



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CHASIS TUBULAR
PARA EL PROYECTO “FÓRMULA SAE UNAM”.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O M E C Á N I C O
P R E S E N T A:
ISMAEL IGNACIO AYALA VARGAS

DIRECTOR DE TESIS:

ING. MARIANO GARCÍA DEL GÁLLEGO



CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE, 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Lista de figuras	I
Lista de tablas	V
Introducción.	1
1. Antecedentes.	2
1.1. Descripción del proyecto.	2
1.2. Organización del equipo FSAE UNAM 2011.	4
2. El chasis vehicular.	5
2.1. Definición de chasis.	5
2.2. Utilidad del chasis dentro del vehículo.	6
2.3. Tipos de chasis.	6
2.4. El chasis de marco espacial.	8
2.5. Criterios de evaluación para el chasis de un vehículo.	10
2.6. Partes del chasis.	12
2.7. Análisis del chasis del prototipo FSAE UNAM 2010.	12
3. Metodología de diseño.	17
3.1. Definición del problema.	17
3.2. Determinación de funciones y estructuras.	27
3.3. Estudio de mercado.	27

3.4. Búsqueda de soluciones principales. (Diseño Conceptual)	29
3.5. Diseño de detalle.	36
3.6. Planeación de producción.	45
4. Construcción del chasis.	47
4.1. Evaluación de manufactura.	49
5. Resultados.	53
5.1. Cumplimiento de requerimientos.	53
5.2. Desempeño en la competencia FSAE California 2011.	54
6. Recomendaciones.	57
5.1. Mejoras de diseño.	57
5.2. Mejoras de construcción.	58
7. Conclusiones.	59
Fuentes	60
ANEXO A	62
ANEXO B	71
ANEXO C	76
ANEXO D	80

Lista de figuras

1.1. Ejemplo del tipo de vehículo presentado en la competencia Fórmula SAE.	2
2.1. Representación del conjunto de sistemas conocido en la literatura anglosajona como “chassis”.	5
2.2. Ejemplos de chasis tipo escalera	6
2.3. Ejemplos de chasis multitubular.	7
2.4. Ejemplos de chasis de marco espacial.	7
2.5. Ejemplos de monocascos.	8
2.6. Diferencia de comportamiento entre un triángulo y un rectángulo al aplicar una fuerza en uno de sus vértices.	9
2.7. Efecto de la adición de un elemento diagonal que une dos vértices de un rectángulo.	9
2.8. Ejemplo sencillo de un verdadero marco espacial.	9
2.9. Banco preparado para la prueba de torsión de un auto comercial. [5]	11
2.10. El prototipo 2010 era grande y pesado en general.	13
2.11. El proceso de manufactura no contaba con un escantillón.	14
2.12. El bastidor 2010 era demasiado ancho para los pilotos.	15
2.13. La zona de resguardo del diferencial hacía imposible su remoción.	16
3.1. Espacio requerido entre el casco del piloto y la envolvente lateral del vehículo.	20
3.2. Medidas de la plantilla utilizada para simular el 95 percentil de la población.	21

3.3. Posición de las sujeciones de los arcos antivuelco.	22
3.4. Disposición de los miembros laterales del chasis.	23
3.5. Plantilla insertada en la cabina de manera vertical.	23
3.6. Plantilla insertada en la cabina de manera horizontal.	24
3.7. Modelo para simular las medidas del piloto en el CAD del chasis.	25
3.8. Síntesis de requerimientos reglamentarios en vista lateral.	26
3.9. Síntesis de requerimientos reglamentarios en vista superior.	26
3.10. Prototipo Formula Student 2007 de la universidad de Stuttgart.	28
3.11. Prototipo Formula SAE 2010 del MIT.	28
3.12. Prototipo Formula SAE 2009 de la UWM.	28
3.13. Prototipo Formula SAE 2010 de la TU Graz.	29
3.14. Envolverte generada con las medidas generales del vehículo.	30
3.15. Modelo digital del 95 percentil de la población.	30
3.16. Modelo digital con las medidas de los pilotos.	31
3.17. Referencia de la posición de los puntos de anclaje de la suspensión.	31
3.18. Bosquejo de la cabina del vehículo.	32
3.19. Propuesta inicial de configuración para la parte frontal del chasis.	32
3.20. Geometría básica de la parte frontal del vehículo.	33
3.21. Volumen aproximado creado por el paso de la plantilla vertical.	33
3.22. Geometría básica de la parte media del vehículo.	34
3.23. Volumen aproximado creado por el paso de la plantilla horizontal.	34
3.24. Geometría básica de la parte trasera del vehículo.	35

3.25. Geometría completa del chasis.	35
3.26. Cuatro vistas del modelo de alambre del chasis.	36
3.27. Modelo de alambre del chasis en el programa ABAQUS CAE.	37
3.28. Vista del modelo en ABAQUS CAE con las propiedades de sección asignadas.	37
3.29. Condiciones de frontera y carga en el modelo de ABAQUS:	38
3.30. Resultados de la simulación en ABAQUS CAE.	38
3.31. Medidas utilizadas en el cálculo de la rigidez torsional.	39
3.32. CAD finalizado del bastidor diseñado.	41
3.33. Obtención de las plantillas de los tubos en SolidWorks.	43
3.34. Ejemplo de tubo abocardado.	43
3.35. Modelo digital del escantillón de soldadura.	43
3.36. Ejemplo de soportes removibles del escantillón.	44
3.37. Modelo digital del banco para el motor.	44
3.38. Proceso de ensamble para la soldadura del chasis.	46
4.1. Montaje del bastidor en la mesa de soldadura para el paso 2 del proceso de soldado.	47
4.2. Progreso de soldadura en la zona frontal (paso 2 a paso 3).	48
4.3. Resultado del paso 3 del proceso de soldadura: zona frontal y habitáculo completos.	48
4.4. Zona trasera del chasis y banco del motor.	49
4.5. Etapa final de soldadura y resultado.	49
4.6. Zona frontal del chasis durante el proceso de ensamble del vehículo.	51
4.7. Pruebas del vehículo, el habitáculo cumple con las medidas diseñadas.	51

4.8. Ensamble de la zona trasera del vehículo.	52
5.1. Resultado del impacto de una de las ruedas contra la banqueta de un estacionamiento de la Facultad de Ingeniería.	54
5.2. El prototipo FSAE 2011 durante el escrutinio técnico.	55
5.3. Comparación de la cabina del prototipo de la UNAM con otro vehículo de la competencia.	55
5.4. El prototipo construido durante la prueba de resistencia de la competencia.	56
6.1. Propuesta de cambio en la posición de manejo.	57
6.2. Evolución sugerida de la zona trasera del chasis.	58
D-2.1. Tubos de la parte delantera del bastidor.	81
D-2.2. Tubos de la parte media del bastidor.	82
D-2.3. Tubos de la parte trasera del bastidor.	83
D-3.1. Plano del arco principal.	84
D-3.2. Plano del arco frontal.	85

Lista de tablas

1.1. Puntuación asignada a cada evento en la competencia Fórmula SAE.	3
3.1. Jerarquía de requerimientos.	19
3.2. Medidas reglamentarias para el material del chasis.	19
3.3. Tabla de especificaciones.	27
3.4. Propiedades de acero ASTM A36 y AISI 4130.	40
3.5. Costo calculado del material del chasis.	41
3.6. Costo calculado para los procesos de fabricación del chasis.	42
3.7. Costo calculado por el uso de un escantillón para soldadura.	42
5.1. Cumplimiento de requerimientos.	53

Introducción.

La presente tesis se centra en el desarrollo completo de la estructura tubular de un vehículo tipo fórmula, como parte del proyecto “Fórmula SAE UNAM 2011” de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes del trabajo y se ubica la labor en el contexto en el que fue desarrollada. El capítulo 2 presenta los conceptos básicos necesarios para entender el resto de la tesis. El tercer capítulo contiene el procedimiento de diseño y evaluación que se siguió para obtener una propuesta manufacturable, cuyo proceso de elaboración se muestra en el cuarto capítulo. Posteriormente se desarrolla una explicación sobre el desempeño del prototipo construido en la competencia para la cual fue diseñado en el capítulo 5, se procede a emitir una serie de recomendaciones para generar un mejor chasis en el capítulo 6 y en el capítulo 7 se enuncian las conclusiones a las que se llegó después del desarrollo del proyecto completo y se analiza el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio.

Objetivos del trabajo.

Los objetivos de este trabajo de tesis son:

1. Investigar los diferentes tipos de chasis vehiculares, así como la función de estos en un auto de competencia, los parámetros medibles que permitan evaluar el desempeño del chasis y las pruebas necesarias para medir dichos parámetros.
2. Diseñar un chasis que cumpla con el reglamento de la competencia Fórmula SAE y sea posible construirlo con materiales de bajo costo disponibles en México.
3. Diseñar un chasis que supere el diseño del chasis integrado en el prototipo 2010 de Fórmula SAE UNAM, solucionando los problemas que éste presentaba.
4. Realizar evaluaciones virtuales del chasis para validar su diseño.
5. Brindar asistencia en la fabricación del chasis para el prototipo de vehículo Fórmula SAE UNAM 2011.
6. Presentar el chasis como parte del prototipo de vehículo funcional en la competencia Fórmula SAE California 2011.
7. Presentar recomendaciones de mejora para el siguiente diseño de chasis de Fórmula SAE UNAM.

1. Antecedentes.

Para iniciar con el desarrollo de la presente tesis se explicarán a continuación algunos conceptos básicos sobre la materia de estudio y el contexto en el que se desarrolló el trabajo presentado.

1.1. Descripción del proyecto.

El proyecto “Fórmula SAE UNAM 2011” consistió en el diseño, construcción y pruebas de un prototipo de vehículo tipo fórmula, monoplace para participar en la competencia internacional de ingeniería denominada Fórmula SAE California 2011.

La Fórmula SAE es organizada a nivel mundial por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE por sus siglas en inglés) y consiste en que equipos integrados exclusivamente por estudiantes universitarios presenten un vehículo que se ajuste al reglamento de la competencia, los estudiantes deben asumir que una empresa manufacturera ha solicitado la fabricación del prototipo para ser evaluado como producto comercial. El mercado meta son los corredores no profesionales de autocross, por lo tanto, el auto debe poseer buenas características de aceleración, frenado y maniobrabilidad. El auto debe mantener un bajo costo y debe ser fácil de cuidar y confiable.



Fig. 1.1. Ejemplo del tipo de vehículo presentado en la competencia Fórmula SAE.

Dicho vehículo será juzgado y comparado con los demás coches por un grupo de especialistas de la industria automotriz; esta evaluación consiste en analizar todos los aspectos del vehículo mediante una serie de pruebas estáticas y dinámicas a lo largo de tres días. A cada prueba se le ha asignado un puntaje para determinar qué tan bien se desempeña el vehículo.

Las pruebas estáticas son tres y se realizan como se explica a continuación:

- **Reporte de diseño:** Los estudiantes explican sus decisiones de diseño con base en sus conocimientos de ingeniería para mostrar el trabajo de ingeniería que involucró el desarrollo del vehículo, ante un jurado de expertos de la industria y deporte automotriz. Se realiza mediante un reporte escrito y una presentación durante la competencia.
- **Reporte de costos:** Los estudiantes calculan el costo de producción de 100 autos al año y presentan un reporte minucioso de dicho costo basado en las piezas comerciales y las piezas manufacturadas por el equipo. Este reporte es discutido con un jurado para evaluar el grado de conocimiento de los participantes respecto a técnicas y procesos de manufactura de los componentes del auto.
- **Presentación:** Se debe preparar y presentar un plan de negocios que convenza a un grupo de ejecutivos de una firma ficticia de que el diseño del equipo cumple con las demandas del mercado al cual está dirigido y puede ser manufacturado y vendido de manera rentable.

Las pruebas dinámicas se realizan posteriormente a las pruebas estáticas, son cuatro y se ejecutan como se explica a continuación:

- **Aceleración:** La capacidad de aceleración de los autos es evaluada en un recorrido de 75 metros partiendo del reposo.
- **Skidpad:** Mediante el recorrido de una pista en forma de ocho con un radio de giro constante, se mide la capacidad del vehículo para absorber las fuerzas laterales de hasta 1.4g.
- **Autocross:** El objetivo de esta prueba es evaluar la maniobrabilidad y manejo del coche en una pista estrecha sin otros corredores. La ruta combina características de aceleración, frenado y curveo en un mismo evento.
- **Resistencia:** En una pista muy similar a la empleada para la prueba de autocross, los vehículos deben probar su durabilidad. Durante esta prueba también se califica el consumo de combustible del prototipo.

El puntaje asignado a cada una de las pruebas es distribuido de la siguiente manera:

Tabla 1.1. Puntuación asignada a cada evento en la competencia Fórmula SAE. [1]

Eventos estáticos	Presentación	75
	Reporte de diseño	150
	Reporte de costos	100
Eventos dinámicos	Aceleración	75
	Skid-Pad	50
	Autocross	150
	Economía de combustible	100
	Resistencia	300
Puntaje total		1000

1.2. Organización del equipo FSAE UNAM 2011.

El proyecto Fórmula SAE UNAM se inició en el año 2009 con la participación de 8 estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y un estudiante del Centro de Investigación y Diseño Industrial también de la UNAM; y el equipo participó por primera vez en una competencia en la edición 2010 del certamen Fórmula SAE California donde se obtuvo el lugar 26 de 84 equipos inscritos.

Para participar por segunda ocasión en la competencia en el 2011, se integró un mayor número de participantes y el equipo fue reestructurado. El equipo constó de 18 miembros y se dividió a los integrantes en dos áreas principales, una de organización del equipo y una de ingeniería y diseño, estas a su vez se dividieron de la siguiente manera:

- Área de organización del equipo:
 - Administración
 - Mercadotecnia
 - Planeación de eventos dinámicos
- Área de ingeniería y diseño:
 - Chasis y carrocería
 - Tren motriz
 - Suspensión
 - Masa no suspendida
 - Electrónica

Se asignó un responsable a cada una de las divisiones de cada área, así como un responsable general del área de diseño y un líder del equipo, encargados ambos de dirigir el desarrollo del proyecto.

Este documento presenta parte del trabajo realizado en la división de chasis y carrocería del área de ingeniería y diseño del equipo; específicamente el diseño, construcción y evaluación del chasis del vehículo.

2. El Chasis Vehicular

2.1. Definición de chasis

Antes de proceder con la explicación del proceso con el cual fue desarrollado el chasis para el prototipo Fórmula SAE UNAM 2011, se explicarán brevemente a continuación algunos conceptos básicos relevantes al chasis de un vehículo.

En la literatura sobre ingeniería automotriz, la cual se encuentra predominantemente en idioma inglés, es posible encontrar el término anglosajón “chassis” utilizado para referirse al conjunto de sistemas integrado por la suspensión, la dirección y la estructura de soporte del vehículo a la cual con frecuencia se designa en inglés como “frame”. Es a esta estructura de soporte a la cual se refiere el término chasis como se emplea en esta tesis, otro vocablo comúnmente utilizado para denominar esta estructura es el de bastidor del vehículo. En el presente documento, los términos chasis y bastidor se consideran sinónimos.

La figura 2.1 se presenta para señalar los sistemas que se mencionaron en el párrafo anterior, los términos se conservan en inglés para mostrar la diferencia entre los vocablos “chassis” y “frame”.

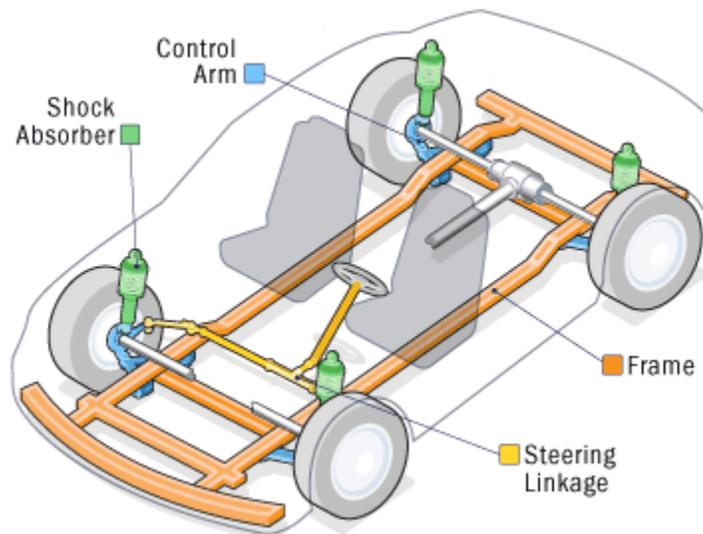


Fig. 2.1. Representación del conjunto de sistemas conocido en la literatura anglosajona como “chassis”. [2]

2.2. Utilidad del chasis dentro del vehículo.

Se puede considerar que el chasis de un vehículo debe cumplir con dos funciones principales. La primera es la de conectar las cuatro ruedas con una estructura que sea lo suficientemente rígida tanto a flexión como a torsión; la segunda es que debe soportar todos los elementos del auto así como a los pasajeros del mismo de manera segura. [3]

Lo declarado en el párrafo anterior es aplicable para todo tipo de automóviles y la diferencia entre los diferentes tipos de chasis utilizados en las diversas aplicaciones de un automóvil se deriva de la gran variedad de requerimientos y prioridades que pueden asignarse en cada caso.

Debido a la función del chasis como elemento de soporte de todos los sistemas del vehículo, el diseño de la estructura que lo compone debe realizarse en un estado avanzado del diseño del auto, es decir, cuando la ubicación de la mayoría de los demás sistemas haya sido definida. Dicha ubicación juega un papel central en el diseño del chasis tanto para asegurar la correcta interacción de los sistemas del coche como para conseguir una correcta distribución de las cargas del vehículo.

2.3. Tipos de chasis.

En esta sección se presenta una breve descripción de los principales tipos de estructura que se han empleado históricamente como chasis de automóviles, se muestran los mismos en orden histórico de aparición.

Chasis de perfiles paralelos o “tipo escalera”.

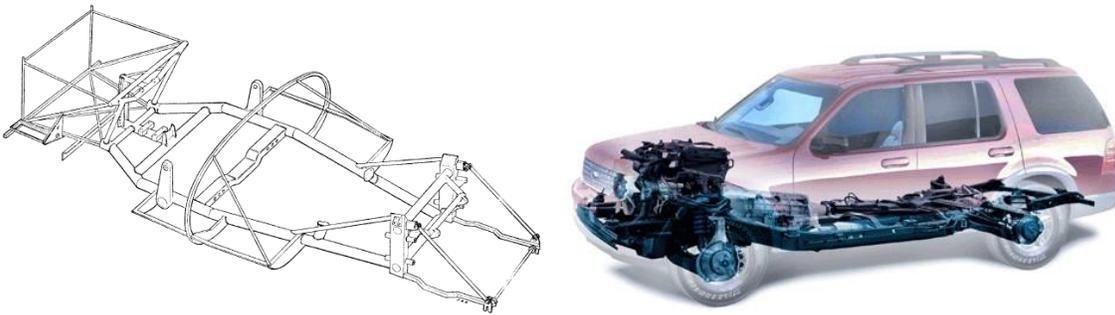


Fig. 2.2. Ejemplos de chasis tipo escalera. [5]

El chasis tipo escalera consiste de dos perfiles de gran diámetro a los costados, los cuales son unidos con perfiles transversales del mismo diámetro o menor que sirven para sujetar los elementos del coche y para brindarle rigidez a la estructura.

Este tipo de chasis es pesado y poco rígido, ya que su rigidez torsional depende únicamente de la sección del perfil utilizado, pero tiene como ventajas una relativa facilidad de fabricación, bajo costo y fácil acceso a los componentes del auto.

Chasis multitubular.

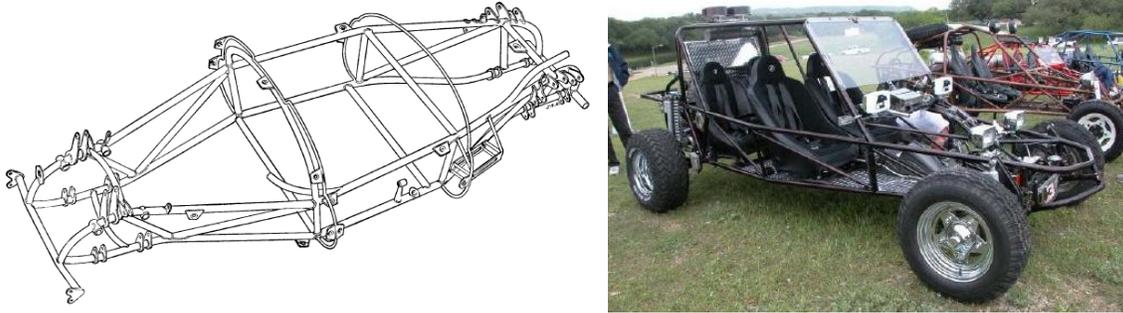


Fig. 2.3. Ejemplos de chasis multitubular. [5]

Este tipo de chasis sustituye los dos perfiles longitudinales del chasis tipo escalera por cuatro miembros longitudinales, dos a cada lado, y miembros transversales. Lo que lo distingue del siguiente tipo de chasis que se presentará, el chasis de estructura espacial es la falta de triangulación en sus secciones; se construye con una mayor cantidad de tubos, la cual es necesaria para obtener una rigidez torsional y resistencia a la torsión suficientes.

Chasis de marco espacial.

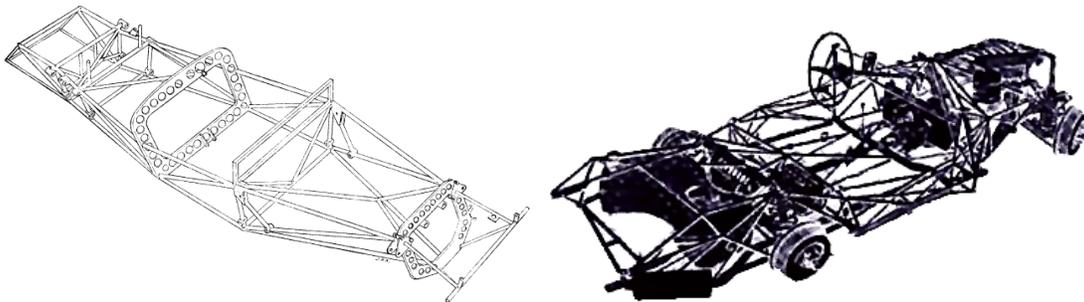


Fig. 2.4. Ejemplos de chasis de marco espacial. [5]

El chasis de estructura espacial es una opción muy eficiente debido a su alta resistencia a flexión y rigidez torsional, este tipo de chasis ha sido utilizado en una gran variedad de vehículos con excelentes resultados y es el tipo de chasis que se diseñó para el prototipo Fórmula SAE UNAM 2011, por lo cual se ahondará en él más adelante.

Monocascos.

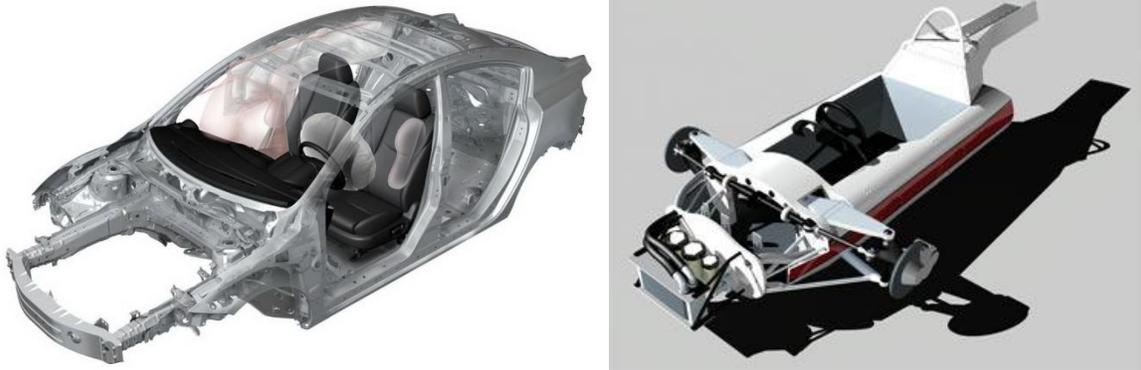


Fig. 2.5. Ejemplos de monocascos. [5]

Los monocascos son estructuras que combinan el chasis y la carrocería del vehículo como una sola entidad, la eficiencia estructural de este tipo de construcción puede ser muy alta si se diseña correctamente. Esta tecnología es la más utilizada actualmente desde coches de calle hasta vehículos de competencia que utilizan materiales compuestos como fibra de carbono para la fabricación de sus monocascos.

2.4. El chasis de marco espacial.

Como se mencionó anteriormente, el tipo de bastidor seleccionado para el prototipo Fórmula SAE UNAM 2011 fue el de marco espacial, debido a la capacidad económica y tecnológica del equipo Fórmula SAE UNAM 2011 que descartó al monocasco por su dificultad de elaboración y alto costo, y en esta sección se explicará con mayor detalle las características de este tipo de chasis.

En este tipo de estructuras se busca que todas las cargas se distribuyan de manera que los miembros se encuentren siempre a tensión o a compresión. Para lograr esto se procura que todos los paralelogramos en la estructura tengan triangulación. El triángulo es el único polígono que no tiende a deformarse cuando actúa sobre él una fuerza. Al aplicar una fuerza de compresión sobre cualquiera de los vértices de un triángulo formado por tres tubos, automáticamente los dos tubos que parten de dicho vértice quedan sometidos a compresión, mientras que el tercero quedará sometido a tracción. Cualquier otra forma geométrica que adopten los elementos de una estructura, por ejemplo un rectángulo, no será rígida o estable hasta que no se triángule.

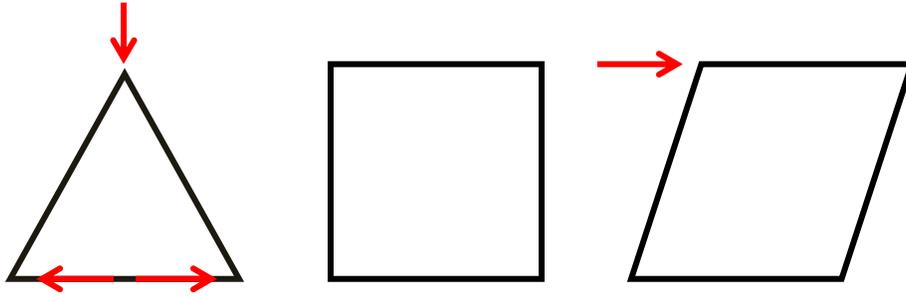


Fig. 2.6. Diferencia de comportamiento entre un triángulo y un rectángulo al aplicar una fuerza en uno de sus vértices.

Si se agrega un elemento diagonal que conecte dos vértices de un rectángulo, se generarán automáticamente dos triángulos conectados. El efecto de esta modificación será que al aplicar una fuerza en un vértice del rectángulo el elemento diagonal se encontrará sometido a tracción y se opondrá al movimiento.

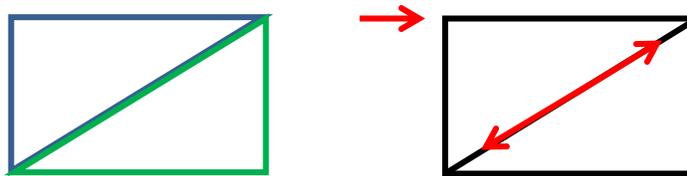


Fig. 2.7. Efecto de la adición de un elemento diagonal que une dos vértices de un rectángulo.

Los chasis de marco espacial se conforman de tubos que se mantienen juntos en tracción y compresión usando estructuras que asemejan pirámides tridimensionales y cajas tubulares trianguladas. Un marco espacial verdadero es capaz de conservar su forma aún si las uniones entre los tubos fueran bisagras, la forma más sencilla de lograr algo así es una caja cuadrada cuyas caras están trianguladas como se muestra a continuación.

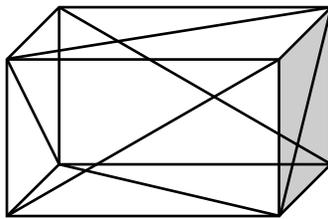


Fig. 2.8. Ejemplo sencillo de un verdadero marco espacial.

Pero aplicar este tipo de estructura de manera indistinta en un auto de carreras es muy poco práctico en términos de accesibilidad a los componentes del vehículo y es prácticamente imposible lograrlo en la zona del habitáculo. Por lo tanto al realizar el diseño de este tipo de chasis deben realizarse algunos ajustes, en cuanto a geometría y materiales utilizados, para atender estos factores que también son vitales para el desempeño del auto.

2.5. Criterios de evaluación para el chasis de un vehículo.

Al principio de este capítulo se mencionaron las principales utilidades del chasis de un vehículo. Se dijo que este debe de dar alojamiento a todos los componentes del automóvil y a los pasajeros de manera segura y que principalmente debe conectar las cuatro ruedas del auto de manera rígida tanto a flexión como a torsión.

Al diseñar una estructura para el chasis de un vehículo se considera primeramente la rigidez que se requiere tener en el mismo, se han mencionado en este capítulo dos tipos de rigidez, la rigidez a flexión y la rigidez torsional. De estas dos se presta una mayor atención a la rigidez torsional, esto se debe según (Milliken, 1995) a dos razones: la primera es que la flexión estática del chasis no afecta de manera significativa a la distribución de las cargas de las ruedas, la segunda y más importante, es que ha sido demostrado que un chasis que tiene buena rigidez torsional también tendrá una buena rigidez a flexión. [4]

La rigidez torsional es la resistencia a la torsión y según (Milliken, 1995) un vehículo debe tener una alta rigidez torsional a lo largo de su eje longitudinal, ya que podemos pensar en el chasis como un resorte que conecta las suspensiones y, si este resorte torsional es débil, controlar la transferencia de peso será prácticamente imposible. Predecir el manejo de un automóvil de manera adecuada solo se puede llevar a cabo si el chasis es lo suficientemente rígido para ser despreciado en los cálculos, como generalmente se hace.

Sobre la manera de estimar un valor objetivo para la rigidez torsional de un chasis, (Milliken, 1995) sugiere lo siguiente: *“Se debe recordar que lo que se busca con la rigidez torsional es brindar una plataforma rígida para la suspensión, para permitir que las cargas laterales sean distribuidas de adelante hacia atrás en proporción con la resistencia al vuelco (roll stiffness) de la suspensión. Así, se puede comparar la resistencia al vuelco de la suspensión delantera y la de la suspensión trasera con la rigidez torsional del chasis, este último debe resistir aproximadamente la diferencia entre las tasas de vuelco (roll rates) delantera y trasera”*. [4]

Mientras que (Genta, 2009) describe la manera de probar la rigidez torsional de un vehículo: *“La prueba para medir la rigidez torsional consiste en simular lo que sucede cuando un vehículo sube una banqueta con una sola rueda. La prueba en la industria se realiza en un banco de pruebas que se caracteriza por tener una rigidez mucho mayor que los valores que se van a medir. En este banco se instalan estructuras adicionales para sujetar el chasis apropiadamente y se utilizan otras estructuras móviles para aplicar las cargas. Los interiores, el tren motriz, las ruedas y demás elementos son desinstalados. Se conservan las suspensiones pero sustituyendo los resortes y amortiguadores por elementos rígidos para congelar la geometría en estudio”*. [5]



Fig. 2.9. Banco preparado para la prueba de torsión de un auto comercial. [5]

Se utilizan las mazas de las ruedas para sujetar la estructura, ya sea soldándolas al banco o a través de frenos, y como interfaz para la aplicación de cargas. En la prueba de torsión el eje trasero está sujeto al banco mientras que el delantero está sujeto a la estructura de aplicación del par, el cual es aplicado a través de un marco articulado. Ambas sujeciones evitan el movimiento lateral y longitudinal.

Los desplazamientos son medidos por galgas extensométricas en el eje vertical que se colocan en el pivote superior de cada suspensión.

La rigidez torsional comúnmente se mide con la siguiente fórmula: [5]

$$K_t = \frac{M_x}{(\varphi_a - \varphi_p)} = \frac{M_x}{\arctan \frac{z_{da} + z_{sa}}{t_a} + \arctan \frac{z_{dp} + z_{sp}}{t_p}} \quad (2.1)$$

Donde:

- Kt=Rigidez torsional
- Mx=par aplicado
- φ =ángulo de vuelco en los ejes
- z=variación de posición vertical de cada rueda
- t=ancho de eje

Los subíndices se refieren a:

- a=eje delantero
- p=eje trasero
- d=lado derecho
- s=lado izquierdo

Durante esta prueba también se miden las deformaciones locales. Se colocan varios sensores a lo largo de la estructura para determinar el ángulo de rotación de los elementos. Estas rotaciones se utilizan para generar diagramas en función de la coordenada longitudinal del vehículo para dar una idea de la distribución de la rigidez de la estructura.

2.6. Partes del chasis.

Para ofrecer una mejor descripción del diseño del chasis en el desarrollo de los siguientes capítulos, se utilizarán las siguientes definiciones tomadas del reglamento de la competencia Formula SAE 2011.

- Arco principal – Un tubo rolado localizado al lado o justo detrás del torso del piloto.
- Arco frontal – Un tubo rolado localizado sobre las piernas del piloto cerca del volante.
- Arcos antivuelco – Se puede usar para referirse tanto al arco principal como al arco frontal.
- Soporte de la sujeción de los arcos – Estructura que va desde el extremo inferior de la sujeción de los arcos de regreso hasta los arcos antivuelco.
- Miembro del chasis – La pieza mínima de tubo no cortado y continuo.
- Chasis/Bastidor – Es el ensamble estructural fabricado que soporta el vehículo funcional.
- Estructura primaria – la estructura primaria del chasis se compone de los siguientes elementos:
 - 1) Arco principal, 2) Arco frontal, 3) Soportes y sujeción de los arcos antivuelco, 4) Estructura de impacto lateral, 5) Pared frontal, 6) Sistema de soporte de la pared frontal y 7) Todos los miembros, guías y soportes que transfieren carga desde el cinturón de seguridad del piloto hacia los elementos 1 a 6.
- Pared frontal – Una estructura plana que define en el plano delantero de la estructura principal y funciona como protección para los pies del piloto.
- Atenuador de impacto – Un artículo deformable y que absorbe energía localizado por enfrente de la pared frontal.
- Zona de impacto lateral – El área en el costado del coche que va desde el piso del bastidor hasta 350 mm. sobre el terreno, desde el arco frontal hasta el arco principal.

2.7. Análisis del chasis del prototipo FSAE UNAM 2010.

La última sección de este capítulo presenta un breve análisis de los puntos a mejorar del chasis utilizado en el prototipo Fórmula SAE 2010.

En general, el desempeño de este diseño se consideró satisfactorio, los resultados del análisis de rigidez torsional que se le realizó al chasis 2010 reportaron un valor de 2400 Nm/deg que se

consideró dentro del rango apropiado, en comparación con los reportes de otros equipos, y obtuvo un buen desempeño en la competencia. Pero se identificaron diversas áreas de oportunidad para presentar un mejor diseño el siguiente año.

Las mejoras propuestas a continuación se enfocan en las áreas de: facilidad y precisión de manufactura, ergonomía y empaquetamiento de elementos dentro del chasis; fueron obtenidas de una serie de reuniones con los miembros del equipo 2010, en especial con el diseñador de dicho chasis.

❖ Peso excesivo



Fig. 2.10. El prototipo 2010.

En general el prototipo 2010 presentó un peso bastante superior al promedio de los autos de la categoría (320 kg. vs alrededor de 200-250 kg.). La reducción de peso fue por lo tanto una de las sugerencias para el prototipo del 2011 incluyendo el chasis, las propuestas generadas para lograrlo fueron:

- Utilizar una menor cantidad de tubos
- Mejorar la planificación e integración de los soportes de los elementos del vehículo

❖ Errores de manufactura

El proceso de fabricación del bastidor para el prototipo Fórmula SAE 2010 se llevo a cabo principalmente en las instalaciones del Centro de Investigación y Diseño Industrial de la UNAM, en las cuales se contó con las herramientas necesarias para realizar la soldadura de piezas

relativamente sencillas. Sin embargo, la construcción de un chasis de este estilo requiere utilizar un banco de soldadura o alguna estructura (conocida como escantillón) que permita sujetar los tubos en la posición relativa que deberán tener entre ellos para asegurar que se conserve la geometría exacta del diseño. Estas estructuras requieren de un diseño y esfuerzo extra por parte del equipo encargado del chasis por lo que se intentó simplificar la geometría del chasis para minimizar la necesidad de un escantillón. Al final de la construcción se descubrió que esta situación provocó una serie de errores considerables en el resultado final, por lo que se sugirió lo siguiente:



Fig. 2.11. Estructura 2010 durante el proceso de manufactura.

- Generar un escantillón para el bastidor completo y que de preferencia incluya también a la suspensión.
- Diseñar dicho escantillón utilizando Diseño Asistido por Computadora (CAD).
- Utilizar corte láser para los puntos de anclaje de la suspensión.
- Verificar la viabilidad de los dobleces de los arcos antivuelco.

❖ Geometría incorrecta



Fig. 2.12. El bastidor 2010 era demasiado ancho para los pilotos.

Algunas de las áreas del chasis 2010 no estuvo correctamente ajustadas a los elementos que se sujetó o alojó en esas zonas, esto generó algunos problemas de ergonomía y de diseño de soportes. Las acciones sugeridas para mejorar esta situación fueron:

- Ajustar las medidas del arco principal a los requerimientos del piloto y asiento, así como al motor.
- Verificar las medidas del arco frontal para concordar con los elementos cercanos a él (plantillas, volante, palanca, panel de instrumentos).
- Incluir los soportes del motor desde el inicio del diseño,
- Simplificar el área frontal del chasis, reducir el número de tubos para los soportes de la pared frontal.

❖ Difícil acceso a algunos sistemas

Para asegurar una alta rigidez torsional del chasis se generaron una serie de geometrías complicadas con una gran cantidad de tubos que cumplieron con dicha meta pero provocaron que algunos componentes del vehículo quedaran virtualmente inaccesibles para el mantenimiento, la zona en la cual se notó más claramente este problema fue la zona que albergaba el diferencial, donde resultaba casi imposible retirar el diferencial sin desmontar el motor del coche.



Fig. 2.13. La zona de resguardo del diferencial hacía imposible su remoción.

Para mejorar la facilidad de servicio del coche se recomendó:

- Simplificar el área de montaje y protección del diferencial y transmisión de potencia.
- Verificar el espacio disponible para dar servicio a los componentes en el CAD del vehículo.

Resumiendo, las sugerencias de mejora para el chasis 2011, derivadas del análisis del prototipo 2010, fueron las siguientes:

- Utilizar una menor cantidad de tubos
- Mejorar la planificación e integración de los soportes de los elementos del vehículo
- Generar un escantillón para el bastidor completo y que de preferencia incluya también a la suspensión.
- Diseñar dicho escantillón utilizando Diseño Asistido por Computadora (CAD).
- Utilizar corte láser para los puntos de anclaje de la suspensión.
- Verificar la viabilidad de los dobleces de los arcos antivuelco.
- Ajustar las medidas del arco principal a los requerimientos del piloto y asiento, así como al motor.
- Verificar las medidas del arco frontal para concordar con los elementos cercanos a él (plantillas, volante, palanca, panel de instrumentos).
- Incluir los soportes del motor desde el inicio del diseño,
- Simplificar el área frontal del chasis, reducir el número de tubos para los soportes de la pared frontal.
- Simplificar el área de montaje y protección del diferencial y transmisión de potencia.
- Verificar el espacio disponible para dar servicio a los componentes en el CAD del vehículo.

3. Metodología de diseño

Para llevar a cabo el diseño del bastidor que se utilizaría en el proyecto Fórmula SAE UNAM 2011 se siguió una serie de pasos basados en el método de diseño impartido por el Dr. Leopoldo Adrián González González en la materia de Ingeniería de Diseño de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Dicho método es consecuente con la propuesta de múltiples autores al respecto y es aplicable al diseño de cualquier producto de ingeniería.

Los pasos a seguir se explicarán únicamente en el contexto de la tesis, es decir solo se explicará cómo se utilizó el método para el diseño del chasis, por lo tanto se sugiere a los interesados en la metodología de diseño consultar las fuentes [6] y [7].

Para la aplicación de la metodología mencionada al diseño del chasis que se presenta en esta tesis se consideró como cliente al equipo del proyecto Fórmula SAE UNAM.

3.1. Definición del problema.

Para obtener un buen diseño en ingeniería lo primero que se necesita hacer es definir de manera clara y concisa el problema que se va a resolver, esclarecer los objetivos del diseño, las restricciones a las que se encuentra sujeto el producto y las solicitudes del cliente o mercado objetivo para el cual se está realizando el diseño; de esta manera será posible vislumbrar claramente el destino hacia el que deben dirigirse los esfuerzos, de lo contrario se corre el riesgo de obtener un resultado que no solucione el problema original satisfactoriamente.

3.1.1. Planteamiento del problema.

Para la participación del equipo Fórmula SAE UNAM en la competencia FSAE California 2011 se requirió del diseño y construcción de un bastidor de marco espacial nuevo que se adecuara al diseño de los demás sistemas del vehículo y cumpliera con los lineamientos del reglamento de dicha competencia.

3.1.2. Objetivos de diseño.

Crear un dispositivo de estructura espacial que conecte las cuatro ruedas de un vehículo de carreras de manera rígida y permita albergar los componentes de dicho vehículo de manera segura y operable.

3.1.3. Amplitud del proyecto.

El resultado final de este proyecto es la obtención de un prototipo funcional de chasis de marco espacial para ser utilizado en la competencia FSAE California 2011 y para demostraciones posteriores.

3.1.4. Requerimientos y especificaciones.

Como se mencionó anteriormente el cliente para este diseño fue el equipo Fórmula SAE UNAM 2011. En reuniones previas al arranque de diseño de todo el vehículo para la competencia se fijaron requerimientos para todos los sistemas, incluido el chasis, estos fueron: acatar el reglamento publicado por la SAE para la competencia FSAE California 2011, mantener un peso inferior al de los sistemas del prototipo 2010 y reducir las medidas generales de los sistemas del vehículo.

Adicionalmente a estos requerimientos generales que se aplicaron de igual manera para todos los sistemas del coche, se fijaron requerimientos para el chasis, derivados del estudio a detalle del chasis anterior, estos fueron: que la geometría general estuviera adaptada al piloto, que se permitiera el acceso de manera sencilla a los elementos de los sistemas para su reparación y que tuviera una construcción exacta.

Finalmente como requerimiento de ingeniería se planteó la necesidad de que el bastidor diseñado tuviera una rigidez torsional que estuviera adecuada al vehículo diseñado por el equipo, esto quiere decir que no se requería la mayor rigidez que se pudiera lograr sino que se buscaba un valor de rigidez que estuviera evaluado con base en el desempeño de la suspensión del auto.

Síntesis de Requerimientos.

Finalmente los requerimientos expresados por el cliente para el diseño y construcción del chasis fueron:

- Cumplimiento del reglamento FSAE 2011.
- Reducción de peso.
- Reducción de medidas generales.
- Geometría adaptada al piloto.
- Fácil acceso a los sistemas para reparación.
- Exactitud de manufactura.
- Rigidez torsional adecuada al vehículo

Jerarquía de Requerimientos.

Para dar una jerarquía a los requerimientos se utilizó una escala de 5 puntos, donde los requerimientos con menor importancia son asignados un valor de 1 y a los de mayor importancia se les designa con un valor de 5.

Tabla 3.1. Jerarquía de requerimientos.

Requerimiento	Jerarquización
Cumplimiento del reglamento FSAE 2011	5
Reducción de peso	4
Reducción de medidas generales	3
Geometría adaptada al piloto	3
Fácil acceso para reparación	4
Exactitud de manufactura	4
Rigidez torsional adecuada	4

Especificaciones

A continuación se asignaron valores a los requerimientos señalados en el punto anterior con el objetivo de fijar un marco medible para la determinación del cumplimiento o incumplimiento de cada uno de ellos.

Cumplimiento del reglamento FSAE 2011.

Este requerimiento es el más importante debido a que su observancia determina la posibilidad de participar en la competencia FSAE California 2011. En realidad, de él se derivan una serie de sub-requerimientos que se mencionarán a continuación. Las imágenes presentadas en esta sección fueron tomadas del reglamento FSAE 2011, se conservan las anotaciones originales en inglés.

- La cabina debe ser un espacio abierto
- La distancia entre ejes del vehículo debe ser mayor o igual a 1525 mm.
- Todos los sistemas del vehículo deben ser claramente visibles para los jueces de la competencia, se pueden remover partes de la carrocería.
- Material mínimo requerido:
 - La estructura primaria del auto debe estar construida de acero, común o de aleación, con un mínimo de 0.1% de contenido de carbono con las dimensiones mencionadas en la tabla siguiente.

Tabla 3.2. Medidas reglamentarias para el material del chasis.

Aplicación	Dimensión Externa X Espesor
Arco principal y frontal, Barra de montaje de la parte superior del cinturón de seguridad.	Tubo redondo de 1 in. (25.4 mm) X 0.095 in (2.4 mm)
Estructura de impacto lateral, pared frontal, sujeción de los arcos antivuelco, Sujeción del cinturón de seguridad (excepto lo anotado arriba).	Tubo redondo de 1 in. (25.4 mm) X 0.065 in. (1.65 mm) O Tubo cuadrado de 1 in. X 1 in. X 0.049 in.
Soporte de la pared frontal, soportes de la sujeción del arco principal.	Tubo redondo de 1 in. (25.4 mm) X 0.049 in. (1.25 mm.)

- La cabeza y las manos del piloto no deben tocar el piso bajo ninguna condición de vuelco.
- En una posición sentada y con la cabeza recargada en la cabecera, el casco del 95 percentil masculino de la población estadounidense y de todos los pilotos debe estar:
 - A un mínimo de 50.8 mm de la línea recta que une el tope del arco principal con el tope del arco frontal.
 - A un mínimo de 50.8 mm. de la línea recta que une el tope del arco principal con el extremo inferior de la sujeción del mismo, si dicha sujeción se dirige hacia atrás del vehículo.
 - Delante de la superficie trasera del arco principal si la sujeción de este arco se dirige hacia adelante.

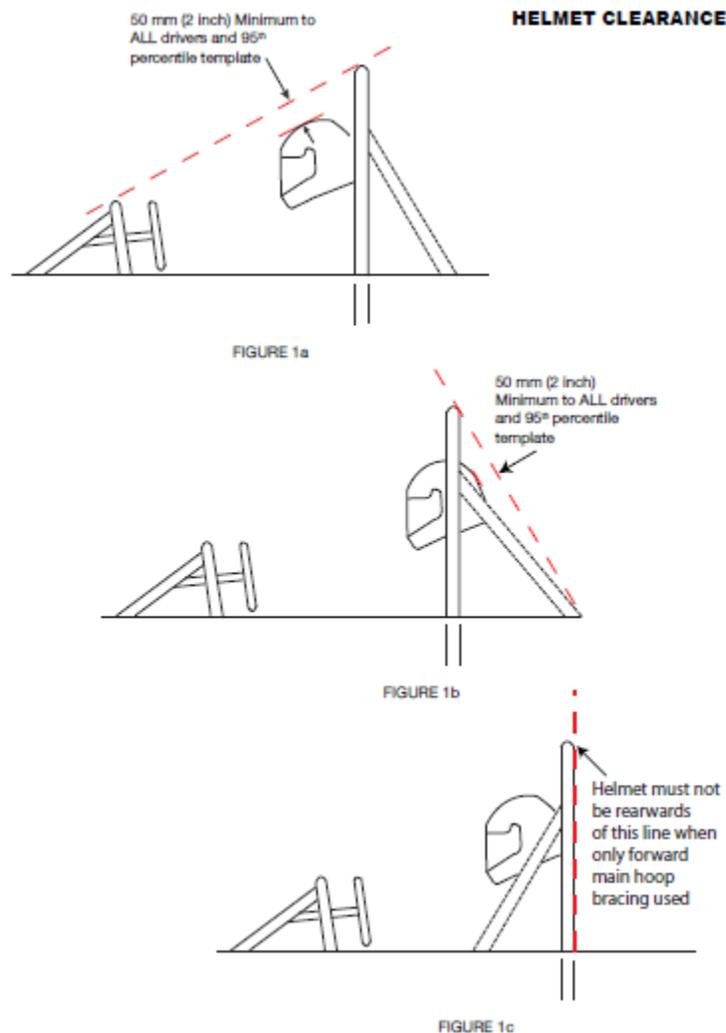
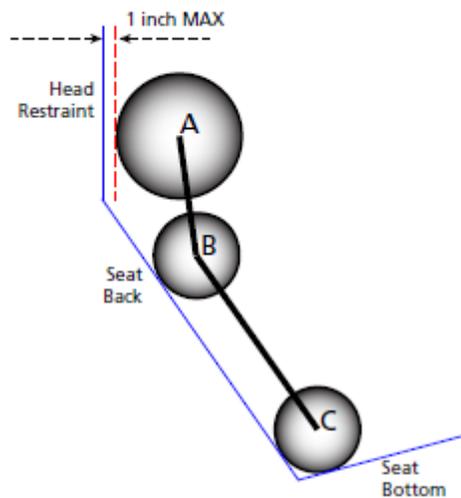


Fig. 3.1. Espacio requerido entre el casco del piloto y la envolvente lateral del vehículo. [1]
(Imagen presentada como aparece en el reglamento FSAE 2011)

- Para comprobar la capacidad de albergar al 95 percentil masculino en estas mediciones se utilizará una plantilla como la que se muestra en la imagen inferior. Dicha plantilla se colocará: con el círculo inferior de 200 mm en la unión del fondo del asiento con la parte posterior del mismo; el círculo intermedio de 200 mm se recargará en la parte posterior del asiento; y el círculo superior de 300 mm se colocará a no más de 25.4 mm de distancia de la cabecera.

"Percy" – 95th Percentile Male with Helmet



Circle A = Head with helmet – 300 mm diameter
 Circle B = Shoulders – 200 mm diameter
 Circle C = Hips and buttocks – 200 mm diameter

Line A-B = 280 mm from centerpoint to centerpoint

Line B-C = 490 mm from centerpoint to centerpoint

Fig. 3.2. Medidas de la plantilla utilizada para simular el 95 percentil de la población. [1]
 (Imagen presentada como aparece en el reglamento FSAE 2011)

- El arco principal:
 - Debe estar construido de una sola pieza.
 - Debe extenderse desde la parte más baja del bastidor de un lado hasta la parte más baja del otro lado.
 - En una vista lateral, la porción de este arco que sale de la estructura principal no debe estar inclinada más de 10° con la vertical.
 - En una vista frontal, los puntos donde se une con la estructura principal deben estar separados a una distancia mínima de 380 mm

- El arco frontal:
 - Debe extenderse desde la parte más baja del bastidor de un lado hasta la parte más baja del otro lado.
 - Su tope no debe estar por debajo del tope del volante en ninguna posición.
 - Debe estar a una distancia máxima de 250 mm del volante
 - No puede estar inclinado a más de 20° de la vertical.
- Las sujeciones del arco principal:
 - El arco principal debe estar sujeto por dos miembros que vayan hacia adelante o hacia atrás en ambos lados del arco.
 - Si el arco principal está inclinado hacia adelante o hacia atrás, las sujeciones deben dirigirse hacia el lado contrario.
 - Deben estar a menos de 160 mm del tope del arco principal.
 - Deben estar a un ángulo de 30° o mayor con el arco principal.
- Las sujeciones del arco frontal:
 - El arco frontal debe estar sujeto por dos miembros que vayan hacia adelante o hacia atrás en ambos lados del arco.
 - Deben construirse para proteger los pies del piloto y deben extenderse hacia adelante.
 - Deben estar a menos de 50.8 mm del tope del arco frontal.

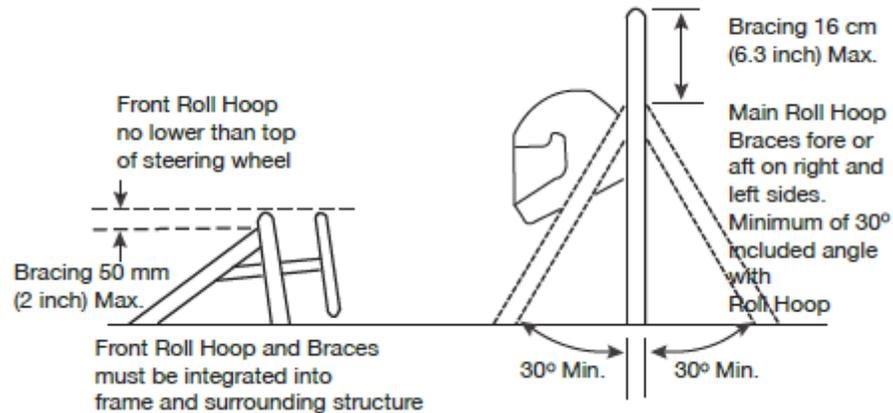


Fig. 3.3. Posición de las sujeciones de los arcos antivuelco. [1]
(Imagen presentada como aparece en el reglamento FSAE 2011)

- Los pies del piloto deben estar completamente contenidos dentro de la estructura principal del bastidor.
- La pared frontal debe estar por delante de todos los objetos como baterías, cilindros maestros, reservas hidráulicas.
- La pared frontal debe estar soportada hacia atrás hasta el arco frontal por al menos 3 miembros de cada lado del vehículo:
 - Uno superior a menos de 50.8 mm del tope de la pared frontal,

- Uno al fondo y uno en diagonal que de triangulación.
- La estructura de impacto lateral debe estar construida de al menos 3 miembros a cada lado del piloto, colocados de la siguiente manera:
 - El tubo superior debe conectar el arco frontal y el arco principal a una altura de entre 300 y 350 mm. del piso.
 - El tubo inferior debe conectar el fondo de ambos arcos antivuelco.
 - El tubo medio debe conectar los dos anteriores.

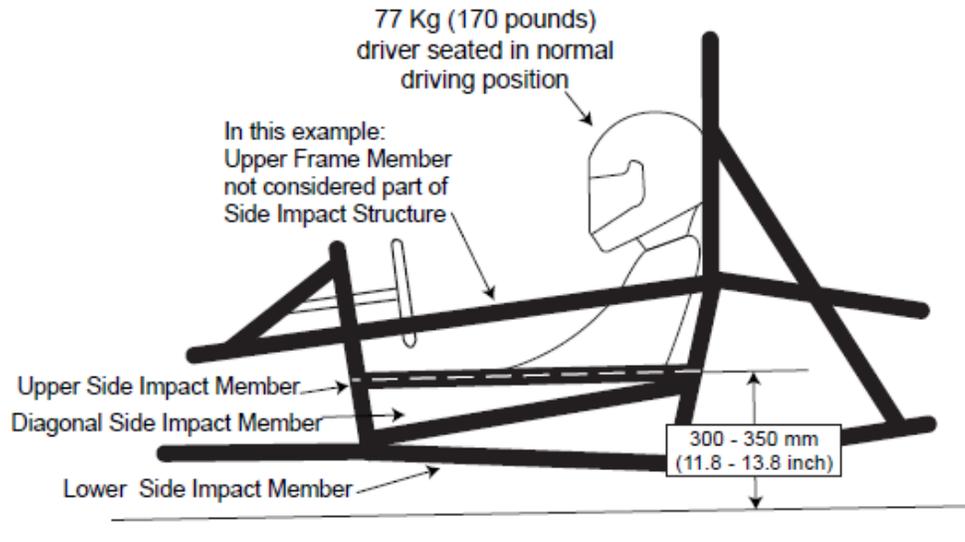


Fig. 3.4. Disposición de los miembros laterales del chasis. [1]
(Imagen presentada como aparece en el reglamento FSAE 2011)

- Para asegurar que la apertura de la cabina es de tamaño adecuado, se insertará una plantilla con las medidas mostradas en la imagen inferior sujeta de manera horizontal e insertada de manera vertical.

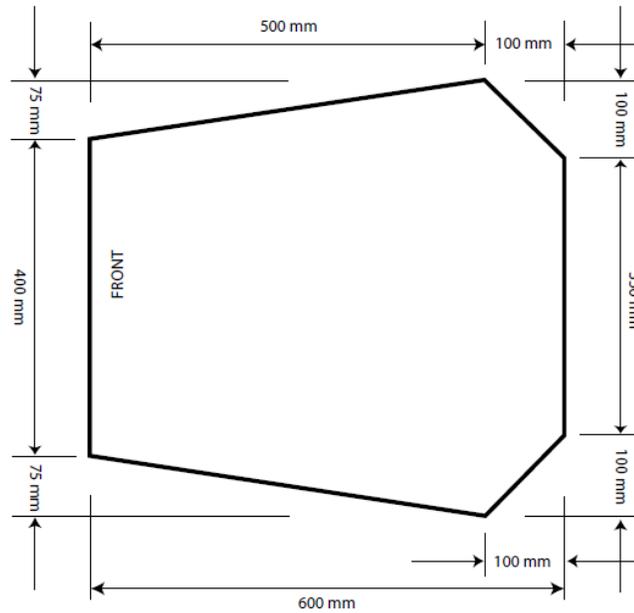


Fig. 3.5. Plantilla insertada en la cabina de manera vertical. [1]
(Imagen presentada como aparece en el reglamento FSAE 2011)

- También se insertará una plantilla como la que se muestra a continuación de manera horizontal desde la cabina hasta la parte posterior del pedal de freno.

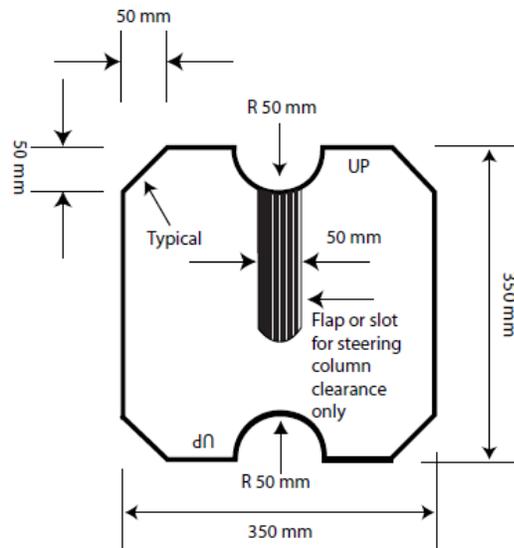


Fig. 3.6. Plantilla insertada en la cabina de manera horizontal. [1]
(Imagen presentada como aparece en el reglamento FSAE 2011)

Reducción de peso

El parámetro para la evaluación de este requerimiento es el peso del chasis 2010, el cual fue de aproximadamente 45 kg.

Reducción de medidas generales

Al igual que con el peso, el parámetro de medidas generales del chasis es el bastidor de 2010, el cual tenía los siguientes datos:

Altura: 1100 mm.

Ancho: 900 mm.

Largo: 2547 mm.

Geometría adaptada al piloto

Para diseñar un bastidor que fuera ergonómico para los pilotos del equipo, un estudio estadístico de las medidas corporales de los posibles conductores fue realizado por el estudiante de diseño industrial Brian Hollands. Con los datos obtenidos se generó un modelo antropomórfico para ser utilizado en el modelo digital del chasis, a continuación se muestra una vista lateral de dicho modelo antropomórfico con algunas medidas generales.

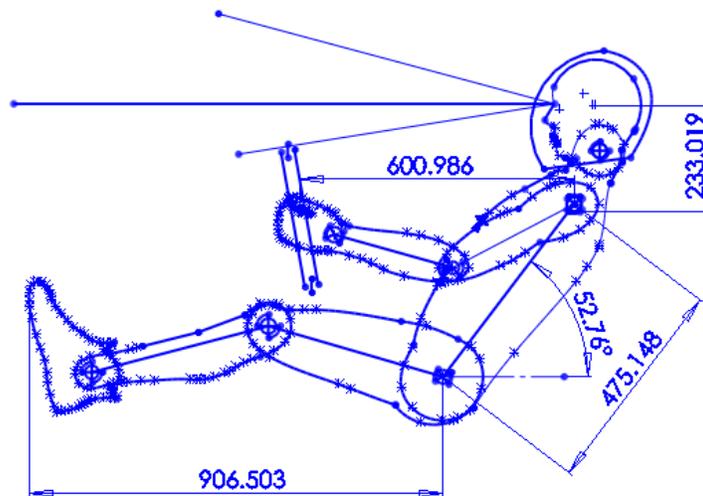


Fig. 3.7. Modelo para simular las medidas del piloto en el CAD del chasis.

Fácil acceso para reparación

Definir una sola métrica para evaluar este requerimiento resulta demasiado ambiguo, en su lugar se vigiló su cumplimiento mediante un constante chequeo de capacidad de servicio en el modelo digital del vehículo.

Exactitud de manufactura

La precisión de la manufactura será evaluada con una serie de mediciones en puntos estratégicos del chasis, la máxima desviación permitida en estas mediciones con respecto al modelo digital será de 5 mm.

Los puntos de anclaje de la suspensión del automóvil son probablemente el elemento más importante para vigilar en este sentido ya que una desviación de la localización exacta de estos puntos puede variar enormemente el comportamiento dinámico del vehículo. Por lo tanto para estos puntos en particular la máxima desviación permitida es de 2 mm.

Rigidez torsional adecuada

En el capítulo 2 se citó a (Milliken, 1995) para definir un valor objetivo de rigidez torsional: “Así, se puede comparar la resistencia al vuelco de la suspensión delantera y la de la suspensión trasera con la rigidez torsional del chasis, este último debe resistir aproximadamente la diferencia entre las tasas de vuelco (roll rates) delantera y trasera”. [4]

Como se puede apreciar este valor requiere de la asistencia del equipo encargado de la suspensión del coche para su determinación. Tras solicitar el cálculo de este parámetro, el equipo de suspensión entregó un valor objetivo de rigidez torsional de 1760 Nm/deg.

Tabla de especificaciones:

Para sintetizar los requerimientos del reglamento de la competencia FSAE California se utilizarán dos diagramas realizados por el estudiante de ingeniería Bruno Verde en 2010:

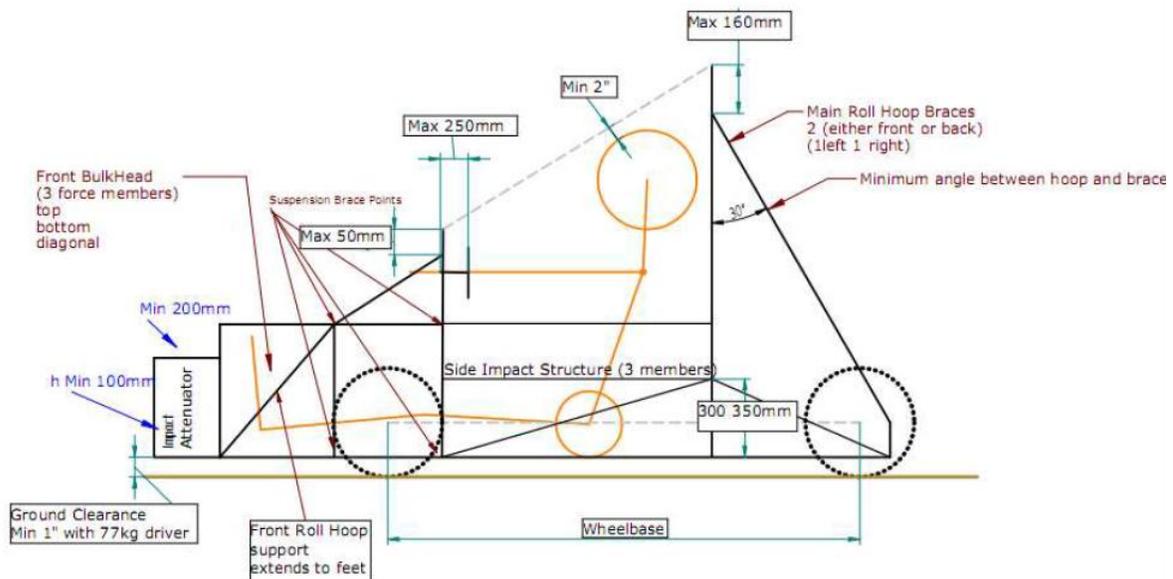


Fig. 3.8. Síntesis de requerimientos reglamentarios en vista lateral.

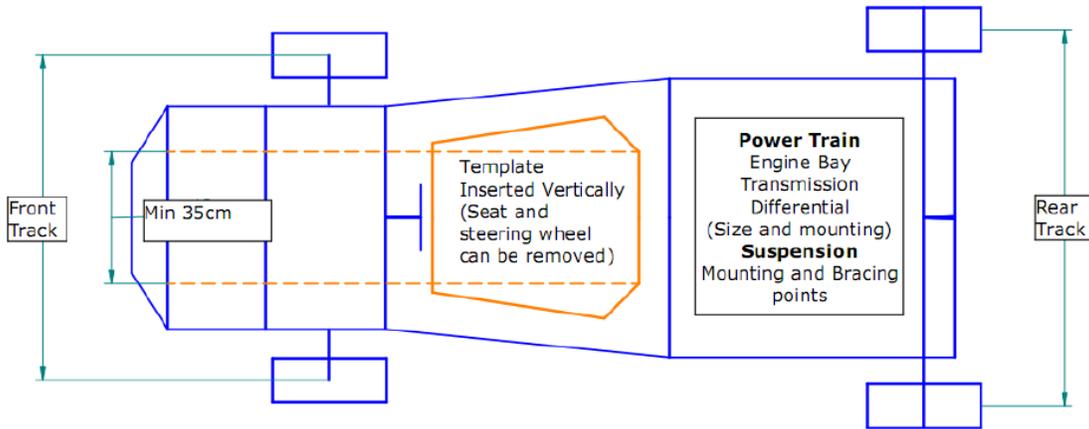


Fig. 3.9. Síntesis de requerimientos reglamentarios en vista superior.

Además los otros requerimientos deben cumplir con las siguientes especificaciones:

Tabla 3.3. Tabla de especificaciones.

Parámetro	Valor
Peso	< 45 kg
Altura	<1100 mm.
Ancho	<900 mm.
Largo	<2547 mm.
Geometría adaptada al piloto	Utilizar modelo antropomórfico
Fácil acceso para reparación	Utilizar modelo digital de componentes
Exactitud de manufactura	Errores menores a 5 mm. (2 mm. para puntos de suspensión)
Rigidez torsional	>1760 Nm/deg

3.2. Determinación de funciones y estructuras.

Este paso cobra mayor importancia cuando se diseña un producto con múltiples sistemas, para el caso del chasis solo se enunciarán las funciones principales que cumple como bastidor dentro del vehículo:

- Conectar las cuatro ruedas con una estructura que sea lo suficientemente rígida tanto a flexión como a torsión;
- Soportar todos los elementos del auto así como a los pasajeros del mismo de manera segura.

3.3. Estudio de mercado.

A continuación se muestran algunas imágenes de los bastidores que fueron considerados como muestra para ilustrar el chasis de estructura espacial que se utiliza en la competencia FSAE California.

El primero es un bastidor de 2007, de la universidad de Stuttgart, la geometría propuesta es bastante eficiente sin embargo es anterior a la incorporación de los requerimientos de apertura de la cabina y no cumpliría con ellos en la actualidad:



Fig. 3.10. Prototipo Formula Student 2007 de la universidad de Stuttgart.

El siguiente es del año 2010 elaborado por el equipo del Instituto Tecnológico de Massachusets (MIT).



Fig. 3.11. Prototipo Formula SAE 2010 del MIT.

El último mostrado es de la Universidad de Wisconsin Madison (UWM), para el 2009.



Fig. 3.12. Prototipo Formula SAE 2009 de la UWM.

Estos son solo algunos ejemplos de los bastidores de marco espacial utilizados en la competencia, el resto de los equipos utilizan diferentes geometrías pero todos partiendo de los requerimientos del reglamento.

Adicionalmente, algunos de los equipos con mayor presupuesto y experiencia han utilizado monocascos durante los últimos años. Para dar una referencia de este tipo de bastidores se presenta el del equipo de la Universidad Técnica de Graz en Austria (TU Graz).



Fig. 3.13. Prototipo Formula SAE 2010 de la TU Graz.

3.4. Búsqueda de soluciones principales.

La búsqueda de soluciones se enfocó en generar geometrías que cumplieran con las especificaciones de diseño, para ello se utilizó el software de diseño asistido por computadora (CAD) denominado SolidWorks. En este programa se realizaron una serie de modelos en alambre de las posibles geometrías del chasis incorporando el modelo antropomórfico y los CAD de los elementos del vehículo.

3.4.1. Generación de configuraciones de solución

Las alternativas de solución en el diseño del chasis de marco espacial se refieren a las configuraciones geométricas que podrían generarse para albergar los componentes de los sistemas del vehículo.

Para proponer estas configuraciones se utilizó un modelo de alambre del chasis generado en un programa de CAD, este modelo permitió hacer modificaciones de manera rápida para evaluar las configuraciones propuestas.

Para empezar se ingresaron al programa las restricciones derivadas de los requerimientos mencionados anteriormente. Se introdujeron en primer lugar las medidas generales del vehículo (ancho de vía, distancia entre ejes, altura deseada) para generar una envolvente que determinara el espacio disponible para el diseño.

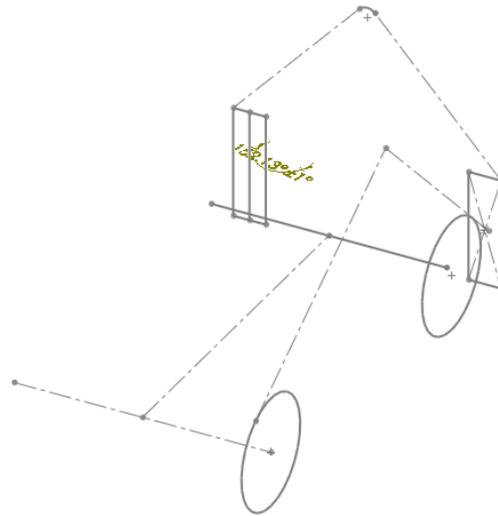


Fig. 3.14. Envolvente generada con las medidas generales del vehículo.

Posteriormente se introdujo un modelo de la plantilla utilizada en la competencia para simular el tamaño del percentil 95 de la población, la posición de este modelo dentro del vehículo fue determinada por el encargado de ergonomía del equipo.

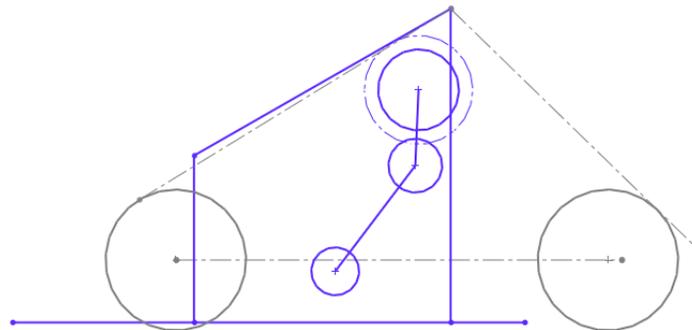


Fig. 3.15. Modelo digital del 95 percentil de la población.

Una vez posicionado el modelo del percentil 95 que debe caber en el vehículo como una referencia para la posición de los arcos antivuelco, se insertó el modelo generado con el estudio estadístico de los posibles pilotos del vehículo, con base en este segundo modelo se desarrollarían todas las interacciones del piloto con el vehículo para asegurar que la operación de este fuera cómoda.

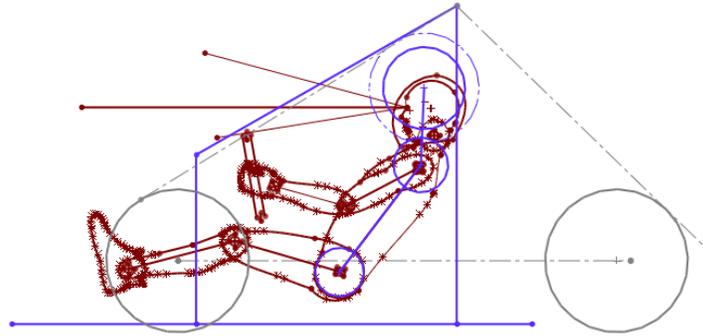


Fig. 3.16. Modelo digital con las medidas de los pilotos.

La última referencia insertada en el modelo antes de proceder a generar alternativas de solución fue el modelo en alambre de la suspensión delantera y trasera proporcionado por el equipo de dicho sistema, los puntos de anclaje de este mecanismo son probablemente los más importantes para conservar un adecuado comportamiento dinámico del vehículo.

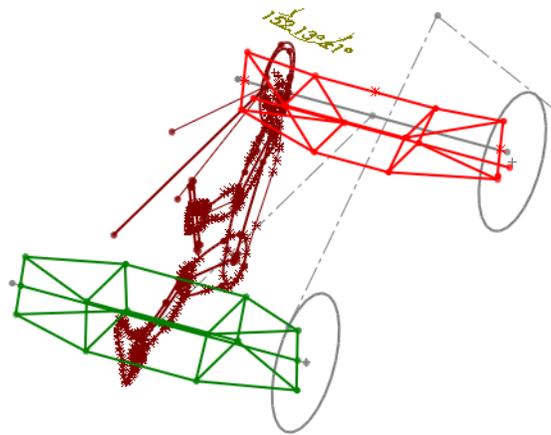


Fig. 3.17. Referencia de la posición de los puntos de anclaje de la suspensión.

Una vez que se integraron al modelo las referencias principales se procedió a generar la geometría completa del bastidor. Para realizar este proceso se generaron algunos bosquejos de la geometría deseada, basados en las sugerencias de diseño propuestas al inicio. A continuación se muestran los más importantes.

El primero ilustra una de las decisiones más importantes tomadas en el desarrollo inicial, que fue la de dirigir la sujeción del arco principal hacia adelante, las implicaciones de esto fueron que la mayoría de los miembros de soporte estarían por delante del arco principal liberando la parte posterior del vehículo para permitir un acceso fácil a los elementos del tren motriz, y permitir la utilización de un arco principal adaptado a la posición deseada para la espalda del piloto, la siguiente imagen muestra el bosquejo inicial del cual se partió para desarrollar la cabina del auto.

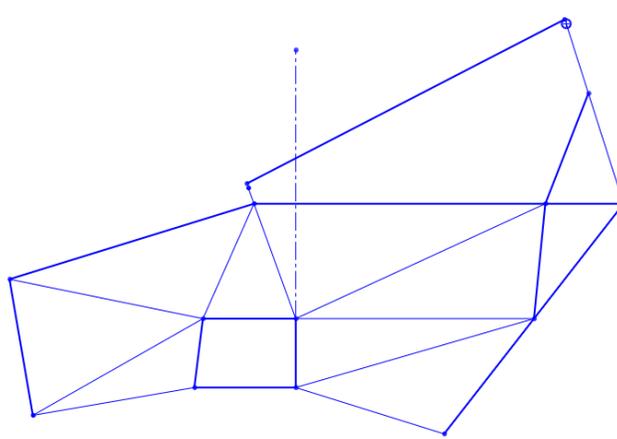


Fig. 3.18. Bosquejo de la cabina del vehículo.

El segundo bosquejo muestra la propuesta inicial para la zona frontal del chasis, a esta propuesta se le hicieron las modificaciones de simplificar el arco frontal y eliminar los tubos superiores para permitir un acceso más libre a los elementos de los sistemas de frenos y dirección.

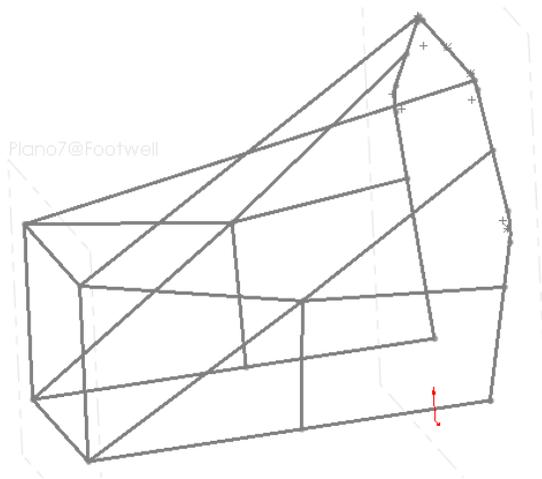


Fig. 3.19. Propuesta inicial de configuración para la parte frontal del chasis.

Del par de propuestas mostradas arriba se partió para generar la estructura completa del chasis, dentro de la cual se colocaron los demás sistemas del vehículo y se realizaron las modificaciones necesarias para albergar a cada uno de ellos. A continuación se explicará brevemente la geometría final generada para cada zona del vehículo.

Parte frontal

Los elementos alojados o sostenidos en la parte frontal son: la suspensión delantera, la dirección, los pedales, el atenuador de impacto y las piernas del piloto. A continuación se muestra la geometría generada para asegurar la disposición de dichos elementos, determinada esta última por cada uno de los encargados de dichos sistemas.

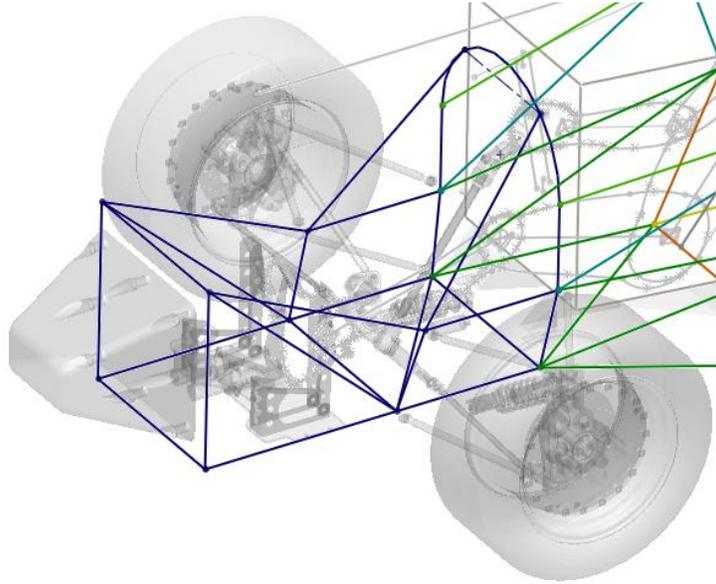


Fig. 3.20. Geometría básica de la parte frontal del vehículo.

En la imagen anterior se puede observar que el sistema que determina en mayor proporción la geometría de esta zona es la suspensión, la posición de los puntos de anclaje indica la colocación de cuatro nodos principales hacia los cuales se dirigen el resto de los miembros estructurales. Así mismo, la apertura de esta zona está determinada por el paso de la plantilla frontal que debe poder ser insertada verticalmente desde el arco principal hasta los pedales, esto crea un volumen de barrido como el que se muestra a continuación.

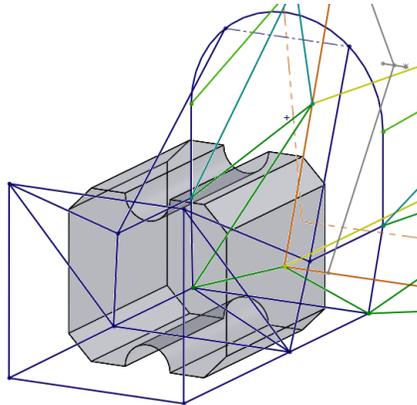


Fig. 3.21. Volumen aproximado creado por el paso de la plantilla vertical.

Parte media (Habitáculo)

La parte media del vehículo está destinada a contener el cuerpo del piloto de manera segura y ergonómica, también se encuentran en esta zona el asiento, el volante y la palanca de cambios. Estos sistemas fueron los que determinaron las medidas de esta zona del chasis, vale la pena recordar que aunque el diseño está enfocado a cumplir con las medidas de los pilotos del equipo, también se debe asegurar que la plantilla del percentil 95 quepa sin problemas.



Fig. 3.22. Geometría básica de la parte media del vehículo.

También importante es dejar el espacio libre para la inserción de la plantilla del habitáculo, la cual es insertada verticalmente hasta el miembro superior de la estructura de impacto lateral generando un volumen barrido similar al mostrado a continuación.

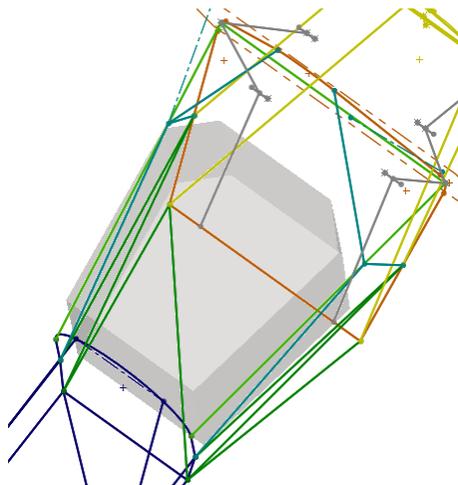


Fig. 3.23. Volumen aproximado creado por el paso de la plantilla horizontal.

Parte trasera

La parte trasera del vehículo representa el mayor reto de empaquetamiento. En esta zona se deben albergar todos los componentes del sistema de potencia y tren motriz, los soportes para el motor, la suspensión trasera y el diferencial fueron los principales elementos para determinar la geometría utilizada para esta parte del chasis.

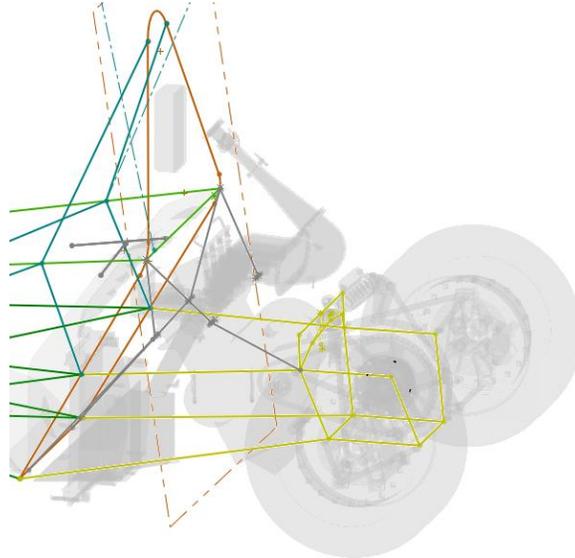


Fig. 3.24. Geometría básica de la parte trasera del vehículo.

Para esta zona en particular se prestó mucha atención para dejar espacio libre para el uso de herramientas y montaje de los sistemas, ya que este fue uno de los principales problemas experimentados en el prototipo anterior.

3.4.2. Diseño conceptual.

Finalmente, la geometría final del chasis generada se muestra a continuación como un modelo en alambre:

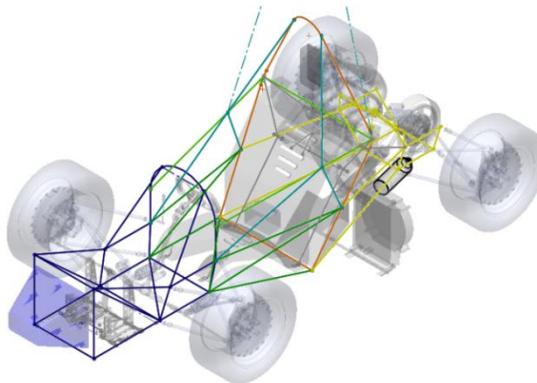


Fig. 3.25. Geometría completa del chasis.

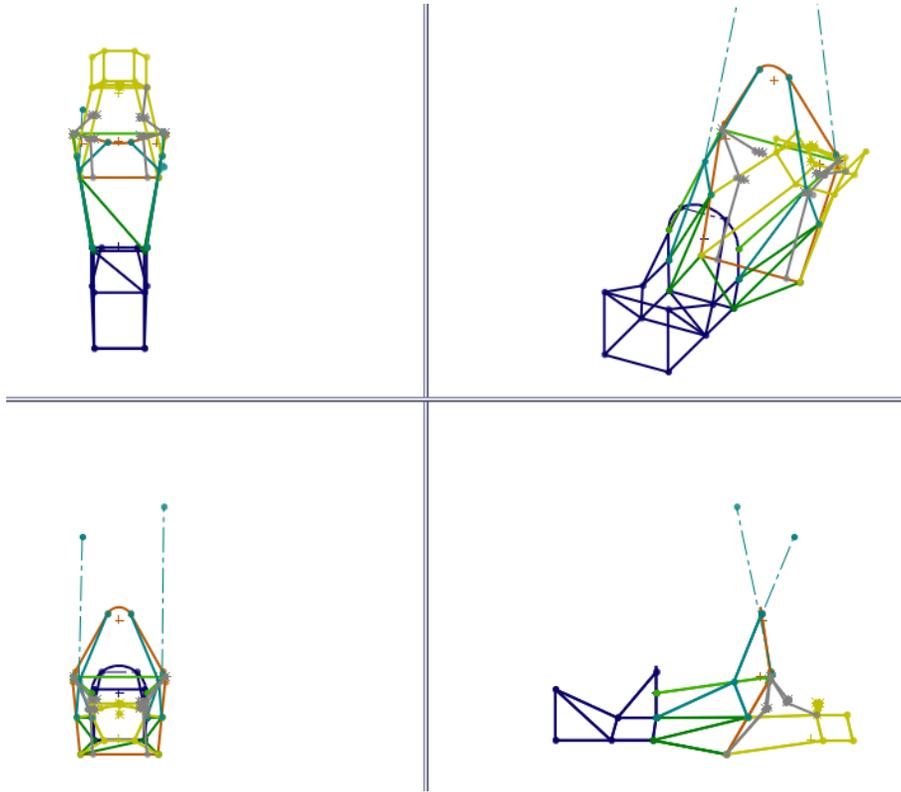


Fig. 3.26. Cuatro vistas del modelo de alambre del chasis.

3.5. Diseño de detalle.

Una vez obtenida la geometría del chasis se procedió a asignarle material, evaluar el costo de producción y elaborar un plan de manufactura para su construcción.

3.5.1. Simulación.

Para validar la geometría propuesta en el diseño conceptual se realizó otro modelo de alambre en el software para análisis de elemento finito ABAQUS. Con este modelo se realizó una simulación de la prueba de torsión realizada a los chasis de vehículos para determinar si la rigidez torsional cumplía con la especificación señalada.

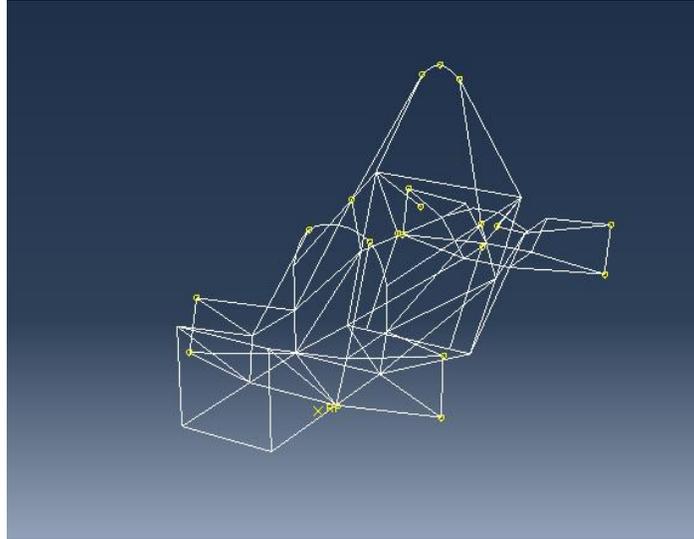


Fig. 3.27. Modelo de alambre del chasis en el programa ABAQUS CAE.

A este modelo le fueron asignadas las propiedades de sección de los tubos y del material.

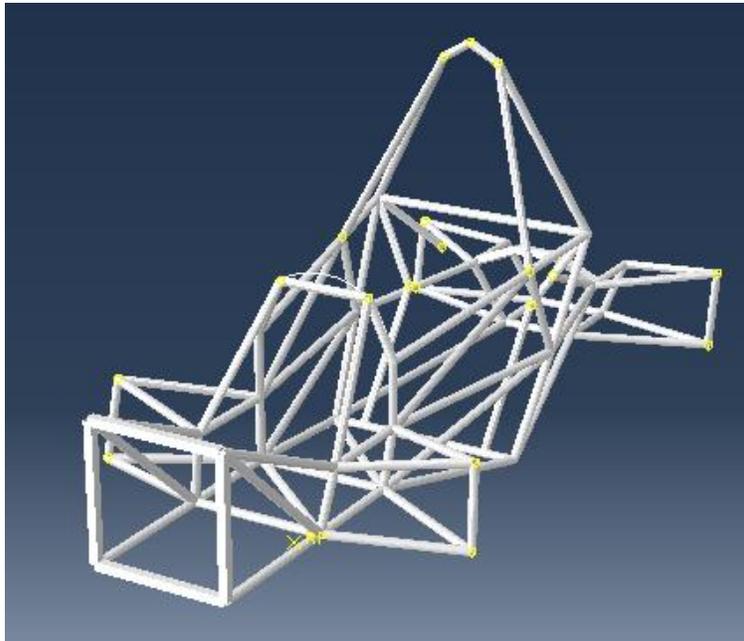


Fig. 3.28. Vista del modelo en ABAQUS CAE con las propiedades de sección asignadas.

Para simular la prueba de torsión se fijaron los puntos (mostrados con flechas ámbar en la imagen) que representan la sujeción de la suspensión trasera con las ruedas (como se hace en la prueba de torsión física) y el torque se aplicó en la suspensión delantera de la siguiente manera: el lado derecho se mantuvo fijo como pivote de la estructura y sobre el lado izquierdo se aplicó una fuerza vertical de 3000 N (flecha amarilla en la imagen).

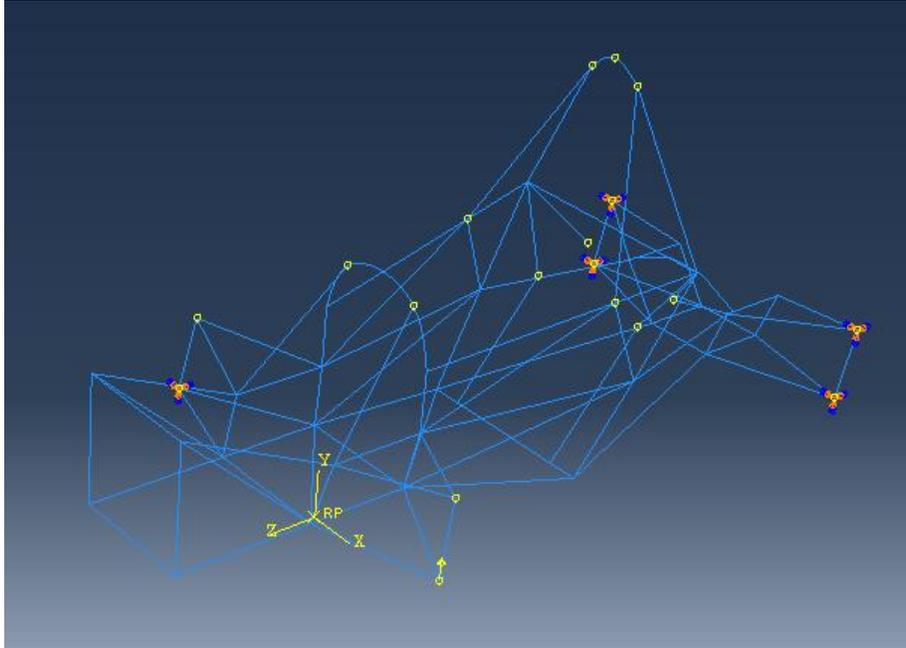


Fig.3.29. Condiciones de frontera y carga en el modelo de ABAQUS:

Con esta simulación se obtuvo una medición de desplazamiento en el punto de aplicación de la carga de 25.2 mm, como se muestra en la figura 3.30.

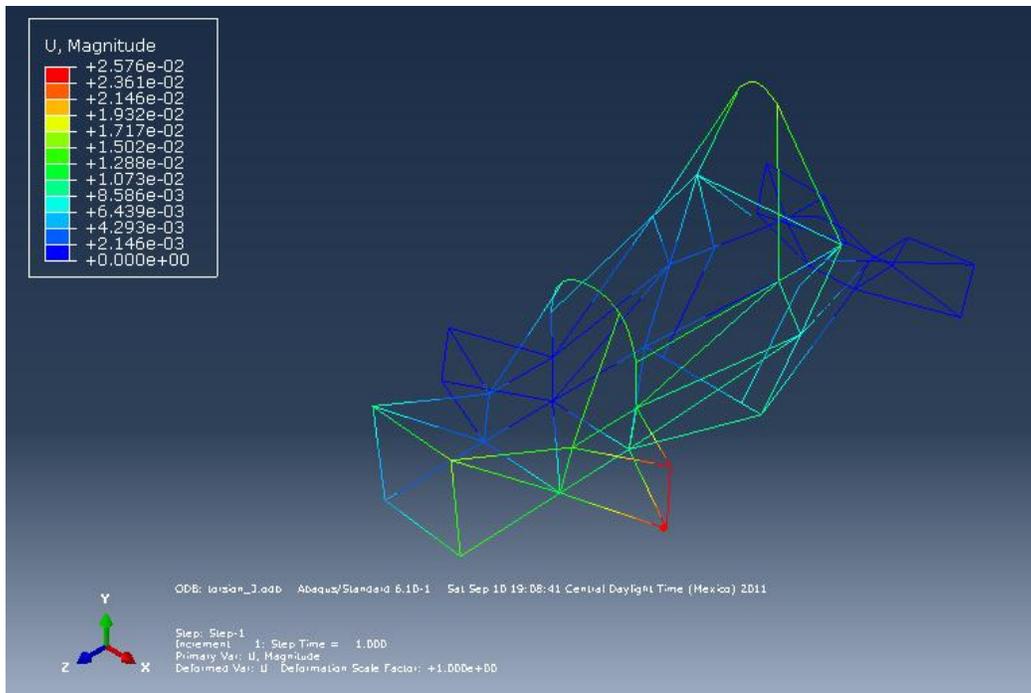


Fig. 3.30. Resultados de la simulación en ABAQUS CAE.

Con los datos obtenidos se puede realizar el cálculo de la rigidez torsional, como se muestra a continuación:

1. En una vista frontal se puede explicar muy bien las medidas necesarias para realizar el cálculo:

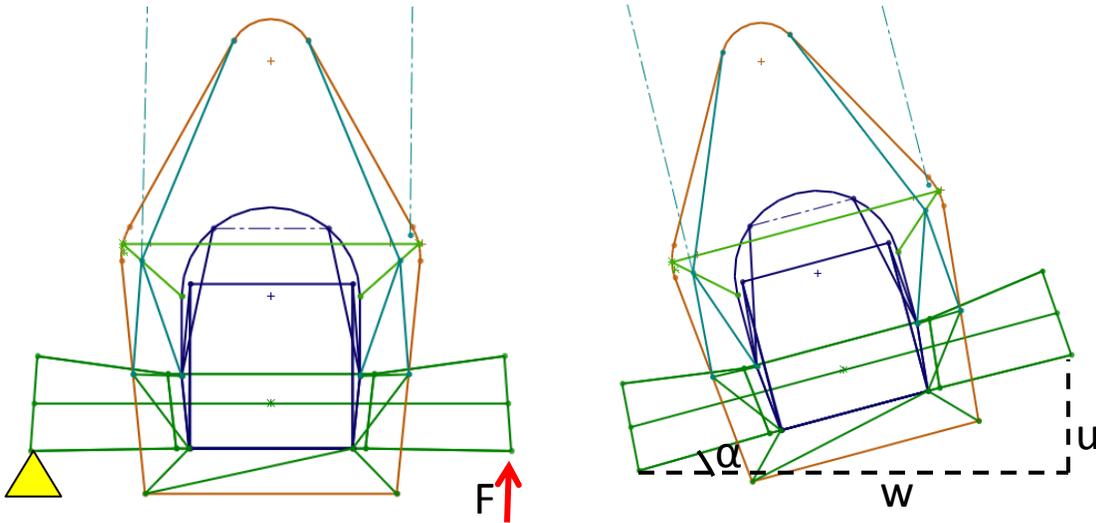


Fig. 3.31. Medidas utilizadas en el cálculo de la rigidez torsional.

La fórmula para calcular la rigidez torsional es $R = \frac{T}{\alpha} = \frac{F \cdot w}{\tan^{-1}\left(\frac{u}{w}\right)}$ (3.1)

2. Sustituyendo los datos obtenidos queda de la siguiente forma.

$$F=3000 \text{ N}$$

$$W=1.2 \text{ m}$$

$$U=0.0252 \text{ m}$$

$$R = \frac{3000(\text{N}) \cdot 1.2(\text{m})}{\tan^{-1}\left(\frac{0.0252 \text{ m}}{1.2 \text{ m}}\right)} \quad (3.2)$$

3. El resultado final es de:

$$R = 2934 \frac{\text{Nm}}{\text{deg}} \quad (3.3)$$

4. Lo cual indica que se cumple con el requerimiento de rigidez torsional mayor a 1760 NM/deg.

3.5.2. Selección de material.

El reglamento de la competencia contiene varias pautas para la selección del material de una estructura tubular (secciones B3.3 a B3.7 de [1]), entre ellas enuncia los requerimientos mínimos del material a utilizar en la estructura principal (sección B.3.3 de [1]). Estos fueron mencionados en la sección de requerimientos de este documento, sin embargo en relación con el tipo de acero a utilizar solo se marca un mínimo de contenido de carbono por lo que la selección en este aspecto es más libre.

Se plantearon dos opciones de acero para la elaboración del chasis, por una parte el conocido como acero estructural (generalmente apegado a la norma ASTM A36) y un acero aleado con cromo y molibdeno comúnmente empleado por los equipos participantes en la competencia (acero AISI 4130). A continuación se muestra una tabla comparativa de las propiedades de ambos tipos de acero:

Tabla 3.4. Propiedades de acero ASTM A36 y AISI 4130. [8]

Propiedad (unidad)	Acero ASTM A36	Acero AISI 4130
Módulo de elasticidad. (GPa)	200	205
Esfuerzo de cedencia. (Mpa)	250	435
Densidad. (g/cm ³)	7.85	7.85
Contenido de Carbono. (%)	0.26	0.28-0.33

Es evidente que la resistencia del acero aleado es mayor, muchos equipos lo utilizan debido a esto sin embargo su obtención en México es difícil, su precio es hasta 12 veces mayor que el acero estructural y, al soldarlo, deben tenerse mayores consideraciones para conservar sus propiedades.

Se decidió utilizar tubos de acero ASTM A36 que cumplen con las medidas mínimas requeridas debido a la facilidad de uso y obtención, así como bajo costo, de este material que cumple con las propiedades mecánicas necesarias para satisfacer el reglamento.

La SAE solicita que los equipos envíen antes de la competencia un reporte que demuestre que el chasis se apega a las reglas tanto de material como de estructura principal. Dicho reporte se encuentra en el anexo B de este documento.

En la siguiente imagen se muestra un modelo CAD de la estructura del chasis con el material asignado:

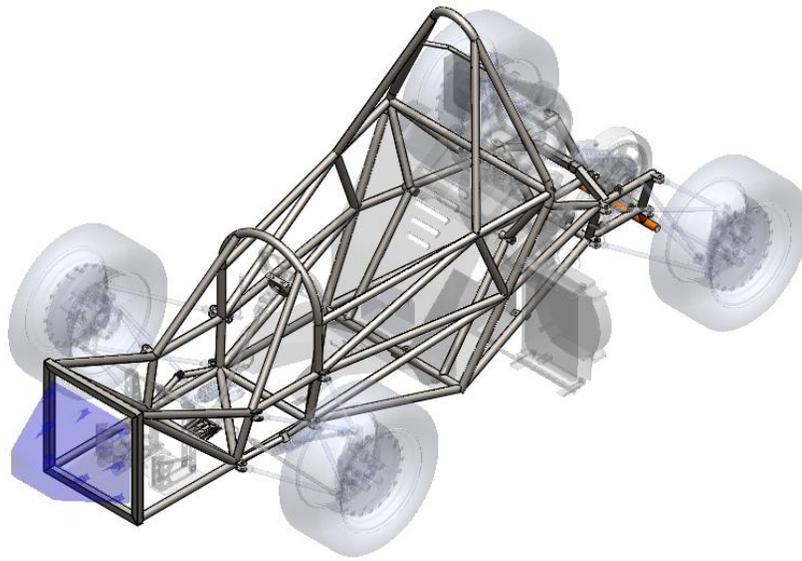


Fig. 3.32. CAD finalizado del bastidor diseñado.

3.5.3. Análisis de costo.

Como parte de la documentación que se requiere entregar a la SAE para participar en la competencia FSAE California se debe elaborar un reporte detallado del costo del vehículo, este se debe presentar en un formato elaborado por la misma sociedad que sigue un método ingenieril de estimación de costos en el cual se detalla el precio de los materiales, procedimientos y herramientas utilizados para la fabricación del vehículo. A continuación se muestra una versión traducida de este reporte, los precios fueron tomados del formato de la SAE y están diseñados para reflejar un precio estándar a nivel internacional.

Primero se estima el costo del material.

Tabla 3.5. Costo calculado del material del chasis.

No.	Material	Uso	Costo por unidad	Unidad	Presentación	Area [mm ²]	Longitud [mm]	Densidad[kg/mm ³]	Cantidad	Sub Total
1	Acero Estructural	Arcos antivuelco	\$ 27.00	kg	Tubo redonde 3/4" diametro nominal Ced. 40	217.93	4,815.00	7.85E-06	1	\$ 222.41
2	Acero Estructural	Miembros estructurales	\$ 27.00	kg	Tubo redondo 1"x.065"	123.18	6,275.00	7.85E-06	1	\$ 163.83
3	Acero Estructural	Miembros estructurales	\$ 27.00	kg	Tubo redondo 1"x.049"	94.45	16,860.00	7.85E-06	1	\$ 337.51
4	Acero Estructural	Miembros estructurales	\$ 27.00	kg	Tubo cuadrado 1"x.083"	196.42	2,024.00	7.85E-06	1	\$ 84.26
5	Acero Estructural	Soportes	\$ 27.00	kg	Placa 0.125" espesor	635.00	300.00	7.85E-06	1	\$ 40.38
7	Acero Estructural	Placa Antintrusion	\$ 27.00	kg	Placa 0.125" espesor	600	400.00	7.85E-06	1	\$ 50.87
Sub Total										\$ 899.26

Luego se añade el costo de los procesos requeridos para fabricar el chasis.

Tabla 3.6. Costo calculado para los procesos de fabricación del chasis.

No.	Proceso	Uso	Costo por u	Unidad	Cantidad	Sub Total
1	Corte de tubo	Miembro estructural	\$ 1.80	cm	294.64	\$ 530.35
2	Doblado de tubo	Arcos	\$ 9.00	doble	6	\$ 54.00
3	Abocardado de tubo	Preparación de miembros estructurales	\$ 9.00	lado	116	\$ 1,044.00
4	Soldadura	Miembros cuadrados	\$ 1.80	cm	70	\$ 126.00
5	Soldadura	Placa antiintrusión	\$ 1.80	cm	156	\$ 280.80
6	Soldadura de tubo r	Miembros redondos	\$ 4.56	cm	1600	\$ 7,296.00
7	Corte láser	Soportes de suspensión	\$ 1.20	cm	401	\$ 481.20
8	Barrenado	Soportes de suspensión	\$ 4.20	barreno	32	\$ 134.40
9	Corte láser	Soportes de sistemas	\$ 1.20	cm	592	\$ 710.40
10	Soldadura	Soportes varios	\$ 1.80	cm	102	\$ 183.60
Sub Total						\$ 10,840.75

Finalmente se toma en cuenta el costo de utilizar una plantilla de soldadura, como esta no será utilizada únicamente para esta pieza se asigna un valor de depreciación basado en la producción de 100 unidades.

Tabla 3.7. Costo calculado por el uso de un escantillón para soldadura.

No.	Herramienta	Uso	Costo por unid	Unidad	Cantidad	Valor de depreciación	Fracción	Sub Total
1	Plantilla de soldadura	Soldadura del bastidor	\$ 6,000.00	Punto fijado	22	3000	1	\$ 44.00
Sub Total								44.00

Y así se puede obtener un costo total sumando los subtotales de los tres rubros anteriores, el cual resulta en un precio estimado de \$11,784.00 (once mil setecientos ochenta y cuatro pesos) para la producción de un bastidor como este utilizando una plantilla de soldadura que fija 22 puntos en el espacio.

El reporte original que fue presentado y aprobado por la SAE en idioma inglés y con los precios expresados en dólares puede consultarse en el anexo C de este documento.

3.5.4. Métodos de manufactura.

Los miembros del chasis se unieron entre sí utilizando soldadura MIG, para llevar cada uno de ellos a la geometría exacta que debían tener para poder ser armados en la posición que les correspondía se generaron plantillas de cada uno de ellos desarrollándolos de manera plana en Solidworks, estas plantillas fueron luego adheridas al tubo redondo para indicar la forma que debía tener cada uno de sus extremos y luego se abocardaron utilizando herramientas sencillas como seguetas y limas.

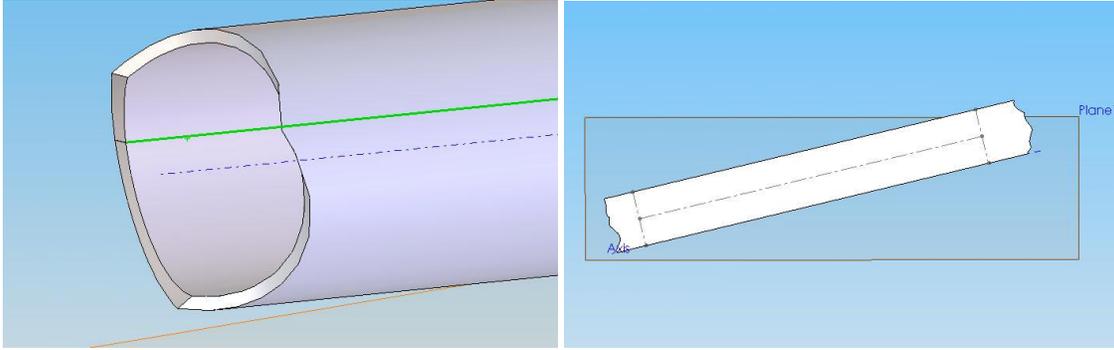


Fig. 3.33. Obtención de las plantillas de los tubos en SolidWorks.



Fig. 3.34. Ejemplo de tubo abocardado.

La estructura que permita armar partes del chasis en la posición que deben estar soldadas es una parte muy importante del proceso de manufactura de este sistema, entre más completo sea, facilitará más la labor del soldador. Para este año se decidió probar con un escantillón modificable, consistente de una mesa de acero perforada con un patrón continuo de barrenos que permita sujetar una serie de soportes en posiciones determinadas para detener las partes de la estructura.

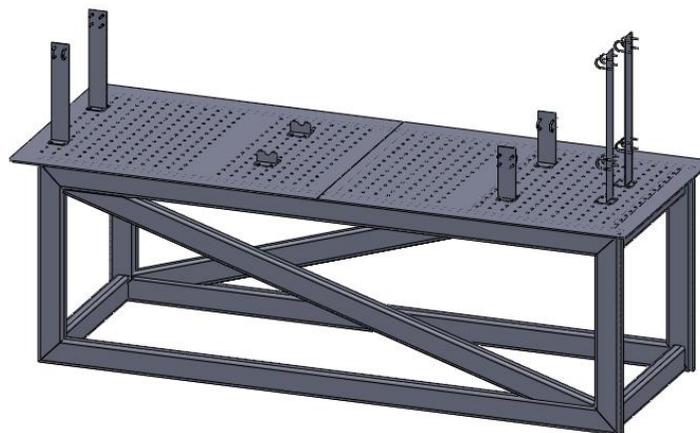


Fig. 3.35. Modelo digital del escantillón de soldadura.

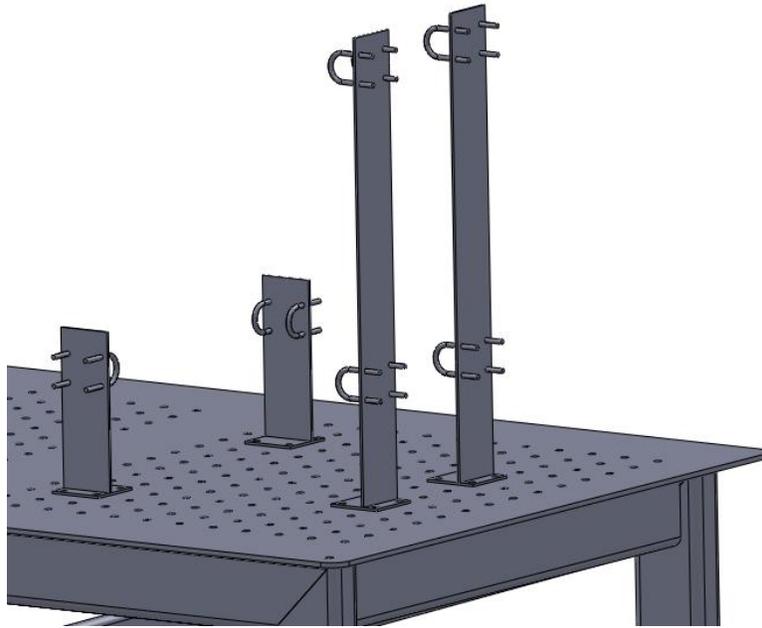


Fig. 3.36. Ejemplo de soportes removibles del escantillón.

La base de dicha mesa consistió de tubos rectangulares de acero de 2"X3" soldados entre sí. Las placas perforadas (hechas con placa de acero de 1/8" de espesor) y los soportes removibles (hechos con lámina de acero calibre 16) fueron cortados en láser para asegurar su precisión.

Además de los soportes para sujetar los tubos del chasis que se mostraron anteriormente se diseñó un soporte para el motor del vehículo con dos propósitos: el primero fue utilizarlo como indicador de la posición en que se encuentran los puntos de agarre del motor para incluirlo en la mesa de soldadura y garantizar su fácil incorporación al chasis sin arriesgar el motor; y el segundo fue utilizarlo para sujetar el motor y los componentes directamente ensamblados a él para realizar la calibración de éste fuera del chasis.

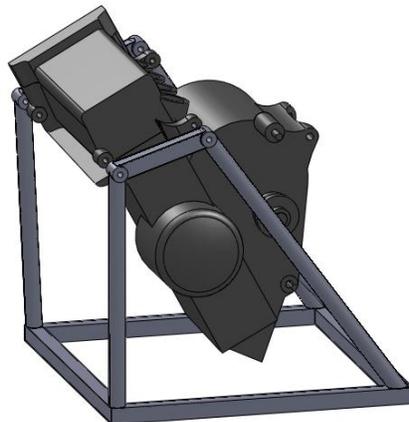


Fig. 3.37. Modelo digital del banco para el motor.

3.5.5. Planos y documentación.

Para realizar la construcción del chasis se necesita lo siguiente:

- Los planos de los arcos antivuelco para realizar los dobleces necesarios,
- Una lista de todos los miembros que lo componen indicando medidas y material específico para cada uno,
- Un plano de ensamble que indique la posición de cada uno de estos miembros y
- Las plantillas que se utilizan para llevar a cabo el abocardado de cada uno.

Estos documentos se pueden consultar en el anexo D (documentos para manufactura).

3.6. Planeación de producción.

Además de los documentos mencionados en el punto anterior se elaboró un pequeño manual para indicar la secuencia sugerida de ensamble y soldadura que se realizaría después de tener los tubos rolados para los arcos antivuelco, el cuadro de la pared frontal soldado por separado y los demás miembros abocardados y listos para soldar. A continuación se explican los 7 pasos generales:

1. Montar en la mesa de soldadura los arcos antivuelco y la pared frontal, soldarlos junto con los tubos laterales del piso.
2. Ensamblar y soldar los tubos de la estructura de impacto lateral, el cuadro de la suspensión delantera y los soportes de la pared frontal.
3. Ensamblar y soldar las sujeciones del arco frontal y del arco principal. Al finalizar este paso se tiene lista la zona frontal y media del chasis.
4. Montar en la mesa de soldadura el banco del motor.
5. Ensamblar y soldar los tubos que unen los soportes del motor con el arco principal y desmontar el banco del motor.
6. Ensamblar y soldar el cuadro de la suspensión trasera por separado.
7. Montar el cuadro de la suspensión trasera y las zonas frontal y media del chasis. Ensamblar los tubos que unen la parte trasera con el habitáculo y soldar. Al finalizar este paso se ha terminado la construcción de la estructura del chasis.

La imagen siguiente ilustra los 7 pasos mencionados.

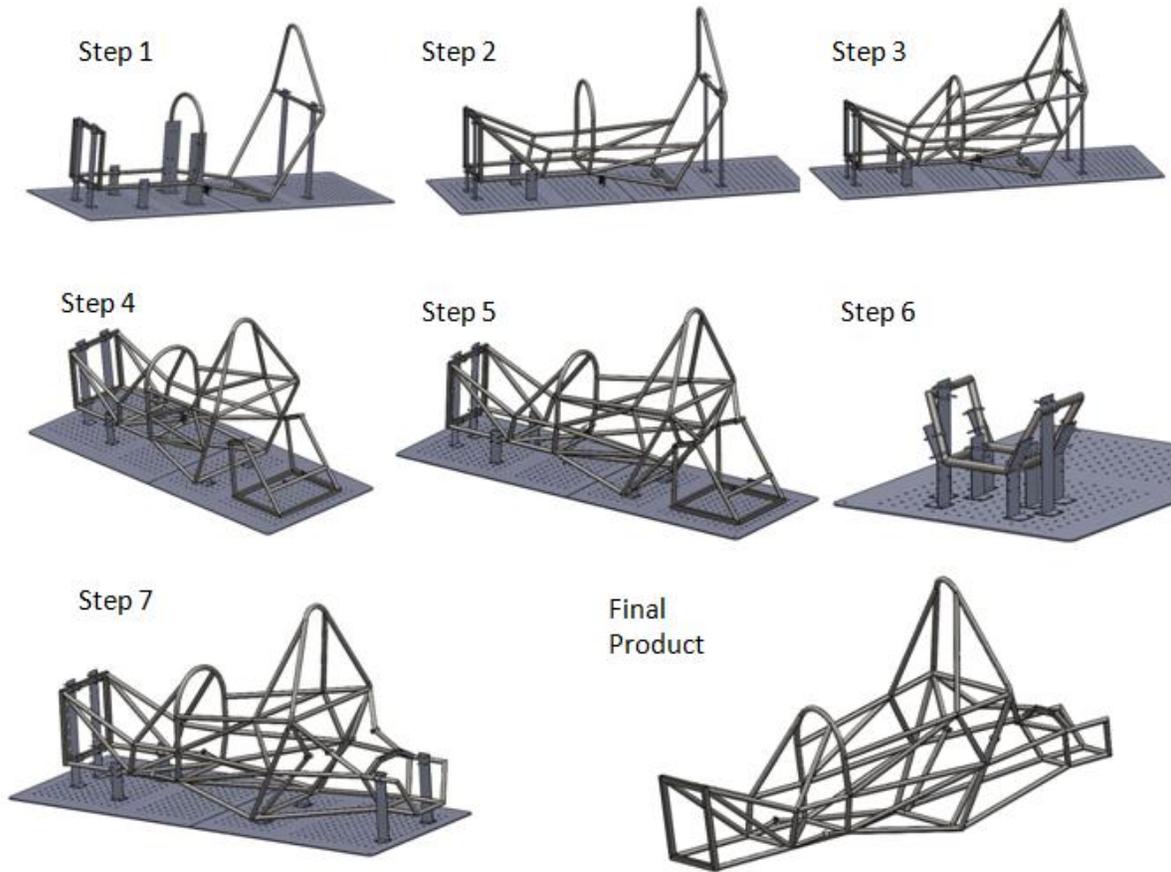


Fig. 3.38. Proceso de ensamble para la soldadura del chasis.

Una vez obtenido el diseño final y la documentación necesaria para manufacturar el mismo, se llevó a cabo la construcción del prototipo Fórmula SAE 2011. En los capítulos 4, 5 y 6 se presenta la documentación de este proceso y los resultados que se obtuvieron con este diseño en la competencia.

4. Construcción del chasis.

La fabricación del bastidor se llevó a cabo principalmente en los talleres de los laboratorios de ingeniería mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, las únicas excepciones a esto fueron los arcos antivuelco que fueron roladados por una empresa especializada de acuerdo a las especificaciones de los planos que se presentan en el anexo D-1, y los soportes para la mesa de soldadura que fueron cortados en láser por la empresa JL Láser.

A continuación se muestran algunas imágenes de la construcción. Todos los procesos estuvieron basados en el plan de manufactura presentado en el capítulo anterior y se utilizaron los documentos que se muestran en el anexo D.

En la primera imagen se puede observar la forma en que fue montado el bastidor sobre la mesa de soldadura para las primeras etapas de soldadura, también se pueden observar algunos de los tubos preparados para el ensamble después de haber sido abocardados.



Fig. 4.1. Montaje del bastidor en la mesa de soldadura para el paso 2 del proceso de soldado.

En la figura 4.2 se muestra el avance del paso 2 al paso 3 en la zona frontal del chasis, es apreciable que gracias a la disposición de los soportes no fue necesario mover la estructura en proceso de soldadura, lo cual disminuye el riesgo de cometer errores que se podrían presentar al no conservar la posición de los tubos.

En la figura 4.3 se observa el resultado del paso 3 del procedimiento de soldadura, en esta etapa ya se contaba con la zona frontal y el habitáculo completos, esta estructura sería después unida a la zona trasera del bastidor que debía ser soldada por separado para prevenir errores acumulados que podrían afectar a la suspensión trasera.



Fig. 4.2. Progreso de soldadura en la zona frontal (paso 2 a paso 3).



Fig. 4.3. Resultado del paso 3 del proceso de soldadura: zona frontal y habitáculo completos.



Fig. 4.4. Zona trasera del chasis y banco del motor.

Tras soldar la parte posterior del bastidor que sujetó la suspensión trasera y alberga el diferencial del vehículo (figura 4.4), esta es colocada en la posición relativa que debe tener con el resto de la estructura y con los soportes del motor, cuya posición es establecida con el banco del motor. Con este arreglo es posible soldar los últimos tubos que unen el arco principal con la parte posterior y los soportes del motor como se muestra en la figura 4.5.



Fig. 4.5. Etapa final de soldadura y resultado.

4.1. Evaluación de manufactura

Uno de los requerimientos para el chasis fue el de mantener una gran exactitud en la manufactura, procurando que no se presentarán desviaciones mayores a 5 mm. en las medidas del resultado final al ser comparado con el modelo CAD. Para vigilar esto se tomaron una serie de precauciones en el desarrollo que se han mencionado anteriormente pero se resumirán a continuación:

- Fabricar una mesa de soldadura con soportes desmontables que permiten fijar 22 puntos del chasis en el espacio para permitir una soldadura eficaz.
- Preparar los tubos con plantillas exactas de la geometría que deben tener para ensamblar entre si, obtenidas del CAD del chasis. Este procedimiento hace que el ensamble de los tubos asemeje el proceso de armar un rompecabezas, los tubos ensamblan solo en la posición en la que deben ir.
- El rolado de los arcos antivuelco fue realizado por una empresa especializada en este procedimiento debido a que el espesor de los tubos utilizados era muy grande y la geometría era muy compleja (se pueden consultar los planos en el anexo D).
- Durante todo el proceso de soldadura se vigilaron las medidas conforme se avanzaba para corroborar que se ajustara al diseño.

Con estas medidas de seguridad se obtuvo un resultado bastante apegado al diseño del chasis a excepción de un detalle que excedió el límite propuesto de desviación: el arco principal no fue doblado exactamente de acuerdo a las especificaciones de los planos presentados a la empresa que lo elaboró, la revisión de medidas reveló una desviación de aproximadamente 2 ° en una vista superior de la línea que une ambos lados del arco en comparación con el diseño. Este error afectó principalmente las medidas del habitáculo pero se permitió su existencia ya que no afectó ninguna medida que repercutiera en el desempeño del vehículo.

Además de las medidas realizadas durante la fabricación, la verdadera evaluación de exactitud se llevó a cabo durante el ensamble general del vehículo ya que cualquier error que hubiera escapado a las observaciones anteriores se revelaría al montar los componentes en el lugar designado para cada uno. A continuación se explicarán brevemente las observaciones realizadas durante este proceso.

Zona frontal

En la parte frontal del chasis no se detectó ningún error que excediera el límite permitido y todos los componentes que debían ser ensamblados en esa área pudieron incorporarse sin problemas. Así mismo se comprobó el paso libre de la plantilla que sería insertada en esta zona durante la competencia.



Fig. 4.6. Zona frontal del chasis durante el proceso de ensamble del vehículo.

Zona media (habitáculo)

Ya se mencionó anteriormente el error detectado en las medidas del arco principal, sin embargo fue posible contrarrestar dicho error con algunos ajustes a los miembros que conforman el habitáculo del chasis permitiendo que esta zona albergará de manera correcta al piloto y permitiera el paso sin obstáculos de la plantilla que debía ser ingresada aquí durante la competencia.



Fig. 4.7. Pruebas del vehículo, el habitáculo cumple con las medidas diseñadas.

Zona trasera.

Las medidas de la zona trasera se ajustaron con bastante exactitud a las medidas de diseño, sin embargo en esta área se descubrió un error de diseño.

Durante la elaboración del modelo digital del chasis se utilizó también un modelo digital del motor del vehículo, este último fue realizado con base en mediciones realizadas con un banco de obtención de coordenadas que se considera muy exacto por lo cual se confió en el modelo para ajustar la zona que alberga al motor con muy poca holgura.

Una vez que se inició el ensamble de la zona trasera del vehículo se descubrió que algunos elementos del motor no habían sido incluidos en el modelo digital, esto generó algunas interferencias que dificultaron el ensamble del motor.



Fig. 4.8. Ensamble de la zona trasera del vehículo.

5. Resultados

Una vez construido el prototipo de chasis e integrado al vehículo completo se tuvo la oportunidad de probar dicho prototipo en un entorno real de funcionamiento, esto brinda una perspectiva de análisis realmente valiosa. Se pudo verificar el cumplimiento real de los requerimientos y especificaciones de diseño y observar el desempeño del chasis como sistema del vehículo de carreras construido. A continuación se mencionarán los resultados obtenidos.

5.1. Cumplimiento de requerimientos.

El primer requerimiento que se verificó fue la exactitud de manufactura, sobre esto se explicó ya en el capítulo anterior donde se mencionaron las precauciones en el proceso de manufactura y se detalló que solamente se detectó una zona de error mayor al esperado relacionado con la manufactura del arco principal y los miembros directamente unidos a él.

Además una vez terminada la manufactura del bastidor se realizaron algunas medidas simples para obtener los valores que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Cumplimiento de requerimientos.

Parámetro	Valor requerido	Valor alcanzado
Peso	< 45 kg	36 kg
Altura	<1100 mm.	1146 mm.
Ancho	<900 mm.	712 mm.
Largo	<2547 mm.	2316 mm.
Rigidez torsional	>1760 Nm/deg	2934 Nm/deg

En la tabla anterior se aprecia que se cumplió con todas las especificaciones excepto con la de la altura requerida, en el siguiente capítulo se mencionan las recomendaciones del autor para corregir este problema de sobredimensionamiento del chasis.

Para verificar el cumplimiento de los requerimientos del reglamento se llevaron a cabo revisiones constantes durante el ensamble del prototipo, sin embargo la prueba final del cumplimiento de estas especificaciones es el escrutinio técnico que se lleva a cabo durante la competencia. En la siguiente sección se mencionará el resultado de la participación del prototipo final en la competencia Fórmula SAE 2011. La competencia además es el escenario más adecuado para verificar el cumplimiento de los requerimientos restantes (ergonomía y facilidad de servicio).

5.2. Desempeño durante la competencia FSAE California 2011.

Resulta siempre importante vigilar el desempeño de un diseño cuando es puesto en funcionamiento ya que la calidad de manufactura puede tener un impacto importante al generar diferentes propiedades a las evaluadas.

En el caso del chasis es algo difícil de apreciar si el diseño se desempeña de manera adecuada durante la operación del vehículo, ya que para percibir el efecto que un cambio en su rigidez torsional tiene en la dinámica del vehículo se necesita de pilotos con muchos años de experiencia. Se requiere de un accidente para evaluar su capacidad real de proteger al piloto y de varios procesos de ensamble y desensamble para percibir la facilidad de dar servicio al vehículo. En general el bastidor del vehículo fue considerado un éxito por las siguientes razones.

Durante la operación del vehículo en prácticas previas a la competencia soportó sin afectaciones el impacto de un banquetazo que dobló por completo uno de los brazos de control de la suspensión trasera.



Fig. 5.1. Resultado del impacto de una de las ruedas contra la banqueta de un estacionamiento de la Facultad de Ingeniería.

La primera prueba de la competencia es un escrutinio estático para revisar que el vehículo cumpla con todos los requerimientos del reglamento, es en este evento cuando se realiza la inserción de las plantillas para revisar la apertura de la cabina. El prototipo FSAE UNAM 2011 superó el escrutinio técnico en el primer intento.



Fig. 5.2. El prototipo FSAE 2011 durante el escrutinio técnico.

A pesar de que la cabina del vehículo resultó alta en comparación con otros vehículos en la competencia, los cuatro pilotos superaron sin problemas una prueba de evacuación que consiste en abandonar el vehículo en menos de 5 segundos.



Fig. 5.3. Comparación de la cabina del prototipo de la UNAM con otro vehículo de la competencia.

Durante las pruebas dinámicas no se observó, ni fue percibida por los pilotos una torsión del chasis que provocara cambios inesperados en la dinámica del vehículo.



Fig. 5.4. El prototipo construido durante la prueba de resistencia de la competencia.

Como ya se ha mencionado, los resultados obtenidos con el chasis construido con base en el diseño presentado en esta tesis fueron satisfactorios pero se encontraron errores cuya corrección y mejora podrían ayudar al diseño de un mejor chasis, del tipo presentado aquí, en años posteriores. Las mejoras que se proponen para generar un mejor chasis se presentan en el siguiente capítulo.

6. Recomendaciones

Como se mencionó en el capítulo anterior el desempeño general del chasis construido para el prototipo Fórmula SAE UNAM 2011 fue satisfactorio, sin embargo se identificaron una serie de oportunidades de mejora para los futuros diseños de este tipo de estructuras para proyectos similares, este capítulo está dedicado a recomendar algunas mejoras tanto de diseño como de métodos de fabricación.

6.1 Mejoras de diseño.

Evidentemente el aspecto más importante que debe notarse para mejorar el diseño fue el error reportado en el capítulo anterior relativo a la zona del motor. Se recordará que, debido a la falta de detalle en el modelo digital del motor, se pasaron por alto algunos elementos que provocaban interferencias durante el ensamble.

Para evitar lo anterior se sugiere primero que se verifique la calidad y exactitud de los modelos digitales de cada uno de los componentes antes de utilizarlos para definir las medidas del chasis. Pero sobre todo se recomienda que se genere una zona con mayor espacio que permita una mayor tolerancia a este tipo de errores y se realicen estudios de trayectoria de ensamble para los elementos que se planea mantener en espacios reducidos tomando en cuenta el método de ensamble destinando espacio para herramientas, manos de operadores y otros elementos involucrados en esta tarea.

La segunda recomendación es modificar la posición de manejo del piloto hacia una en la que se encuentre más horizontal. Esto permitirá reducir la altura del arco frontal y de todo el vehículo como resultado. En la siguiente imagen se observa una comparación entre el chasis actual y un auto que muestra una posición de manejo como la que se sugiere.



Fig. 6.1. Propuesta de cambio en la posición de manejo.

La tercera y última recomendación es diseñar la estructura que alberga al diferencial como un elemento separado del conjunto del chasis, esto permite un mejor empaquetamiento e incluso una mejor sujeción del diferencial. El autor considera que a partir de la geometría que el presente chasis tenía en esta zona es relativamente fácil observar cómo se podría hacer este cambio ya que para lograrlo solo hay que enviar los puntos de anclaje de la suspensión trasera hacia adelante y los miembros de esa zona se volverían irrelevantes. La siguiente imagen muestra una comparación entre esta zona en el chasis diseñado y un auto que incorpora ya un diseño como el que se propone.

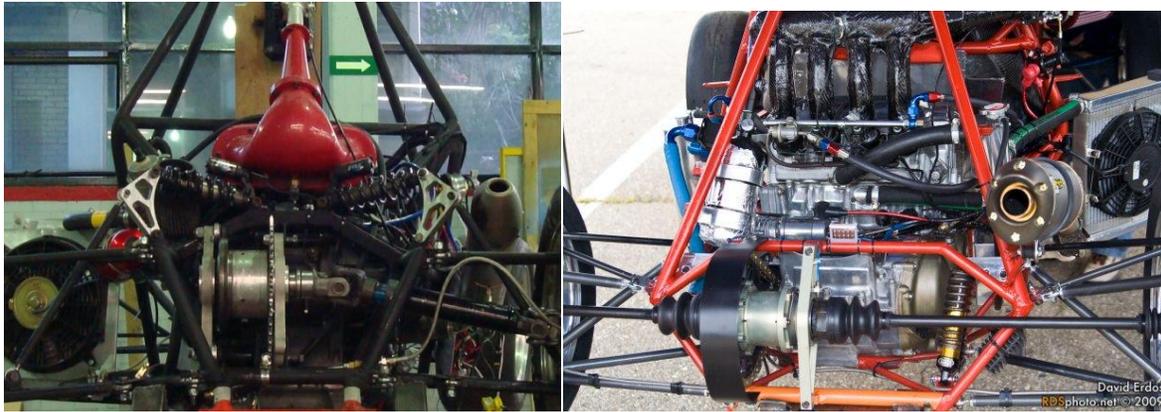


Fig. 6.2. Evolución sugerida de la zona trasera del chasis.

6.2. Mejoras de construcción.

Si bien la construcción del chasis 2011 tuvo una calidad aceptable, existen una serie de perfeccionamientos muy puntuales al proceso de manufactura que tendrían un gran impacto en cambiar de un proceso casi completamente artesanal a un proceso industrial más efectivo y exacto.

Primero y principalmente se sugiere trabajar aún más en el diseño de los soportes de la mesa de soldadura, específicamente se sugiere que se diseñen soportes para sostener los tubos superiores de la estructura que en este chasis no se sujetaron y que se diseñen de una manera más rígida, utilizando placa de acero con un grosor mínimo de 1/8 de pulgada para evitar que los soportes más elevados se doblen y generen errores en la posición de los tubos.

También se sugiere buscar un proveedor de doblado de tubos que utilice máquinas de control numérico en caso de diseñar arcos antivuelco con geometrías similares a las diseñadas para este chasis ya que los métodos manuales utilizados por las empresas que realizaron el doblado de estos arcos tienen una alta tendencia al error en geometrías así. En su defecto se sugiere conservar la trayectoria de doblado de los arcos en un solo plano para facilitar su fabricación.

Finalmente se recomienda disminuir la tolerancia de manufactura a 2 mm de desviación máxima para el chasis en general y 1 mm de desviación máxima para los puntos de anclaje de la suspensión.

7. Conclusiones

En esta tesis se ha presentado el trabajo realizado para diseñar, construir y probar un chasis para el prototipo de vehículo tipo fórmula monoplace del proyecto Fórmula SAE UNAM 2011. La importancia de esta estructura dentro del vehículo se presentó en el capítulo 2, dedicado a los conceptos generales que deben tenerse como antecedentes para esta tesis, y se comprobó la interacción que tiene este dispositivo directamente con todos los sistemas del coche al ser el sistema que une a todos los demás en un conjunto.

Los objetivos planteados para este trabajo se cumplieron en su totalidad ya que se realizó todo el proceso de diseño del producto desde la investigación hasta la producción, esto fue posible gracias al seguimiento de una metodología preestablecida a través de todo el desarrollo, lo cual permitió que se enfocaran los esfuerzos hacia el objetivo final sin desperdiciar tiempo ni recursos.

El apego a un método organizado de diseño y manufactura también permitió que se cumpliera con la mayoría de los requerimientos de diseño planteados al inicio del trabajo. Por lo tanto, es apreciable gracias a los resultados obtenidos con esta tesis, que el seguimiento del método de diseño aquí presentado ofrece buenos resultados en el diseño de productos de ingeniería.

Otro beneficio obtenido en este trabajo fue el haber presentado el prototipo construido dentro de una competencia internacional de ingeniería bien organizada, gracias al entorno provisto por este evento se pudo trabajar en un proyecto integral que generó un caso de aplicación real para el diseño de un sistema automotriz, además de brindar una excelente oportunidad para probar el automóvil construido junto a competidores de universidades de alto nivel internacional, forzando a los estudiantes a dejar la zona de confort cultural y de lenguaje al tener que presentar su diseño ante jueces de otro país y en idioma inglés.

La participación de la Facultad de Ingeniería en competencias de este tipo permite que los estudiantes utilicen los conocimientos obtenidos en las clases para resolver problemas reales que retan su intelecto y creatividad, de esta forma se obtiene un refuerzo invaluable en su preparación y además se les prepara para trabajar en equipo y preparar proyectos pensando en todos los aspectos que intervienen en el desarrollo de los mismos además de la ingeniería, como son las finanzas y la mercadotecnia.

Fuentes

1. 2011 Formula SAE® Rules.

(<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2011fsaerules.pdf>)

(Septiembre 2010)

2. How car suspension works.

(<http://auto.howstuffworks.com/car-suspension1.htm>)

(20 de agosto de 2011)

3. Costin, M. (1974), RACING AND SPORTS CAR CHASSIS DESIGN, B. T. Batsford LTD.

4. Miliken, W. F. (1995), RACE CAR VEHICLE DYNAMICS, SAE Publications.

5. Genta, G. (2009), THE AUTOMOTIVE CHASSIS, Springer.

6. Ullman, D. (1997), THE MECHANICAL DESIGN PROCESS, McGraw Hill.

7. Dieter, G. (1999), ENGINEERING DESIGN: A MATERIALS AND PROCESSING APPROACH, McGraw Hill.

8. MatWeb: Material Property Data.

(<http://www.matweb.com>)

(15 de agosto de 2011)

9. Reimpell, J. (2001), THE AUTOMOTIVE CHASSIS: ENGINEERING PRINCIPLES, Butterworth Heinemann.

10. Wakeham, K. (2009), INTRODUCTION TO CHASSIS DESIGN, University of Newfoundland.

11. Howard, M. (2000), SPACEFRAMES: A STUDY OF AN EMERGING BODY
COSTRUCTION TECHNOLOGY, University of Bath.
12. Tien T. Lan (2005), HANDBOOK OF STRUCTURAL ENGINEERING, CRCR Press.
13. Smith, C. (1978), TUNE TO WIN, Aero Publishers INC.
14. Trzesniowski, M. (2008), RENNWAGENTEchnik, Vieweg & Teubner.
15. The Frame Jig.

<http://www.chopperhandbook.com>

(22 de agosto de 2011)

ANEXO A

FORMULA SAE CALIFORNIA DESIGN REPORT

Este anexo contiene el reporte de diseño del vehículo original entregado a la SAE para la competencia FSAE California 2011.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CAR # 036

Introduction

This is our university's second prototype and as such it's a great opportunity to improve over the last one making good use of the knowledge we acquired during the last season.

Design Philosophy

For our second car all the team's efforts were focused on designing a better, lighter vehicle than its predecessor. Although the previous car was reliable, it was a lot heavier than we would have liked it to be, so the most important thing we wanted for the new one was to improve our designs to save weight on each subsystem without compromising its reliability.

We based our designs on the previous ones when we felt we had got off to a good start and could follow the baselines of that design to improve upon it. On other systems of the car we felt like we had a better chance of getting an improved design if we started off from scratch and so was the case on a small number of subsystems.

Like all previous designs, a very important factor was that we were able to manufacture the parts using the available machinery in our university's workshop, this way we could keep the cost down and we didn't depend on third parties to finish our parts.

Frame

Our second frame was designed as an evolution of the one we presented in 2010. Thus, it is still a tubular space frame as it worked fine the previous year, and we used ASTM A36 steel once again because it is easily obtained in Mexico and it complies with the requirements of the FSAE rules.

Our main concern was to make this one a much lighter frame than last year's, and to clear the back of the car from extra tubing which caused us assembling problems in the past. To accomplish this, we decided to move the main hoop braces to the cockpit area and translate several of the triangulation members to the front too.

The engine was considered as one of the main driving forces of our design and we focused on making a tight and well dimensioned space to support it. The suspension system design influenced our frame greatly too, thanks to the dampers being oriented in a longitudinal way, we were able to clear both the front and rear ends of the frame from crossing members.

Prior to the manufacturing of the frame, we tested the CAD design with FEA analysis in SolidWorks to make sure that our structure complied with our requirements.

The impact attenuator we will be using is the standard one provided by BSCI Inc., we decided to use this alternative in order to be able to use the time we would have spent in designing our own impact attenuator to better improve other systems.

For the shifter mechanism we decided to use a push-pull cable due to the weight, in this way we are reducing almost in a 70% the weight compared to our first car, and also it is easy to assemble due to the flexibility of the cable.

Having this type of shifter we can guarantee that we are going to have fast gear changes and reliability in all aspects.

Ergonomics

The user interface in the car is a priority in our general design. In the first stage the ideal driving posture aided the frame design, assigning the cockpit area using both anthropometric dimensions obtained in theory tables in combination with the measures of our selected drivers and the dimensions mentioned in the rules.

The safety and comfort factors were also considered. This is reflected in the seat design, which brings a comfortable surface for an average driver keeping him in the right posture to perform at his best on the track, and in the steering wheel which is also student designed to provide the best interaction between the driver and the car with an ergonomic shape.

Body

The entire body design is an evolution of our previous car keeping the aesthetics and the interaction between systems as a main factor. With a sort of eclectic style without following a specific trend, it's more than a reinterpretation of what we presented last year in competition.

With a combination of continuous shapes that go from the nose through to the side pods and engine bonnet, the entire body is designed to be a tempting platform for our branding program. Aggressive and uncompromising, inspired in fighter planes and sharks, the body proposal is designed to reflect the work philosophy of the team as a serious contender on the track and to keep the attractiveness for the target market.

Built from Fiberglass Reinforced Plastic to reach the balance between weight and cost, GFRP is easy to shape without sophisticated technology and to repair in case of breakdown, it's also an economic way to replace metal alloys with a composite material that is easy to obtain in Mexico, being this our main reason to choose it instead of carbon fiber.

The Body is composed of several removable panels with openings that allow the access to the engine, fuel system, suspension, etc. The sidepods are integrated to these panels, protecting the cooling and exhaust system and providing a visible surface to mount the vehicle identification.

Suspension and Steering

For this year the team decided to reduce the track width and the wheel base. For the front suspension we decided to use a pull-rod configuration due to its contribution to lowering the center of gravity, on the other hand, the rear suspension is still a push-rod configuration because of the differential packaging. In both cases the team uses steel tubing for the control arms, yet for this year the dimensions were changed in order to reduce the weight and improve the overall performance. We selected springs with a lower stiffness than last year's and we are using FOX Van R dampers once again.

The steering system uses a simple rack and pinion unit located in front of the axis and just over the lower control arms of the front suspension. The R&P unit's ratio is low so we maintained short steering arms to avoid a slow response system.

Validation of these systems was done using WinGeo and ADAMS software simulations.

Intake Manifold

We have selected a throttle body with a throttle bore of 28mm to improve overall response, and to reduce the cross sectional area change with regard to the restrictor. It's made of aluminum and it is very light weight (only 331g).

This year's plenum was designed to optimize flow conditions in it, the geometry consists of smooth surfaces that deliver the air directly to the chamber from the beginning to the end of this system. It's made of Polyphenylene Sulfide (PPS) which has great chemical, thermal and mechanical resistance and its weight is very acceptable.

The runners are calculated for a tuning peak at 10,000 RPM, they are made of PPS too and the rapid prototyping manufacturing made it possible to have a smooth radius at the entrance of the runners and a continuous curvature with the plenum simultaneously. Each Runner has an injector port integrated.

Fuel system

The engine is controlled by a PE-EDGE programmable ECU, running in full sequential mode and using an Alpha-N strategy. Fuel is injected at each port at 38 PSI and spark plugs use individual coil on plug controls.

The ECU's built in data logging and wireless communication capabilities permit easier tuning on track and on the dynamometer.

The exhaust system's configuration and the slim shape of the frame restricted the space for the fuel tank a lot, this resulted in a strangely shaped, but low positioned system, which avoids raising

the center of gravity. The fuel tank is made of welded Aluminum 1100 sheet metal with an external fuel pump.

Exhaust

The configuration for this system is a 4-1, as last year's, but it features smoother curves to reduce head loss. We are using a big muffler to get a good gas flow, reduce backpressure and noise emissions; this was an important consideration for us since last year we had problems clearing the noise test event.

Brake system

The brake system of the car is made consists of an aluminum pedal with steel pivots, rotors are made with a A36 steel with thickness of 1/4in before rectification and 6in diameter, the master cylinders are 5/8" and 3/4" inches diameter. That dimensions were chosen based on the results calculated above in the report.

Cooling

We will use a modified heat exchanger air/water from a Nissan Tsuru car, the frontal area was reduced and for that reason the cooling fan has a bigger flow rate, also the filler cap is now in the cooling lines instead of the radiator. The new low profile fan reduces nearly half of the weight with practically the same flow rate.

Unsprung mass

This system is designed to comply with the requirements settled by the suspension geometry and steering system. Uprights are CNC machined from 6061-T6 aluminum and have integral caliper mounts, as well as integrated tie-rod mounts in the front ones. Hubs are aluminum made in the front and steel made in the rear. We tested the hubs and uprights with Finite Element Analysis in SolidWorks. The bearings choice was the same as last year's, thus making overall dimensions of both uprights and hubs quite similar as before. Once again 13"x7" tires and rims are used.

The brake system of the car incorporates an aluminum pedal with steel pivots, 4 rotors made of A36 steel, 5mm thick and 8" in diameter, the master cylinders are 3/4" and 5/8" diameter for the front and rear, respectively.

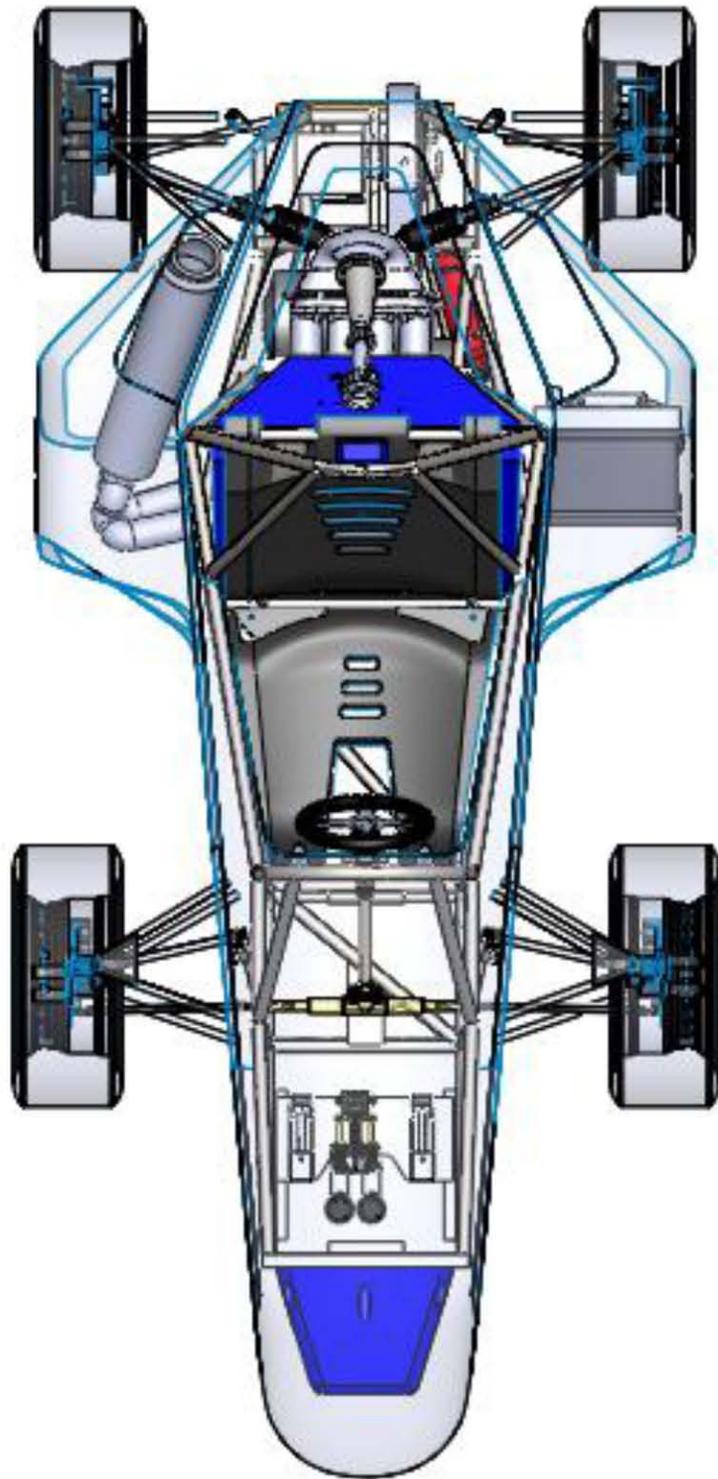
Transmission

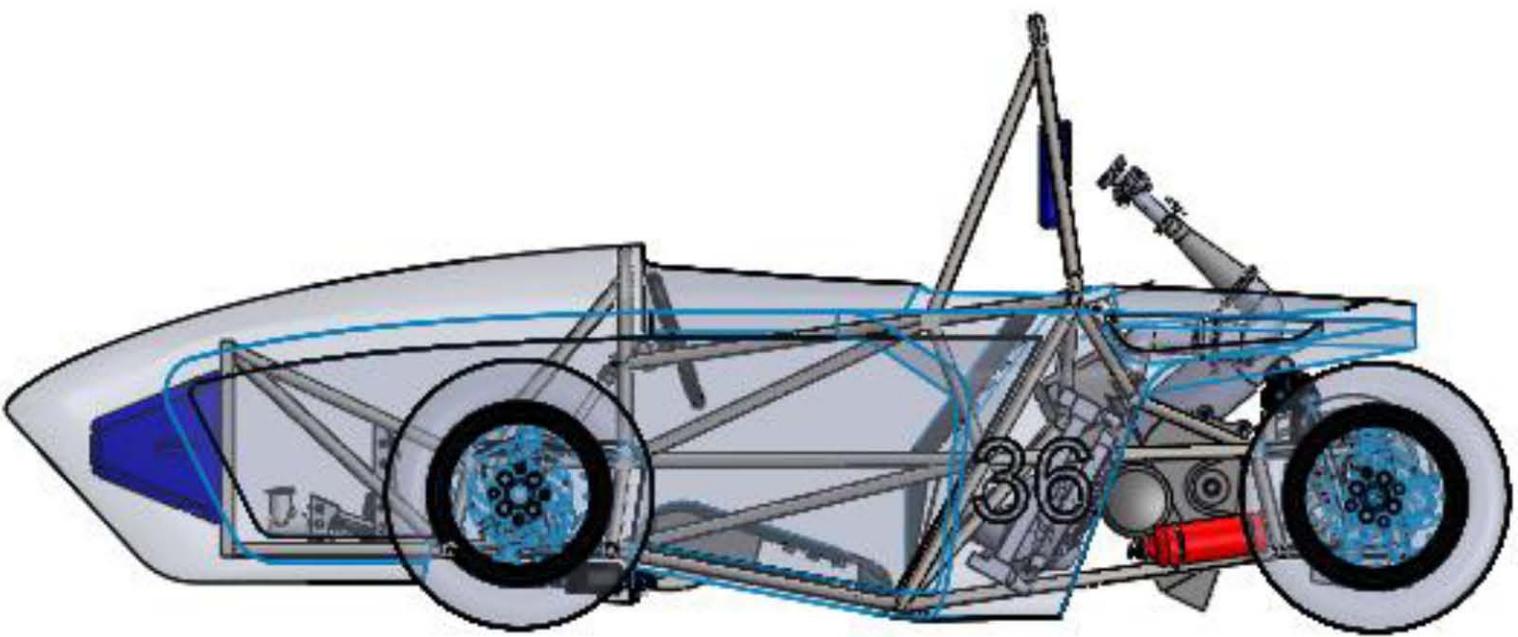
In the transmission system, the design focused on optimizing it, reducing weight of all components to improve overall performance of the car.

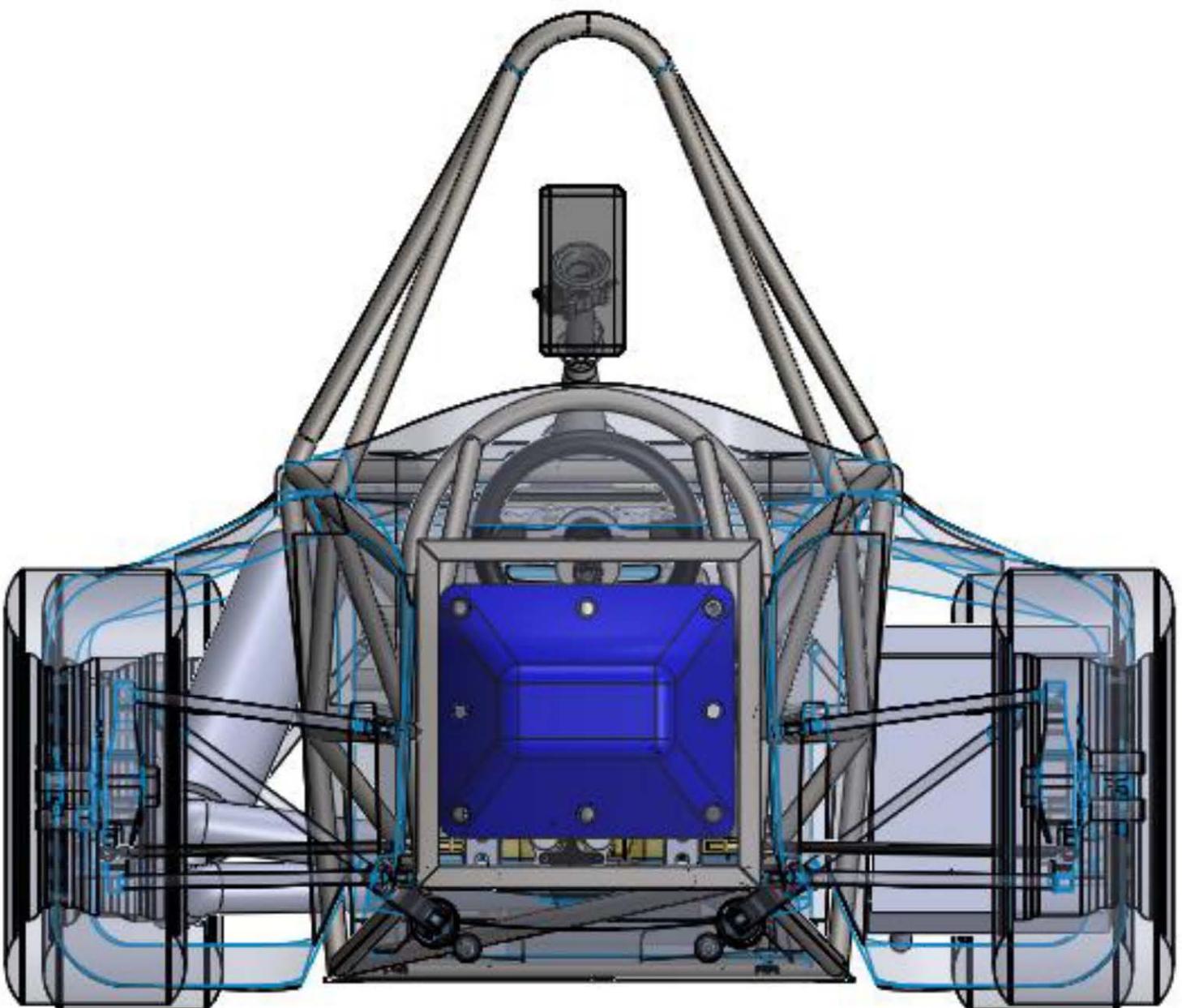
Driveshafts have been improved for this season, thanks to a better analysis of engine performance it was possible to make some new axles to better suit our vehicle. Using torque data specific for our engine we were able to greatly reduce weight on the halfshafts by reducing their diameter to suit our engine.

We will use a chain-driven LSD differential, as it yielded good results last year but with a couple of changes to the parts around it. Since the braking system changed from single differential mounted brake to outboard brakes, the differential mounts are now much lighter, we ran FEAs of them in Algor to ensure they would work as planned.

Finally, work was also dedicated to eliminate dead space within the vehicle, which allowed better packing of the entire transmission system, which in turn resulted in the chain losing a few links when compared to the previous model, which directly translates into weight reduction.







ANEXO B

2011 FSAE STRUCTURAL EQUIVALENCY FORM

Este anexo contiene el informe del material utilizado en el chasis, elaborado para entregarse a los jueces de la competencia FSAE California 2011.



**APPENDIX B-1
2011 FSAE™ STRUCTURAL EQUIVALENCY FORM – Page 1 of 2**

This form must be completed and submitted by all teams no later than the date specified in the Action Deadlines on specific event website. The FSAE Technical Committee will review all submissions which deviate from the FSAE® rules and reply with a decision about the requested deviation. All requests will have a confirmation of receipt sent to the team. Structural Equivalency Forms (SEF) and supporting calculations must be submitted electronically in Adobe Acrobat Format (*.pdf). The submissions must be named as follows: schoolname_sef.pdf using the complete school name. Please submit to the person indicated in the Action Deadlines for each event.

***In the event that the FSAE Technical Committee requests additional information or calculations, teams have one week from the date of the request to submit the requested information.**

University Name Universidad Nacional Autónoma de México Car Number(s) & Event(s) #36, FSAE West 2011
 Team Contact Israel Ayala E-mail Address isaia.ayala.israel@gmail.com
 Faculty Advisor Dr. Armando Ortiz E-mail Address armando@unam.mx

Is proof of equivalency for your design required for any of the rules?

- Yes. Alternative material was used to that specified in B.3.3.1
 No. Chassis did not deviate from baseline requirements

Baseline Material Used	Alternative Material Used	Rule No.	Rule Description	Design Description and/or Material Used
X		B3.10	Main Roll Hoop Tubing	
X		B3.11	Front Roll Hoop Tubing	
X		B3.12	Main Roll Hoop Bracing Tubing	
X		B3.13	Front Hoop Bracing – Tube Frames	
X		B3.18	Front Bulkhead – Tube Frames	Square 1.00" x 1.00" x 0.049"
X		B3.19	Front Bulkhead Support – Tube Frames	
X		B3.20.6	Impact Attenuator Anti-intrusion Plate	
X		B3.24	Side Impact Systems – Tube Frames	
		B3.32	Main Hoop Attachment – Monocoque	
		B3.33	Front Hoop – Monocoque	
		B3.34	Main Hoop Bracing Attach – Monocoque	
		B3.33	Front Hoop Bracing – Monocoque	
		B3.29	Front Bulkhead – Monocoque	
		B3.30	Front Bulkhead Support – Monocoque	
		B3.31	Side Impact Systems – Monocoque	
		B3.20.3	Impact Attenuator Attach – Monocoque	
		B5.2.4	Safety Harness Attach – Monocoque	
X		B5.4.1	Shoulder Harness Bar	

Attachment Checklist (make sure all are included in your report)

- ✓ Receipt, letter of donation or proof for non-steel materials (composite, honeycomb, resin, etc).
- ✓ Properties for all non-steel materials
- ✓ Monocoque Laminate Testing data and pictures
- ✓ Holes drilled in any regulated tubing require a deviation, include area and moment of inertia

ATTACH PROOF OF EQUIVALENCY

Please see "Structural Equivalency Guide" on SAE website for more information about the proof of equivalency.
 TECHNICAL COMMITTEE DECISION/COMMENTS

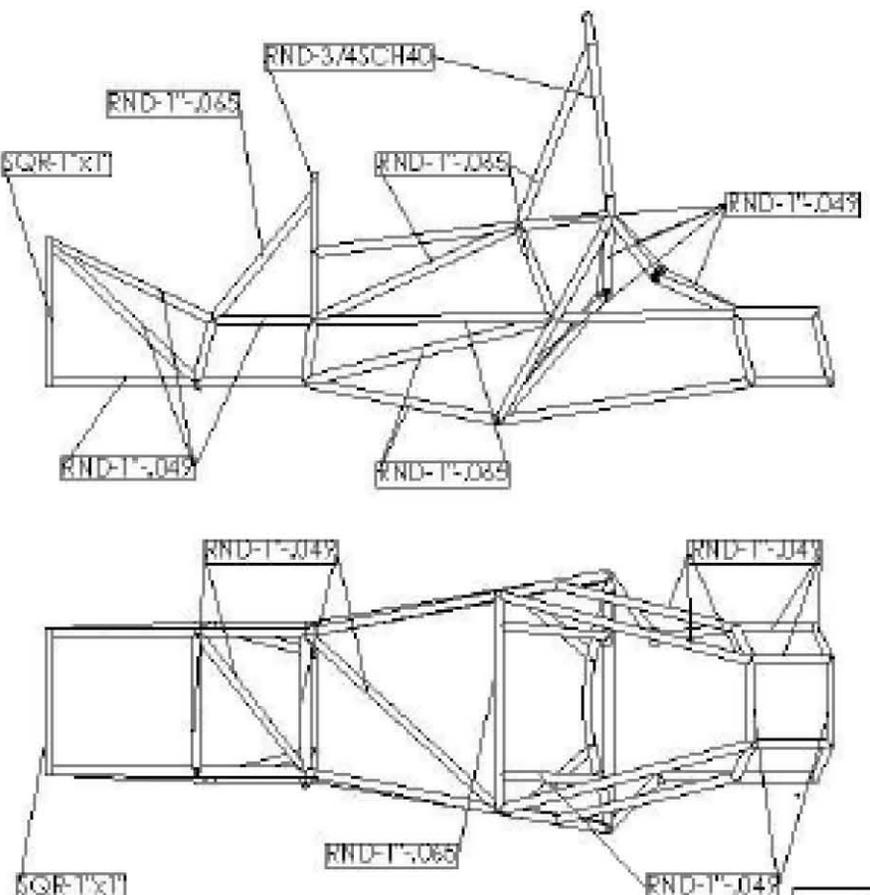
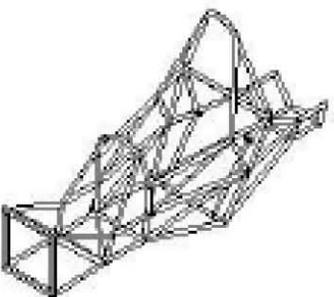
Approved by _____ Date _____

NOTE: THIS FORM AND THE APPROVED COPY OF THE SUBMISSION MUST BE PRESENTED AT TECHNICAL INSPECTION AT EVERY FORMULA SAE EVENT ENTERED

APPENDIX B-1
2011 FSAE™ STRUCTURAL EQUIVALENCY FORM Page 2 of 2

University Name: Universidad Nacional Autónoma de México, Car Number(s) & Event(s) 496 FSAE West

Please attach pictures of the frame and/or monocoque below for review during the SEF process. Please label all tubes to show outer diameter and wall thickness. Three view drawings and isometric views of the structure (CAD, FEA models, etc) are acceptable. Note: The final decision about all designs will be made at technical inspection. Approval of an SEF does not guarantee passing Technical Inspection.



LABE	OUTSIDE D IANETER	WALL THICKNESS
SQR-1"x1"	Square 1"x1"	0.049Inch
RND-3/4SCH40	1.315Inch	0.111Inch
RND-1"-049	1Inch	0.049Inch
RND-1"-085	1Inch	0.085Inch



2011 FSAE Structural Equivalency Form Additional Information

Material Chemical Properties:

Our main and front hoops are made from structural steel which complies with ASTM A 36 steel standard, it's mechanical properties are presented in the following table compared with SAE 1010 steel properties.

SAE 1010		ASTM A36	
Chemical composition: C=0.080 - 0.13 %, Fe=99.18 - 99.62 %, Mn=0.30 - 0.60 %, P <= 0.040, S <= 0.050 %		Chemical Composition: C=0.25 - 0.290 %, Cu=0.20 %, Fe=98.0 %, Mn=1.03 %, P <= 0.040 %, Si=0.280 %, S <= 0.050 %	
Density	7.872 g/cm ³	Density	7.85 g/cm ³
Modulus of elasticity	200 GPa	Modulus of elasticity	200 GPa
Tensile strength	325 MPa	Tensile strength	400 MPa
Yield strength	180 MPa	Yield strength	250 MPa

Also, in the following table it can be seen that a 3/4 inch nominal, schedule 40 pipe is within the required measure for the front and main hoops.

Table 38: Schedule 40 Pipe Dimensions

Size Inches	Diameters		Nominal Thickness Inches	Transverse Area			Length of Pipe per Sq. Foot of		Cubic Feet per Foot of Pipe	Weight per Foot Pounds	Number Threads per Inch of Screw
	External Inches	Internal Inches		External Sq. Ins.	Internal Sq. Ins.	Metal Sq. Ins.	External Surface Feet	Internal Surface Feet			
1/8	.405	.209	.060	.129	.057	.072	9.431	14.199	.00039	.244	27
1/4	.540	.304	.080	.229	.104	.125	7.073	10.493	.00072	.424	18
3/8	.675	.493	.091	.358	.191	.167	5.658	7.747	.00133	.567	18
1/2	.840	.622	.109	.554	.304	.250	4.547	6.141	.00211	.850	14
3/4	1.050	.824	.113	.806	.533	.333	3.637	4.635	.00370	1.130	14
1	1.315	1.049	.133	1.358	.804	.484	2.904	3.641	.00500	1.678	11 1/2
1 1/8	1.660	1.380	.140	2.164	1.495	.669	2.301	2.767	.01039	2.272	11 1/2
1 1/2	1.900	1.610	.145	2.835	2.036	.709	2.010	2.372	.01414	2.717	11 1/2
2	2.375	2.007	.154	4.430	3.355	1.075	1.608	1.847	.02330	3.652	11 1/2
2 1/2	2.875	2.469	.203	6.492	4.788	1.704	1.328	1.547	.03325	5.793	8
3	3.500	3.068	.216	9.621	7.303	2.228	1.091	1.245	.05134	7.575	8
3 1/2	4.000	3.548	.226	12.56	9.886	2.680	.954	1.076	.06866	9.100	8
4	4.500	4.026	.237	15.90	12.73	3.174	.848	.948	.08840	10.790	8
5	5.563	5.047	.258	24.30	20.00	4.300	.688	.756	.1389	14.61	8
6	6.625	6.065	.280	34.47	28.89	5.581	.576	.629	.2006	18.97	8
8	8.625	7.901	.322	58.42	50.02	8.399	.442	.478	.3552	28.55	8
10	10.750	10.029	.385	90.76	78.85	11.90	.355	.381	.5476	40.48	8
12	12.750	11.938	.406	127.64	111.9	15.74	.299	.318	.7763	53.6	8
14	14.000	13.125	.437	153.94	135.3	18.64	.272	.280	.8354	63.0	8
16	16.000	15.009	.500	201.05	176.7	24.35	.238	.254	1.223	78.0	8
18	18.000	16.874	.563	254.85	224.0	30.85	.212	.225	1.555	105.0	8
20	20.000	18.814	.593	314.15	278.0	36.15	.191	.203	1.926	123.0	8
24	24.000	22.026	.687	452.40	402.1	50.30	.159	.169	2.793	171.0	8

FORMULA SAE**SAE** *International*

Sources:

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7573afc5e06c4a518c01efba4690182>

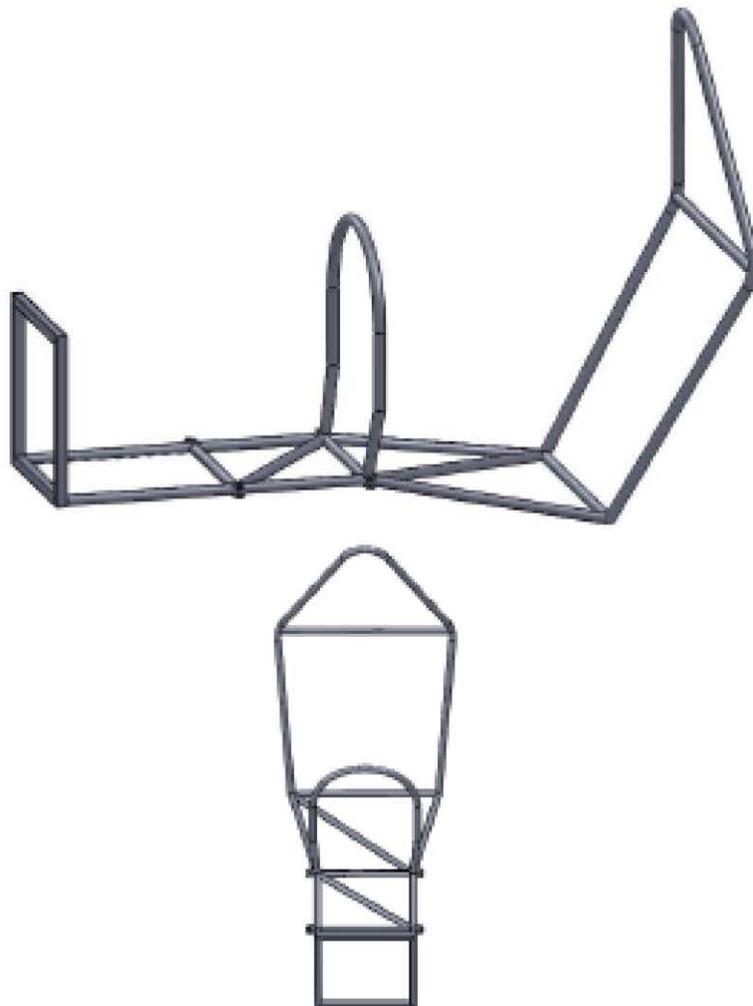
&

http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=carbon_steel_sae_1010

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6>

Main and front hoops extension

The next pictures are intended to probe that our main and front hoops both extend from the lowest Frame Member on one side of the Frame, up, over and down to the lowest Frame Member on the other side of the Frame.



ANEXO C

2011 FSAE COST REPORT

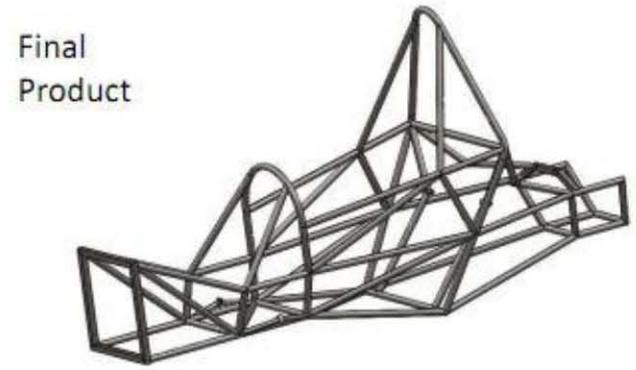
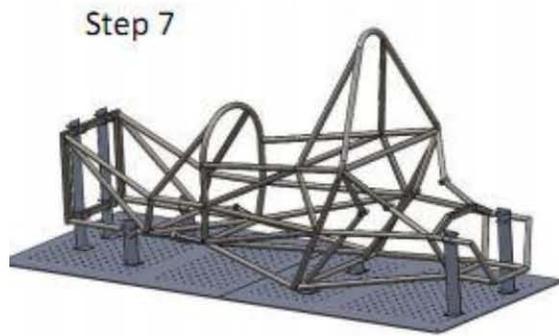
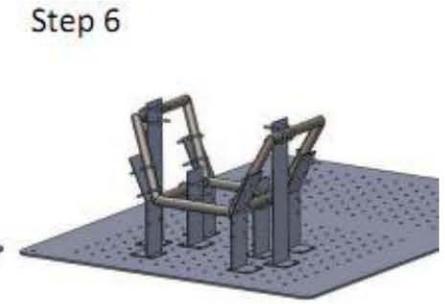
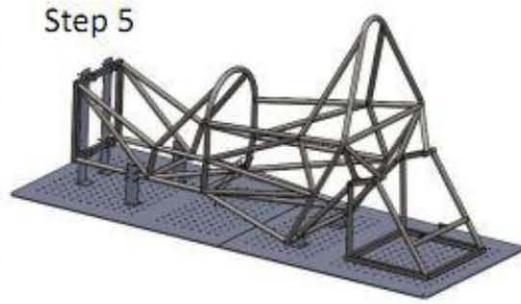
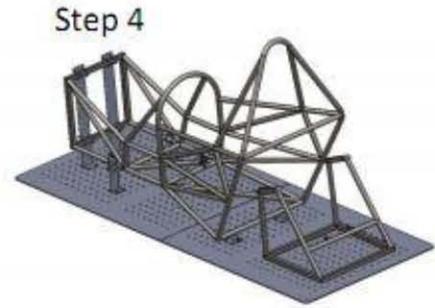
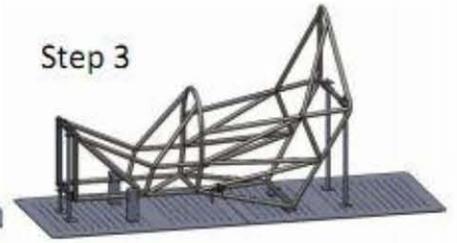
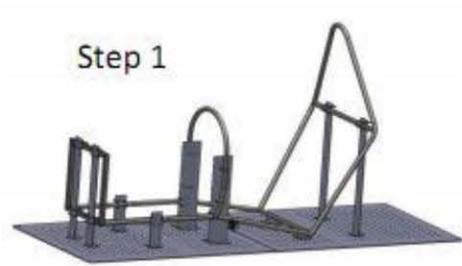
Este anexo contiene una copia de la parte referente al chasis del reporte de costos entregado a la SAE.

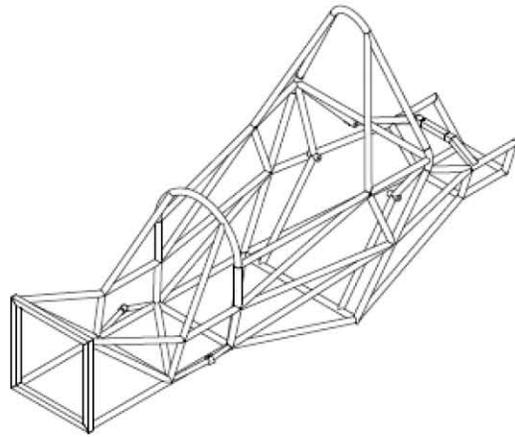
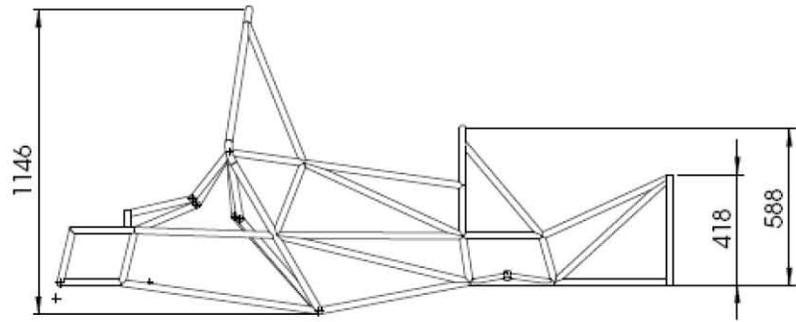
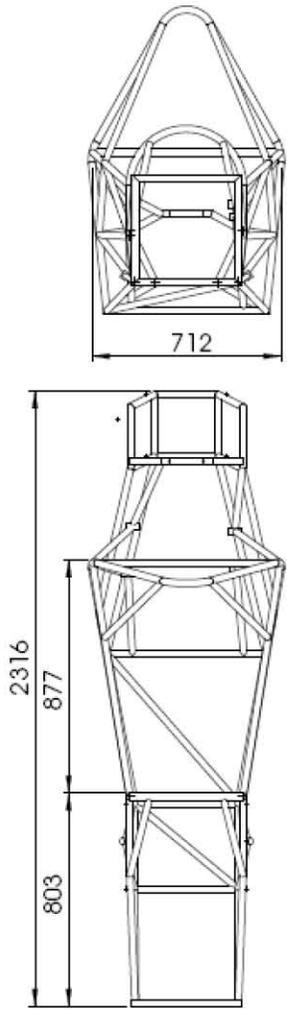
University	Universidad Nacional Autónoma de México	Car #	036	Part Cost	\$ 1,062.20
System	Frame and Body			Qty	1
Assembly	Frame	Welding Fixture	Picture 1		
Part	Frame	Plan	Picture 2	Extended Cost	\$ 1,062.20
P/N Base	FSAEC-11-036-FR-A0004-AA				
Suffix	AA				
Details	Frame				

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Area Name	Area [mm^2]	Length[mm]	Density[kg/mm]	Quantity
1	Steel, Mild (per kg)	Roll Hoops	\$ 2.25		kg	Cross Section RND 3/4" nom Sched 40	217.93	4,815.00	7.85E-06	1
2	Steel, Mild (per kg)	Frame members	\$ 2.25		kg	Cross Section RND 1"x.065"	123.18	6,275.00	7.85E-06	1
3	Steel, Mild (per kg)	Frame members	\$ 2.25		kg	Cross Section RND 1"x.049"	94.45	16,860.00	7.85E-06	1
4	Steel, Mild (per kg)	Frame members	\$ 2.25		kg	Cross Section Square 1"x.083"	196.42	2,024.00	7.85E-06	1
5	Steel, Mild (per kg)	Tabs and supports	\$ 2.25		kg	Cross Section Plate 0.125"	635.00	300.00	7.85E-06	1
7	Steel, Mild (per kg)	AntiIntrusion Plate	\$ 2.25		kg	Rectangular Area	600	400.00	7.85E-06	1
										Sub Total

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier ID	Mult. Val.	Sub Total	
1	Tube cut	Frame members cutting.	\$ 0.15	cm	294.64			\$ 44.20	
2	Tube bends	Hoops	\$ 0.75	bend	6			\$ 4.50	
3	Tube end preparation for welding	Frame members preparation	\$ 0.75	end	116			\$ 87.00	
4	Weld	Square frame members	\$ 0.15	cm	70			\$ 10.50	
5	Weld	Anti intrusion plate	\$ 0.15	cm	156			\$ 23.40	
6	Weld-round tubing	Round frame members	\$ 0.38	cm	1600			\$ 608.00	
7	Laser cut	Susp. Supports	\$ 0.10	cm	401	19	3	\$ 120.30	
8	Drilled holes < 25.4 mm dia.	Susp.Supports	\$ 0.35	hole	32			\$ 11.20	
9	Laser cut	Systems supports	\$ 0.10	cm	592			\$ 59.20	
10	Weld	Supports	\$ 0.15	cm	102			\$ 15.30	
								Sub Total	\$ 983.60

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total	
1	Welding fixture	Frame welding	\$ 500.00	Point	22	3000	1	\$ 3.67	
								Sub Total	3.67





Measures in mm.

ANEXO D

DOCUMENTACIÓN PARA MANUFACTURA

Este anexo contiene los documentos necesarios para realizar la manufactura del chasis diseñado para el prototipo Fórmula SAE UNAM 2011.

ANEXO D-1: LISTA DE TUBOS

TUBO	Nombre	Sección	LONGITUD(mm)	CALIBRE
2	FRONT HOOP	FRONT	1450	CED 40
3 U	BULK UP		463	PTR C16
3 D	BULK DOWN		463	PTR C16
4 R	BULK RIGHT		470	PTR C16
4 L	BULK LEFT		470	PTR C16
5R	FRONT LONG R		800	C18
5L	FRONT LONG L		800	C18
6R	FRONT S MEDIUM R		643	C18
6L	FRONT S MEDIUM L		643	C18
7R	FRONT S HIGH R		587	C18
7L	FRONT S HIGH L		587	C18
8	FLOOR 1		450	C18
9	FLOOR 2		565	C18
10	FLOOR 3		450	C18
11R	FRONT A LOW R		240	C18
11L	FRONT A LOW L		240	C18
12R	FRONT A MEDIUM R		358	C18
12L	FRONT A MEDIUM L		358	C18
13R	FRONT A HIGH R		527	C16
13L	FRONT A HIGH L		527	C16
1	MAIN HOOP	COCKPIT	2706	CED 40
2	FRONT HOOP		1450	CED 40
5*R	COCKPIT GROUND R		645	C16
5*L	COCKPIT GROUND L		645	C16
12	FLOOR 3		450	C18
14	FLOOR 4		820	C18
15	FLOOR 5		660	C18
16R	COCKPIT S LOW R		823	C16
16L	COCKPIT S LOW L		823	C16
17R	COCKPIT S MED R		774	C16
17L	COCKPIT S MED L		774	C16
18R	COCKPIT S HIGH R		721	C18
18L	COCKPIT S HIGH L		721	C18
19R	COCKPIT A LOW R		340	C18
19L	COCKPIT A LOW L		340	C18
20R	COCKPIT LONG R		942	C18
20L	COCKPIT LONG L		942	C18

21R	COCKPIT A HIGH R		636	C16
21L	COCKPIT A HIGH L		636	C16
22	HEAD		761	CED 40
1	MAIN HOOP		2706	CED 40
15	FLOOR 5		660	C18
22	HEAD		761	CED 40
23R	ENGINE BOX LOW R		831	C18
23L	ENGINE BOX LOW L		831	C18
24	FLOOR 6		294	C18
25R	LEG LOW R		516	C18
25L	LEG LOW L		536	C18
26R	LEG HIGH R		336	C18
26L	LEG HIGH L		335	C18
27R	ENGINE BOX HIGH R		601	C18
27L	ENGINE BOX HIGH L		601	C18
28R	ARM LOW R	REAR	307	C18
28L	ARM LOW L		315	C18
29R	DIFF BOX FRONT R		283	C18
29L	DIFF BOX FRONT L		283	C18
30R	DIFF BOX LOW R		293	C18
30L	DIFF BOX LOW L		293	C18
31R	DIFF BOX BACK R		282	C18
31L	DIFF BOX BACK L		282	C18
32R	DIFF BOX HIGH R		293	C18
32L	DIFF BOX HIGH L		293	C18
33	FLOOR 7		294	C18
34R	ARM HIGH R		322	C18
34L	ARM HIGH L		337	C18

ANEXO D-2: PLANOS DE UBICACIÓN DE LOS TUBOS

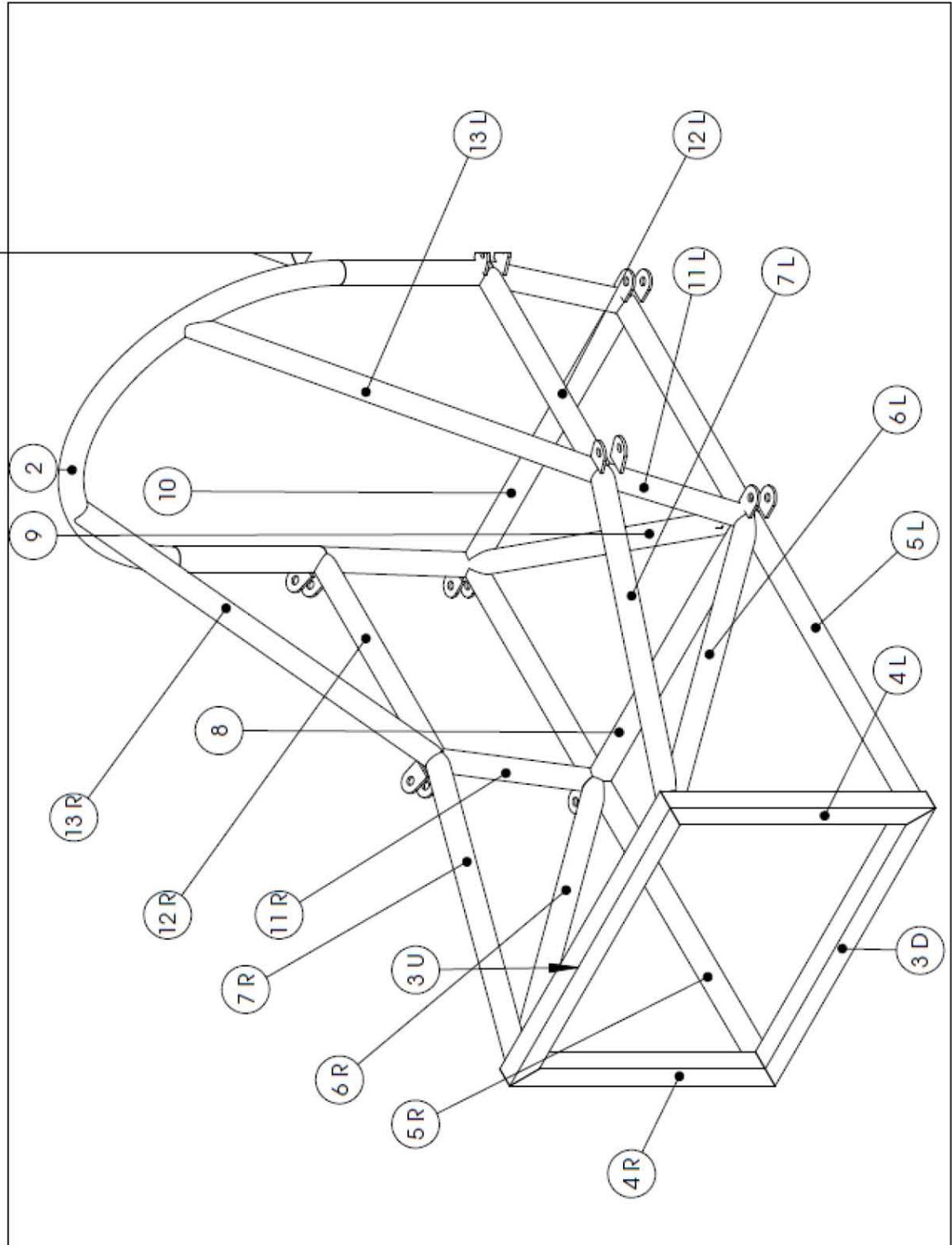


Fig. D-2.1 Tubos de la parte delantera del bastidor.

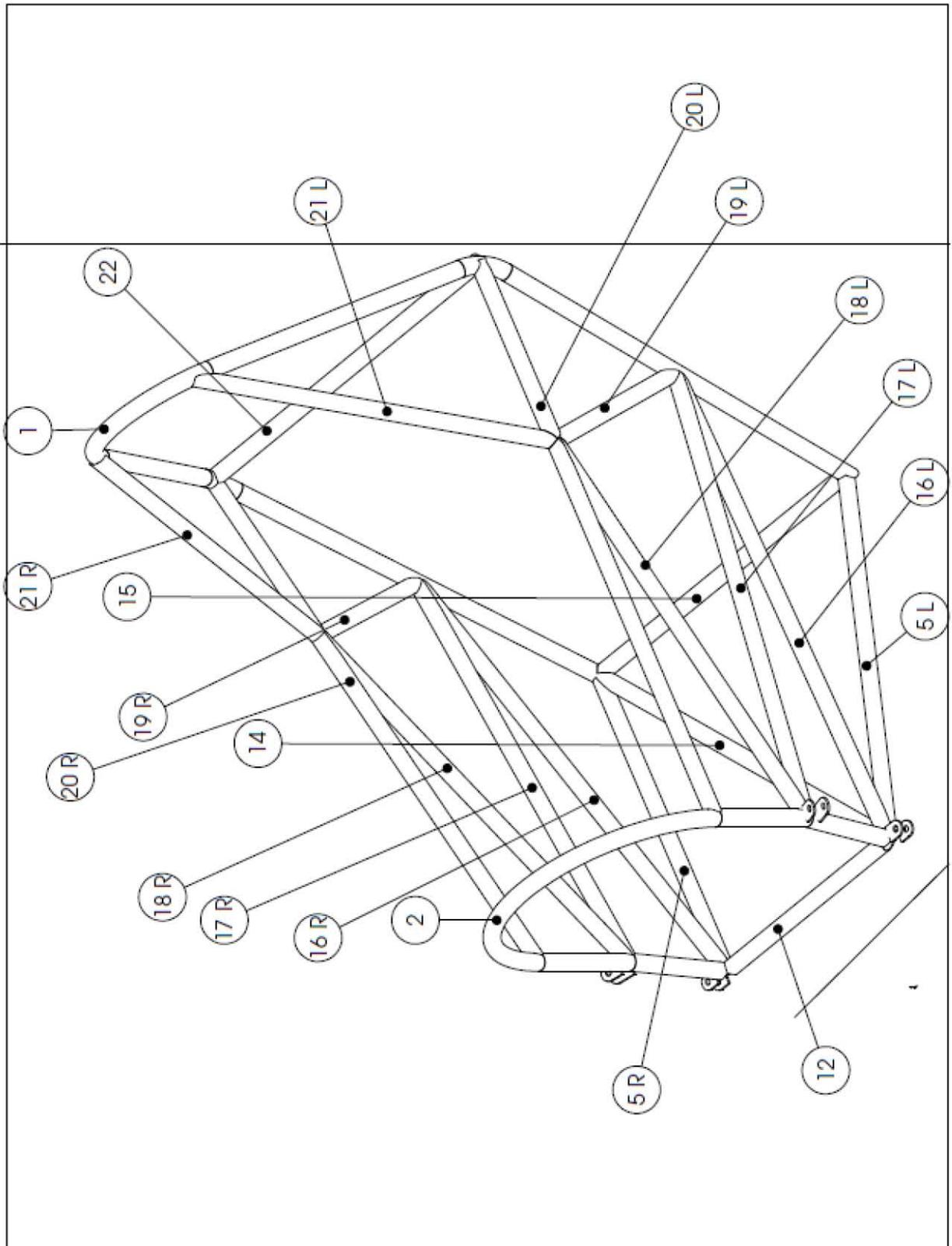


Fig. D-2.2 Tubos de la parte media del bastidor

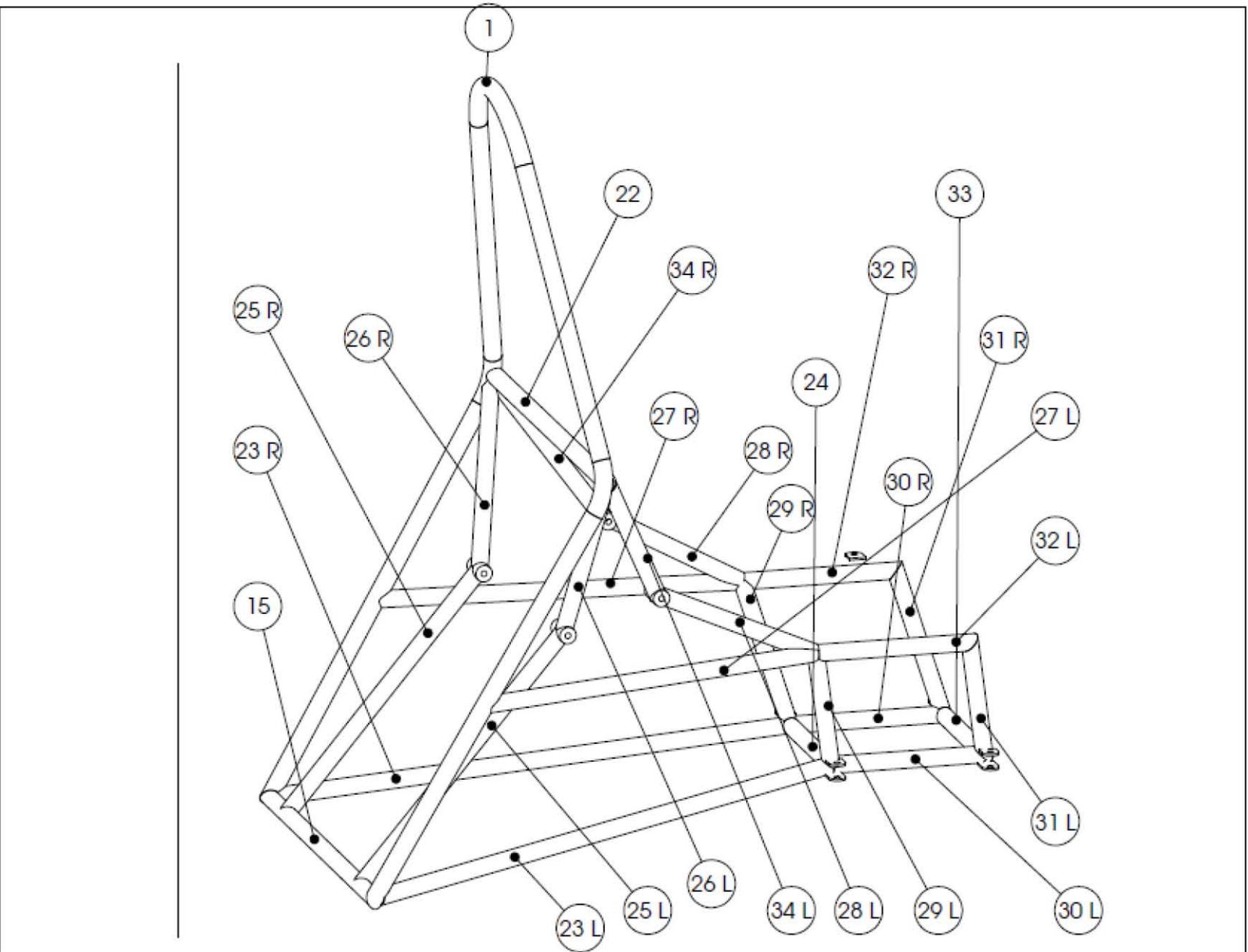


Fig. D-2.3 Tubos de la parte trasera del bastidor.

ANEXO D-3: PLANOS DE LOS ARCOS PRINCIPALES.

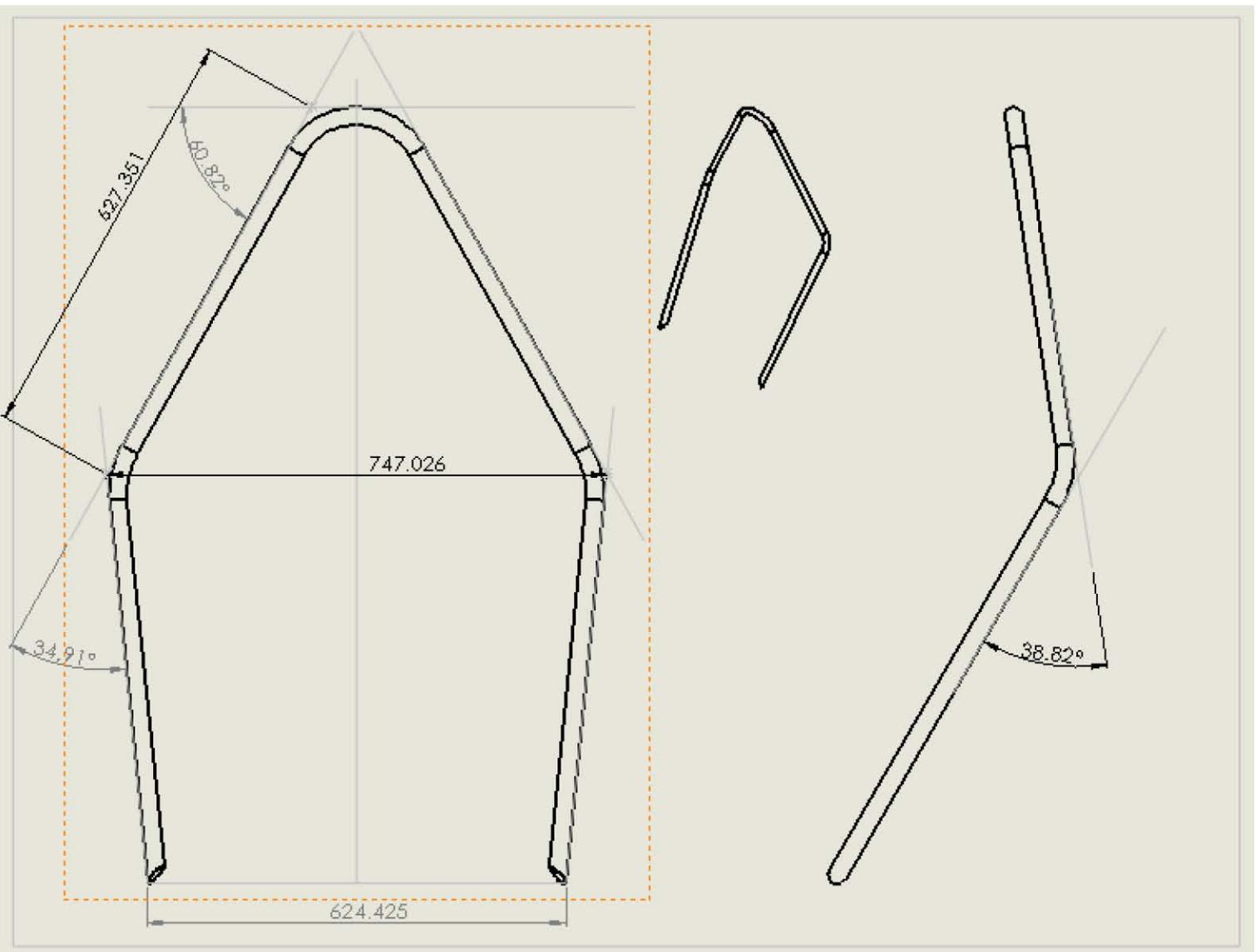


Fig. D-3.1 Plano del arco principal.

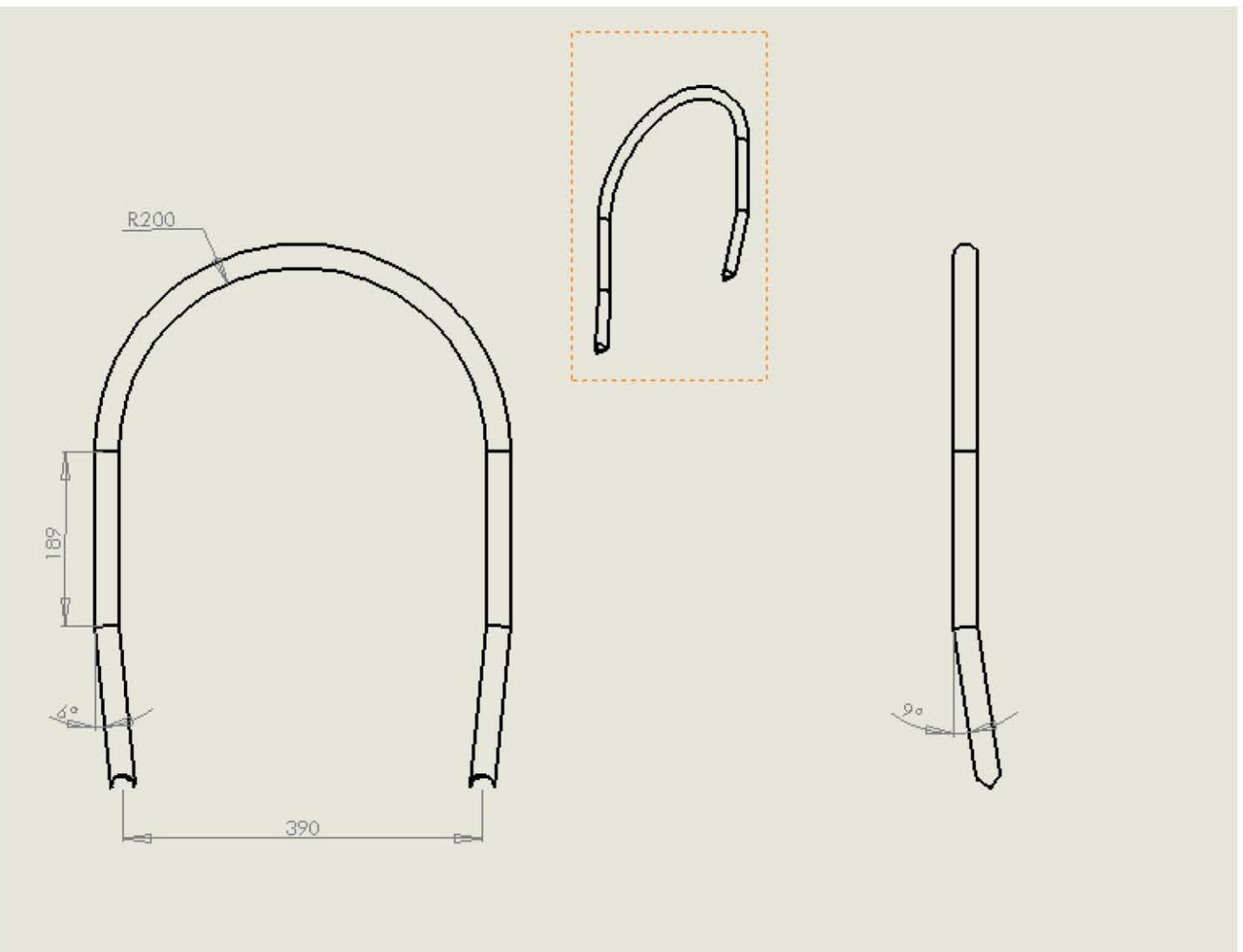


Fig. D-3.2 Plano del arco frontal.