejora del chasis será mejorar esta relación entre peso y rigidez. El resultado obtenido en este proyecto ha cumplido los objetivos, se alcanzó una rigidez superior a la que la experiencia considera necesaria con un peso sólo 4 kg mayor que el de los chasis más ligeros de la competición.

La línea de trabajo para la mejora de esta característica pasa sin duda por cambios en el diseño. Realizar un estudio a fondo de las tensiones y deformaciones del chasis en las distintas pruebas es la base para cambiar el diseño y modificando la geometría del mismo ir poco a poco mejorando los resultados.

Aparte de los cambios en el diseño, una de las posibilidades mayores para mejorar los resultados es la utilización de nuevos materiales. En este proyecto no se ha estudiado la utilización de materiales tales como el aluminio que podrían sustituir al acero en los tubos sometidos a tensiones pequeñas, aligerando de este modo el modelo sin ocasionar una pérdida notable de rigidez. Otra opción son los tubos de materiales compuestos, que están dando unos resultados sorprendentes en ciertos ámbitos de la ingeniería. Sin ir más lejos, hoy en día comienza a ser común el disponer de este tipo de tubos en los cuadros de bicicletas. Hace menos de una década este tipo de estructuras estaban restringidas al ciclismo profesional pero cada vez se pueden obtener a un precio más bajo. La utilización de este tipo de materiales encarecería en gran medida el chasis, con lo que es necesario saber de que presupuesto se dispone para la construcción y valorar si vale la pena invertirlo en la utilización de este tipo de materiales de nueva tecnología. La amplia gama de materiales existentes hacen que el estudio de este campo pueda suponer grandes mejoras en el diseño.

Otra de las posibles líneas de trabajo para mejorar el chasis es el estudio de las secciones. Optimizar las secciones tubulares utilizadas en este proyecto ajustándolas al mínimo necesario para reducir peso, es uno de los primeros pasos que se han de dar para avanzar mejorando la estructura. La utilización de una nueva sección de tubo más pequeña, para las partes del chasis que no estén sometidas a mucha tensión y que no estén reguladas por las normas es otra de las opciones que se han de valorar ya que puede que los resultados obtenidos compensen el aumento de coste y de la dificultad del montaje.

9.3 Mejora del modelo para facilitar la fabricación

El modelo obtenido en este proyecto ha sido un chasis en el que se han tenido en cuenta ciertos aspectos de la fabricación, pero han quedado posibles alternativas sin estudiar como las que se exponen a continuación:

Uno de los puntos en los que se puede obtener una mejora mayor, atendiendo a facilidad de fabricación y montaje, es la unión entre tubos.

La mejor forma de unir los tubos, es mediante una unión directa, la misma que se ha utilizado en el estudio por elementos finitos del modelo. El problema es que dependiendo de la tecnología disponible en el taller y sobre todo de la experiencia del soldador, podría ser muy útil estudiar posibles modificaciones para facilitar las uniones entre tubos en los puntos en los que se juntan cuatro o cinco extremos. Los defectos de fabricación (en la Figura 56 se puede ver un ejemplo, las dificultad de fabricar las uniones aumenta con el número de tubos) pueden debilitar la estructura.

Para solucionar esto se pueden estudiar la utilización de uniones indirectas mediante pletinas o algún tipo de placa. Otra posible solución para facilitar las uniones es deformar el extremo del tubo hasta dejarlo con una forma plana, que resulta más fácil para soldar o para unir mediante tornillos. Hay que extremar las precauciones en este tipo de técnicas porque la deformación puede causar que aumenten las tensiones en la zona poniendo en peligro la unión.

Una de las soluciones adoptadas por más equipos y que parece dar mejor resultado es la utilización, en ciertas zonas del chasis, de secciones cuadradas o rectangulares (Figura 57) que facilitan enormemente las operaciones de soldadura y de montaje ya que el corte necesario en el tubo de sección circular es un plano.

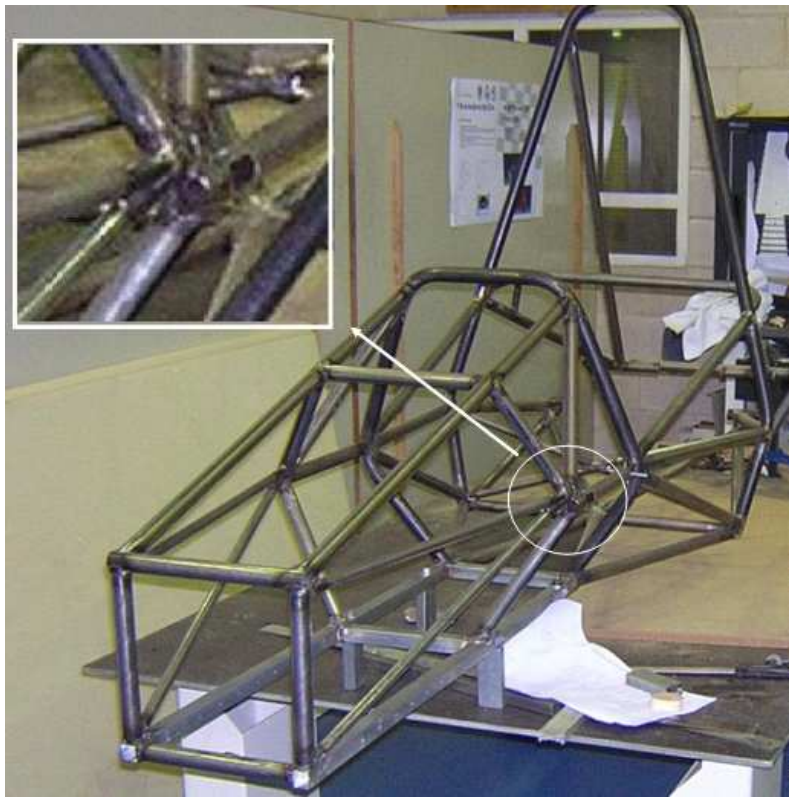


Figura 56. Defecto en la soldadura entre tubos.

Figura 57. Utilización de una sección rectangular facilitando la fabricación.

9.4 Modelo con suspensiones

Durante la realización de este proyecto se ha hecho un modelo de simulación en el que las restricciones de desplazamiento en las diversas pruebas (frenada, aceleración…) se realiza mediante un sistema de muelle y amortiguador simulando las suspensiones, en vez de restringir el desplazamiento de ciertos puntos como se presentó en el capítulo de resultados. No ha sido posible realizar las simulaciones con este modelo debido a la falta de datos sobre especificaciones técnicas de suspensiones reales en los monoplazas de la fórmula SAE. Se ha probado la

simulación con distintos valores de las constantes del muelle y del amortiguador para comprobar su correcto funcionamiento, pero al no obtener los datos reales o aproximados por parte del sector que se dedica a las suspensiones, se ha tomado la decisión final de desarrollar el modelo en función de los parámetros citados para que cuándo sean conocidos se obtengan los resultados de forma inmediata.

De todos modos, y como se explicó en el capítulo de resultados, la prueba que marca el correcto funcionamiento del chasis es la de torsión, en la que no intervienen las suspensiones. Las otras pruebas se realizan para comprobar que en situaciones reales el chasis no sufre deformaciones inadmisibles que pudiesen afectar al comportamiento del monoplaza. Se comprobó que el chasis respondía aceptablemente sin utilizar la simulación con las suspensiones, lo que representa una situación más desfavorable, con lo que las deformaciones reales, contando las suspensiones, serán todavía menores que las presentadas en el capítulo de resultados.

9.5 Mejora del mallado en ANSYS

En la fase final del proyecto se ha trabajado en el desarrollo de una simulación en la que el mallado fuese más complejo, obteniendo de este modo una solución que aporte más información sobre el comportamiento del chasis. Los elementos utilizados en las anteriores simulaciones de ANSYS fueron tubos de una longitud pequeña, lo que ofrece información muy útil para el desarrollo de la estructura (como la presentada en el capítulo 6), pero que limita el estudio en detalle de ciertas partes del modelo como pueden ser las uniones. Para solucionarlo se ha trabajado en el desarrollo de un mallado utilizando elementos mucho más pequeños obteniendo así una información importante para profundizar en el estudio de puntos críticos de la estructura. En la Figura 58 se puede apreciar la diferencia entre los dos tipos de malla comentados anteriormente.

Para realizar esta operación se ha utilizado el programa WORKBENCH, una aplicación de ANSYS que dispone de un mayor poder de mallado. El proceso a seguir es el de importar la geometría, realizada anteriormente en un programa de CAD, al WORKBENCH. En este entorno se realiza el mallado, exportándolo posteriormente al entorno clásico de ANSYS para realizar las distintas operaciones de solución y postproceso.

La geometría completa del chasis no se ha podido mallar totalmente en el WORKBENCH incluso disponiendo de mayor poder de mallado que con ANSYS. La

solución tomada fue la de importar al programa sólo la mitad simétrica del chasis, realizar el mallado, y al final y ya en el entorno de ANSYS realizar una simetría que devolviese de nuevo la geometría del chasis completa. De este modo se deslastra el problema del mallado (principal obstáculo), obligando al programa a realizar sólo la mitad de las operaciones que tendría que hacer con la geometría completa.

La dificultad radica en que es necesario profundizar en la utilización del software. El programa es complejo y requiere conocimientos avanzados sobre su funcionamiento ya que hay que controlar los parámetros de mallado y realizar un modelo de la geometría con bastante precisión, sino el WORKBENCH no consigue calcular una malla de esta cantidad de elementos.

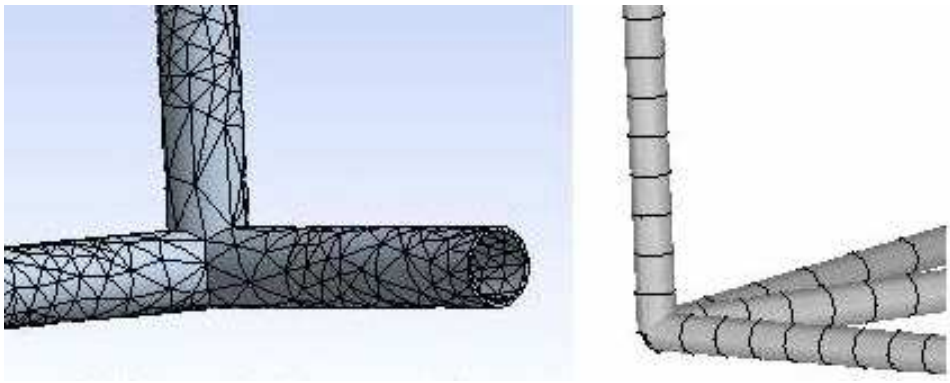


Figura 58. Comparación entre dos tipos de mallado.

Anexo

Cambios en el diseño

A Cambios en el diseño

A.1 Introducción

Este anexo pretende servir de ayuda a aquellas personas que quieran realizar un estudio más a fondo del proyecto. En este apartado se presentan las principales modificaciones que se realizaron en el modelo y los resultados que se obtuvieron de ellas. Un alumno que retome el proyecto para mejorar el diseño del chasis debe tener la máxima información posible sobre los pasos dados anteriormente para no repetir de este modo acciones que no dieron un buen resultado, con lo que se evitará cierta pérdida de tiempo.

A.2 Pasos intermedios en el diseño que no ofrecieron resultados aceptables

A.2.1 Side pods

En este proyecto se estudiaron otros dos modelos de side pods, los cuáles se evalúan a continuación.

El primero que se probó es el que muestra la Figura 59.

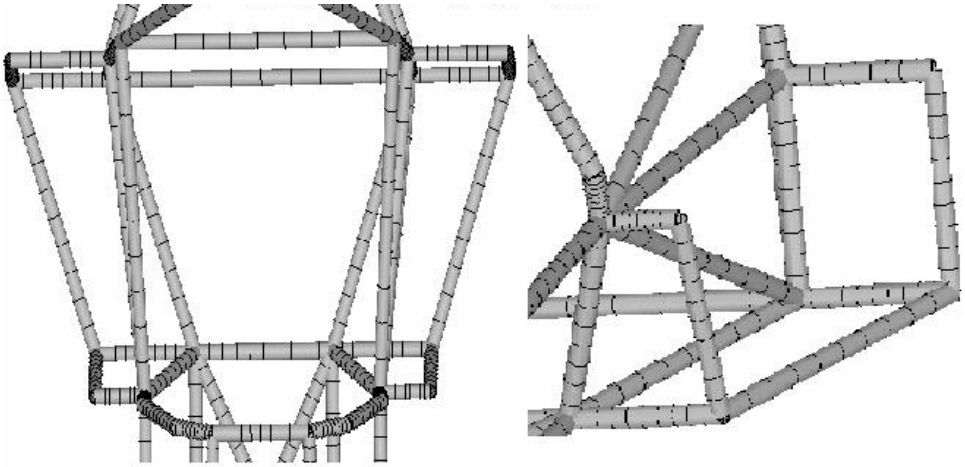


Figura 59. Modelo de side pods.

Se optó por este diseño en primer lugar porque era el que se aproximaba de una forma más sencilla a la forma final que tendría esa parte del carenado.

Los resultados que se obtuvieron con este diseño se presentan a continuación:

- En la prueba de torsión se obtuvo una deformación máxima y mínima de 7.7 mm (Figura 60). En los puntos utilizados para medir la deformación a torsión, el

desplazamiento en el eje z ha alcanzado los valores de 6.3 mm y – 6.3 mm, lo que supone una de formación de 1.51º.

- La rigidez obtenida por lo tanto con este modelo sería de 1986 N·m/grado.
- El peso del chasis es de 31.31 kg.

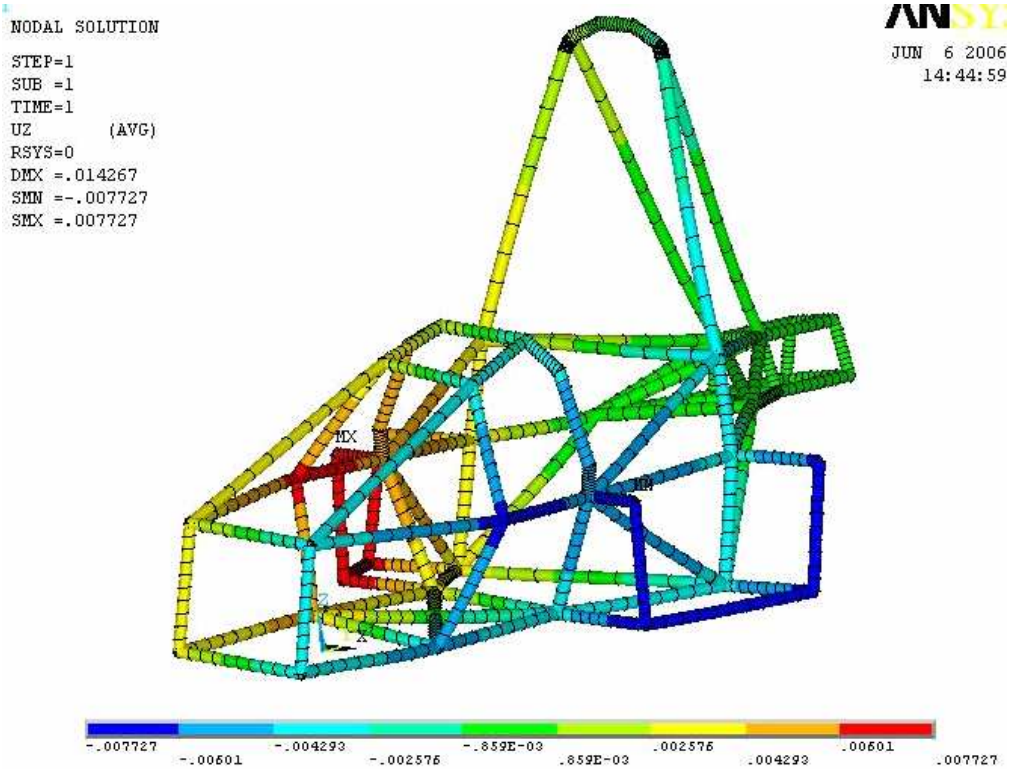


Figura 60. Desplazamiento en el eje Z, prueba de torsión.

Aunque el peso de este modelo es un poco inferior que el del diseño final (31.55 kg), la rigidez que presenta es realmente menor, una rigidez tan baja podría provocar un mal comportamiento en pista del vehículo.

En el resto de pruebas el modelo presentaba un comportamiento adecuado.

El siguiente modelo que se consideró fue el de añadir un tubo más a la estructura anterior como se muestra en la Figura 61 con el fin de aumentar la rigidez.

El resultado final fue:

- Una deformación de 6.2 mm y -6.2 mm que suponen una deformación de 1.49º.
- La rigidez del modelo es de 2013 N·m/grado.
- El peso de este diseño es 32.2 kg.

Se puede observar que la medida tomada aumenta la rigidez del diseño muy poco, pero aumenta en la misma medida el peso con lo que los resultados no son los esperados.

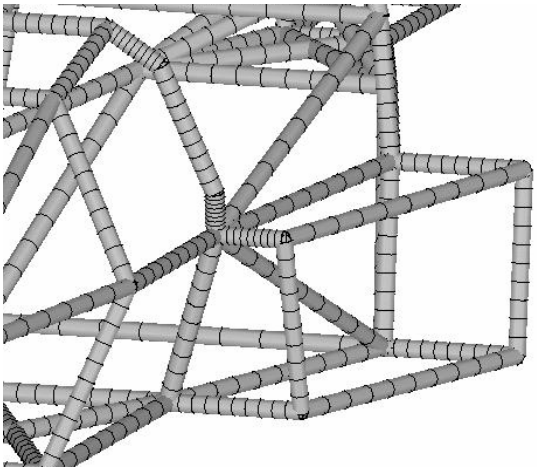


Figura 61. Modelo reforzado de side pods.

A.2.2 Cruz de refuerzo inferior

El diseño probado es el que se muestra en la Figura 62. Tras el buen resultado obtenido al reforzar la zona inferior de las suspensiones con una cruz, se extendió la estructura hasta el final para intentar aumentar más la rigidez del modelo.

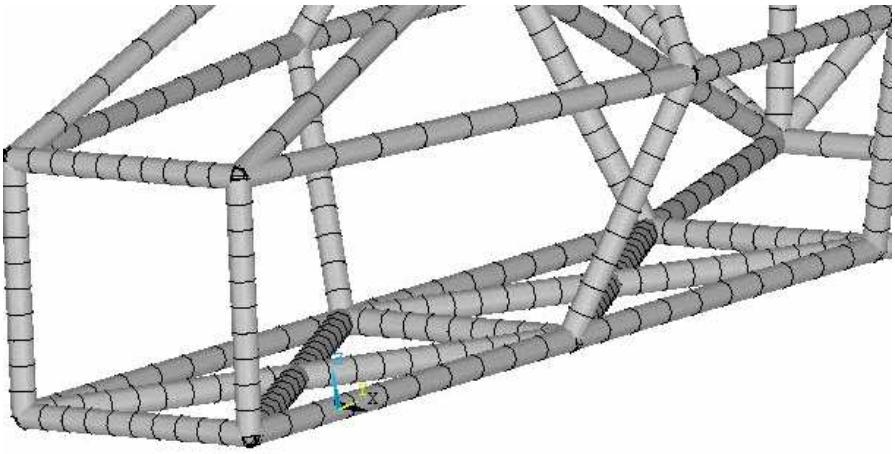


Figura 62. Segunda cruz de refuerzo.

Los resultados fueron:

- El desplazamiento en los puntos de las suspensiones delanteras en el eje z fue de 4 mm y -4 mm, lo que supone una deformación de 0.962º.
- El chasis tiene una rigidez de 3118 N·m/grado.
- El peso de la estructura es de 33.35 kg.

Se ha aumentado la rigidez a torsión respecto al modelo final que alcanzaba los 3061 N·m/grado, pero también se hay aumentado el peso en 1.8 kg. No se ha decidido tomar este modelo como final ya que es relativamente fácil aumentar la rigidez del modelo si para ello se aumenta el peso. Los cambios de diseño que realmente mejoran el modelo son aquellos que aunque aumenten en cierta medida el pero del mismo, suponen un incremento de rigidez significativo, no como en este caso.

I

Bibliografía

I Bibliografía

Libros consultados

[Norm05] Normativa fórmula SAE 2005.

[Alon99] Alonso Pérez J. Técnicas del automóvil. Chasis. 1999.

[Unzu02] Unzueta Irurtia L. Proyecto: Diseño, construcción y cálculo estático de chasis tubulares para coches de competición. 2002.

[Rond96] J. Rondal, K.G.Würker, D. Dutta, J. Wardeiner, N. Yeomans. Estabilidad de estructuras de perfiles tubulares. Cidect 1996.

[Ward96] J. Wardeiner, Y. Kurobane, J. A. Packer, D. Dutta, N. Yeomans. Guía de diseño para nudos de perfiles tubulares circulares (CHS) bajo cargas predominantemente estáticas. Cidect 1996.

[Andr75] M.H.P. Andrea, E. Trottet. Marcombo 1975.

[Rein86] Manuel Reina Gómez. Soldadura de los aceros, aplicaciones. 1986.

Páginas web consultadas

[W 1] www.insia.upm.es/upmracing/.

[W 2] http://www.carbodydesign.com/articles/2005-04-13-chassis-history/2005-04-13-chassis-history.php.

[W 3] http://icarito.latercera.cl/ especiales/transportes/terrestre/automovil.htm.

[W 4] http://www.edmunds.comapps/vdpcontainers/do/vdp/articleId= 105476/pageNumber=1?synpartner=edmunds&pageurl=www.edmunds.com/new/2005/porsche/carreragt/100500350/roadtestarticle.html&articleId=105476.

[W 5] http://www.osc.edu/education/su_programs/si/si1999 /projects/chassisproj.htm.

[W 6] http://www. audi .com.ar.

[W 7] http://motor.terra.es/motor/servicio/definici on.cfm?id=362.

[W 8] http://www.plantautomation-technology.com/projects/neckarsulm /images/image1.jpg.

[W 9] http://www.research-racing.de/f1doc05-2.htm.

[W 10] http://dot. etec. wwu.edu /fsae/v30/image014.jpg.

[W 11] http://www .lionsracing.de/index.php.

[W 12] http://www.dem.ist.utl.pt/~fst/

[W 13] http://www.atlasf1.com/2005/feb02/scarborough24.jpg

[W 14] http://campus.umr.edu/fsae/library/sae_paper/fg7.jpg

[W 15] www.porsche917.com.ar/ notas04917vs962.htm

[W 16] http://www.km77.com/glosario/r/rigitors.asp

[W 17] http://www.condesa.com/f_mec_circ.html

[W 18] http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din_rotacion/alargamiento/alargamiento.htm

[W 19] http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Ti.htm

[W 20] http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Al.htm

[W 21] http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/19C7403A-ECA9-48F0-9EF2-4ECB0A7D4C93/7105/capitulo6.pdf

[W 22] http://66.249.93.104/search?q=cache:dQN5Ie-OhYoJ:www.siisa-infra.com.mx/www/productos/mig.php+soldadura+fcaw&hl=es&gl=es&ct=clnk&cd=4

[W 23] http://www.sieend.com.mx/pnd%20ut.htm