

308917



**UNIVERSIDAD PANAMERICANA**

ESCUELA DE INGENIERIA

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

8  
23

**DISEÑO, SIMULACION Y CONSTRUCCION DE LA  
ESTRUCTURA TUBULAR DE UN VEHICULO  
PARA CAMPO TRAVIESA**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
AREA: **INGENIERIA MECANICA**

PRESENTA:

**FELIX ALFONSO CARRILLO HERNANDEZ**

DIRECTOR: DR. PIOTR RUSEK PIELA

MEXICO D. F. 1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**A mis padres, por ser los cimientos  
sólidos de mi preparación personal.  
Gracias por educar con el ejemplo y el  
esfuerzo constante.**

**A mis hermanas y abuelita, por su  
presencia y por toda la ayuda que me  
han brindado siempre.**

**Al ingeniero Ubaldo Márquez, por sus consejos y su guía en la elaboración de este trabajo.**

**Al ingeniero Álvaro Ayala R., por toda su asesoría en la simulación por computadora.**

**A mis compañeros de clase por tan buenos recuerdos, en especial a aquéllos con los que compartí este largo proyecto de dos años.**

**A los ingenieros Oscar y Javier Cervantes, Piotr Rusek, Sergio Martínez, Alfredo González y Pedro Creuheras, por su participación en este proyecto.**

## ÍNDICE

## ÍNDICE

### Introducción

<b>Capítulo I. Diseño</b>	<b>1</b>
A. Planteamiento y justificación del problema	3
B. Restricciones del reglamento	4
1. Roll Cage	4
a. Dimensionamiento	4
b. Material	6
c. Protecciones	7
2. Sujeciones del conductor	7
3. Cabina	7
4. Sistema de combustible	8
C. Errores de la estructura anterior	8
1. Diseño	8
2. Construcción	10
3. Consecuencias	11
D. Diseño	12
1. Presentaciones	13
a. Funciones de la estructura	13
b. Plan del proyecto	14
c. Criterios de selección del material	14
2. Reuniones periódicas	15
a. Dimensiones generales	16
b. Necesidades de la cabina	17
c. Suspensión	19
1) Suspensión delantera	19
2) Suspensión trasera	21
d. Jaula para volcaduras y dimensiones finales de la cabina	23
e. Transmisión	25
f. Dirección	27
g. Frenos	28
h. Asiento	28
3. Planos finales	30
<b>Capítulo II. Simulación</b>	<b>32</b>
A. Principios de Elemento Finito	34
B. Preparativos para la simulación	35

1. Equipo y programa	37
2. Malla	37
3. Nodos	38
4. Elementos	40
C. Simulación	46
1. Primer caso	46
2. Segundo caso	50
3. Tercer caso	54
D. Análisis de los resultados	57
E. Conclusiones	59
<b>Capítulo III. Construcción</b>	<b>61</b>
A. Fabricación del asiento	63
B. Doblada de tubos	64
1. Selección	64
2. Planos	65
C. Corte y esmerilado	68
1. Corte de los tubos	68
2. Esmerilado de los tubos	72
D. Soldadura de los tubos	73
E. Ensamblado de los sistemas	77
1. Suspensión	77
2. Transmisión	78
3. Frenos	78
4. Dirección	78
F. Pailería	79
G. Instalación de los dispositivos de seguridad	80
H. Pruebas, pintura y acabados	82
I. Errores y aciertos	83
1. Errores	83
2. Aciertos	85
J. Ficha técnica de la estructura	86
<b>Capítulo IV. Fabricación en serie</b>	<b>88</b>
A. Procesos para doblar tubos	90
B. Soldadura	92
C. Preparación de las uniones de los tubos	96
D. Lámina	97
1. Corte	97
2. Conformado	98

3. Unión a tubos	98
E. Análisis de costos	99

### **Conclusiones**

### **Anexos**

Anexo 1. Eventos de la competencia. Dispositivos de seguridad.	I
Anexo 2. Resultados de la competencia	V
Anexo 3. Centro de gravedad del vehículo	VII

### **Bibliografía**

## **INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

*"Todo aquello que un hombre imagine, otro lo puede realizar. Sueño lo que sueña, lo podrá hacer realidad"*

*Julio Verne*

La SAE (*Society of Automotive Engineering*) es una asociación creada en Estados Unidos a principios de siglo como solución a las necesidades de la industria automotriz en esos momentos. Los fabricantes de partes y accesorios querían promover sus negocios así como intercambiar ideas y estandarizar la ingeniería desarrollada; estos fueron los motivos que impulsaron la creación de la sociedad en 1905. Dicha sociedad tendría como primeras funciones (mantenidas hasta nuestros días):

- a) La investigación para obtener datos precisos a fin de alimentar el programa de estandarización.
- b) El intercambio de ideas e información sobre ingeniería automotriz.
- c) La iniciación de un programa para reglamentar los estándares de ingeniería.
- d) La publicación y divulgación de conocimientos e intercambio tecnológico y de programas de investigación.

SAE creció enormemente en el período intermedio de las dos Guerras Mundiales así como durante las mismas, tanto en desarrollos tecnológicos como en miembros. En 1964 se establece una sección autónoma en México.

En la actualidad, la programación de eventos y actividades bajo el patrocinio de SAE llega a niveles universitarios, incluyendo competencias de diseño en distintas áreas de la ingeniería, con el objetivo de servir como complemento a la preparación profesional de los estudiantes de estas carreras. Estas competencias son<sup>1</sup>:

- **SUNRAYCE:** Diseño y construcción de un vehículo solar para una carrera de 7 días.
- **SUPERMILEAGE:** El objetivo es diseñar y construir un vehículo que permita obtener el mayor kilometraje posible por galón de combustible. Existen dos competencias durante el año llamadas Midwest y West Coast.
- **AERO DESIGN:** Diseño y construcción de un avión a control remoto.
- **WALKING MACHINE DECATHLON:** Diseño y construcción de un robot capaz de librar un camino con obstáculos mediante ayuda externa y autónomamente.
- **FORMULA SAE:** Competencia para coches de carrera tipo fórmula. La competencia abarca desde la planeación del proyecto, recaudación de fondos, ingeniería del coche, construcción de un prototipo, pruebas y preparación para la competencia.
- **SAE MINI BAJA:** Competencia de tres días que abarca el diseño y la construcción de un vehículo para campo travesía (*off-road*). Se llevan a cabo 3 eventos durante el año: East Baja, Midwest Baja y West Baja.
- **HYBRID ELECTRIC VEHICLE CHALLENGE:** Diseño y construcción o adaptación de un vehículo convencional a uno HEV (*Hybrid Electric Vehicle*). Un HEV es un vehículo que usa una batería eléctrica como fuente primaria de poder y una unidad de poder auxiliar como respaldo, la cual puede usar etanol, M85 (una mezcla de metanol) o gasolina sin plomo.

---

<sup>1</sup>Organizadas durante 1993.

• **NATURAL GAS VEHICLE CHALLENGE:** Diseño y conversión de un vehículo convencional a uno que use gas natural tratando de obtener el mayor rendimiento de combustible y la menor emisión de contaminantes.

El presente trabajo se desarrolló para la competencia Mini Baja West 1994, por lo cual se hablará de ésta a continuación:

Mini Baja se originó en la Universidad de Carolina del Sur en 1976. Es una competencia de diseño para estudiantes de ingeniería no graduados, quienes deben funcionar como un equipo no sólo para diseñar, construir, probar y correr el vehículo dentro de las reglas, sino también para generar apoyo financiero para su proyecto y manejar sus prioridades educacionales. SAE Internacional patrocina actualmente tres competencias Mini Baja en los Estados Unidos al año<sup>2</sup>:

- Mini Baja East: Las pruebas son maniobrabilidad en tierra y agua, aceleración, frenado, arrastre de un trineo, carrera en un pantano de lodo, prueba de suspensión y una carrera de resistencia de 3 horas.

- Mini Baja Midwest: No incluye pruebas en agua, pero mantiene las pruebas de maniobrabilidad, aceleración, frenado, prueba de tracción, ascenso de colina y una carrera de resistencia de tres horas.

- Mini Baja West: Las pruebas de esta competencia son maniobrabilidad, frenado, aceleración, ascenso de colina y una carrera de resistencia de cuatro horas durante la cual se compite también contra los elementos de la naturaleza, ya que generalmente se realiza en sitios desérticos donde las temperaturas pueden alcanzar los 100°F (38 °C).

En todas ellas participan universidades de México, Canadá y Estados Unidos, siendo Mini Baja West en la que México ha tenido mejores resultados y la única en la que ha competido la Universidad Panamericana<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup>En 1994 también organizó una competencia en Brasil.

<sup>3</sup>Esta participación ha sido en los años 1990, 1993, 1994 y 1995.

La Mini Baja West de 1994 se llevó a cabo en la Universidad de Texas en El Paso (UTEP). Esta universidad ya ha sido sede en otras ocasiones, siendo la más reciente en 1993, y cuenta con el único terreno natural para "Baja" en Estados Unidos. El equipo de la U.P. que participó ese año estuvo formado por estudiantes que compitieron el año anterior en la misma pista, siendo ésta la única ocasión en que se ha podido aprovechar esa experiencia reflejándose en el mejor lugar obtenido por la Universidad hasta el momento.

Dentro del primer capítulo se tratarán los objetivos específicos de la competencia, el planteamiento del problema con sus límites y necesidades, y el proceso de diseño de la estructura. En el segundo capítulo se expone la simulación en computadora del diseño resultante con el objetivo de optimizarlo. El tema del tercer capítulo es el proceso de construcción del prototipo incluyendo los dispositivos de seguridad relacionados. A lo largo de estos capítulos no puede tratarse aisladamente la estructura sin mencionar los demás sistemas que conforman el vehículo, ya que su interacción debe considerarse siempre para asegurar su funcionalidad.

En el cuarto y último capítulo se mencionarán las modificaciones necesarias para hacer la producción de la estructura de manera industrial incluyendo un análisis de costos, tal como debe hacerse en cualquier proyecto real de ingeniería, recordando que es el objetivo principal de este tipo de competencias.

# **CAPÍTULO I**

## **DISEÑO**

## CAPÍTULO I. DISEÑO

El objetivo de la competencia Mini Baja es simular proyectos de diseño que existen en el mundo real de la ingeniería y sus retos asociados. Cada equipo compite para que su diseño sea aceptado por una firma ficticia que lo fabricará. El objetivo de cada equipo en la competencia es diseñar y construir el prototipo de un vehículo recreativo de 4 llantas y monoplaça, para ser vendido a los aficionados a conducir en campo traviesa. El vehículo debe cumplir con las siguientes condiciones: ser seguro, fácilmente transportable, de poco mantenimiento y fácil de manejar. Debe ser capaz de superar terrenos escarpados sin sufrir daños. En un volumen de producción de 4,000 unidades al año, el costo de manufactura del vehículo debe ser inferior a \$2,500 USDlls.

Cabe mencionar que la competencia no tiene únicamente un carácter recreativo, ya que los jueces son ingenieros y profesionales en su mayoría del sector automotriz, por lo cual podrían salir nuevas ideas y diseños a ser implantados industrialmente.

En este capítulo trataremos todos los pasos del proceso de diseño del vehículo, considerando que en cualquier diseño deben distinguirse las siguientes etapas<sup>1</sup> (no todas necesariamente):

- Reconocimiento de una necesidad

---

<sup>1</sup>Cfr. DIETER, George. Engineering Design. Reino Unido. Ed. McGraw-Hill, 1987, p. 32

- Definición del problema
- Recolección de información
- Conceptuación
- Evaluación
- Comunicación del diseño

Tocaremos los primeros cuatro puntos, dejando los restantes para los capítulos siguientes.

#### **A. Planteamiento y justificación del problema**

El esbozo general de la competencia arroja los primeros datos sobre los cuales enfocar el diseño del vehículo, ya que queda bien definido a que segmento del mercado estará dirigido (personas que gusten de manejar a campo traviesa como pasatiempo de fin de semana).

Desde el punto de vista del usuario, el vehículo debe ser ligero, de un tamaño práctico y cómodo, resistente debido al uso que se le va a dar, y de un precio accesible.

Desde la óptica del fabricante, el vehículo debe cumplir con ciertas restricciones mecánicas para asegurar su resistencia, debe estar hecho de un material fácilmente disponible en el mercado y con el que se puedan emplear procesos de manufactura convencionales, todo esto a un bajo precio.

Enfocándose a la estructura, son 3 los principales requerimientos a cumplir en el diseño:

- Especificaciones del reglamento de competencia
- Experiencia adquirida por los errores cometidos en la estructura anterior
- Necesidades de los sistemas del vehículo

Cada uno de estos puntos proporcionará sus respectivas limitaciones, pero es importante que sean consideradas siempre en conjunto. De acuerdo a estas directrices se establecieron los siguientes objetivos: obtener una estructura fácil de construir, que sirva como soporte para

todos los sistemas del automóvil minimizando su peso y cuidando siempre la seguridad del conductor de acuerdo al reglamento.

## **B. Restricciones del reglamento**

Casi en su totalidad las características físicas del vehículo especificadas en el reglamento constituyen los requerimientos mínimos de seguridad<sup>2</sup>, y todas deben ser estrictamente cumplidas pues de lo contrario se descalifica al vehículo de la competencia. A continuación se muestra un extracto de los puntos que afectan directamente a la estructura. El resto de los puntos de seguridad se trata en el anexo 1.

### **I. Roll Cage<sup>3</sup>**

#### **a. Dimensionamiento**

La finalidad de esta jaula es proteger al conductor de ser aplastado en el caso de una volcadura.

La jaula debe tener un mínimo de cuatro puntos sobre la cabeza del conductor, y debe estar unida a la estructura principal del vehículo por al menos la misma cantidad de puntos. Además, la jaula debe estar reforzada a lo largo y disponer de rigidez lateral; esto último se puede lograr mediante refuerzos paralelos y/o diagonales en el aro principal. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 1, tomada del reglamento de competencia.

Para mantener despejada el área cercana a la cabeza del conductor, la jaula debe tener una altura mínima de 41 pulgadas de la superficie del asiento a la parte inferior de los tubos superiores de la jaula. Para hacer la medición se usará una plantilla en forma de T que servirá también para proyectar esa altura mínima hacia el frente y hacia atrás. La proyección frontal

---

<sup>2</sup>La única restricción dimensional que no está en este grupo son el largo y el ancho del coche, de 96 y 60 pulgadas respectivamente (2.44 por 1.52 metros), incluyendo ambos las llantas

<sup>3</sup>Esto podría ser traducido como 'jaula para volcaduras', pero por sencillez será referida únicamente por 'jaula'

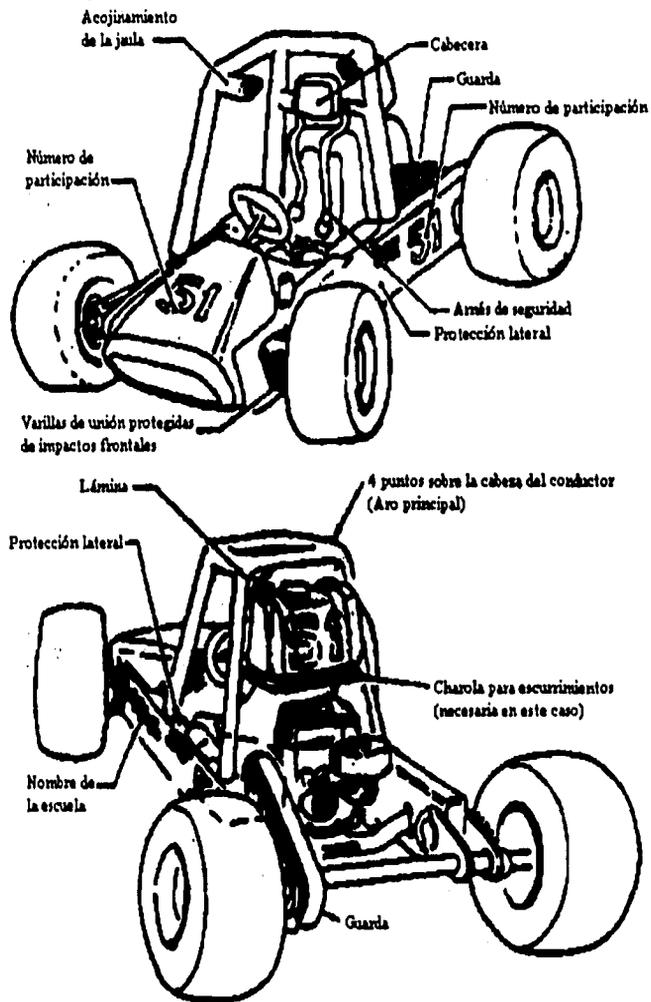


Fig. 1

debe ser mínimo de 12 pulgadas, mientras que la posterior debe pasar sobre la cabeza con casco del conductor. Esto se muestra en la figura 2, según aparece en el reglamento.

Debe haber al menos 3 pulgadas verticales de la parte superior del casco a la inferior de los

tubos superiores de la jaula.

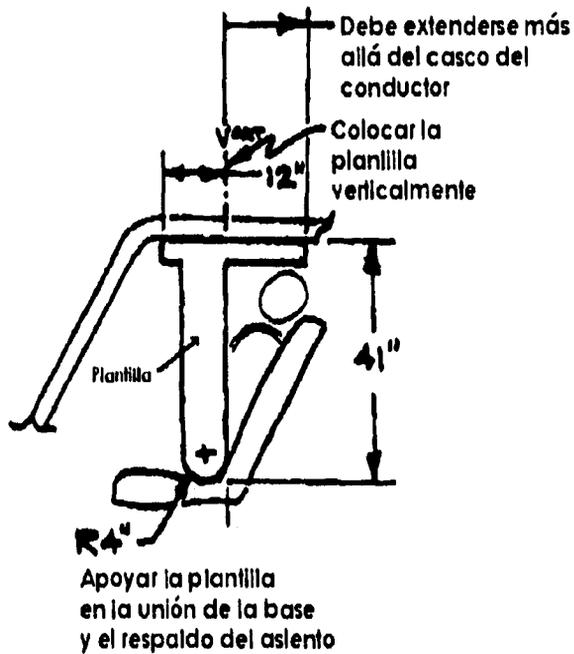


Fig. 2

#### b. Material

La jaula debe estar construida con tubos de acero con un contenido mínimo de carbono de 0.18%. Los tubos deben tener un diámetro exterior mínimo de 1 pulgada y un espesor de pared mínimo de 0.083 pulgadas.

Se pueden usar tubos de otros materiales y geometría siempre que tengan módulos de resistencia y flexión equivalentes a las especificaciones del párrafo anterior ( $EI$ , donde  $E$  es el módulo de elasticidad e  $I$  es el momento de inercia de área del eje más débil).

Todas las propiedades del material serán medidas suponiendo que el proceso de manufactura fue soldadura (*as welded*). Si la jaula es tratada térmicamente para aumentar su resistencia, debe entregarse la documentación del proceso y pruebas para que estas propiedades sean consideradas al juzgar el diseño.

### **c. Protecciones**

La jaula debe estar forrada de material resiliente en el área cercana a la cabeza del conductor. Otra protección para la cabeza es un apoyo a modo de cabecera, también de material resiliente, de mínimo 1 pulgada de espesor.

### **2. Sujeciones del conductor**

Es obligatorio el uso de un sistema de sujeción de 4 correas formado de un cinturón para el regazo y 2 cinturones que deben pasar sobre los hombros. Cada correa debe estar unida a la estructura, y no al asiento, por una tuerca propia.

Las zonas por donde pasen los cinturones deben estar redondeados para evitar desgastes.

En caso de volcadura, los brazos del conductor deben permanecer dentro de la jaula. Esto se puede lograr con sujeciones para los brazos (muñequeras, por ejemplo) o con redes laterales. Las sujeciones de los brazos deben estar instaladas de tal manera que el piloto pueda liberarse sin necesidad de ayuda externa.

### **3. Cabina**

La cabina debe estar diseñada para permitirle una salida fácil al conductor en caso de emergencia.

El diseño de la estructura debe incorporar protección contra impactos laterales en esta área, la cual debe consistir de una estructura continua a todo lo largo de la cabina, a una altura

mínima de 8 pulgadas, medida desde la parte más baja del asiento que esté en contacto con el conductor. Todos los bordes afilados y protuberancias deben eliminarse. El propósito de la estructura es proteger al conductor de una colisión.

Debe existir una separación entre la cabina y el motor o el compartimiento del tanque del combustible. Esta separación debe ser metálica, con al menos 0.02 pulgadas de espesor, y debe aislar por completo a la cabina del motor y el tanque. Además, la cabina debe tener a todo lo largo una lámina inferior para evitar que el conductor entre en contacto con el suelo mientras esté sentado. No se permite lámina plegada como material para este uso.

#### **4. Sistema de combustible**

Todo el sistema de combustible debe estar localizado dentro de los límites de la jaula para volcaduras con el fin de protegerlo contra impactos. Las monturas del tanque deben estar diseñados para evitar que se aflojen debido a las vibraciones.

El tanque debe estar diseñado para evitar que el combustible se derrame sobre el conductor, el motor, el encendido o el escape. No se permite ningún tanque en la cabina.

### **C. Errores de la estructura anterior**

El segundo gran grupo de condiciones a tener en cuenta en el diseño, es el aprendizaje obtenido con el primer vehículo. A continuación se expondrán dichas fallas divididas en aquellas ocurridas durante el diseño y las producidas durante la construcción.

#### **1. Diseño**

El diseño de la estructura del vehículo anterior, en sus juicios tuvo como único fundamento el reglamento de competencia. Esto provocó que tuviéramos como primeros bocetos una estructura basada rígidamente en el reglamento, pero de ninguna o poca utilidad para los demás

sistemas.

Fue un grave error el hecho de que éste fuera el primer sistema en diseñarse, ya que conforme iban surgiendo las necesidades del resto de sistemas, era absolutamente necesario hacer correcciones que prácticamente llevaron a un diseño final muy distinto al primero. Quedó comprobado que lo correcto es que exista una interacción entre todos los sistemas y la estructura teniendo siempre en cuenta las medidas de seguridad. Esto evitará muchos reprocesos con el consiguiente ahorro de tiempo; además, es más difícil hacer las modificaciones a un primer diseño que hacer un nuevo diseño con las restricciones consideradas desde el principio.

Un segundo error de este diseño fue no imaginar el paso del mundo bidimensional de los planos al real. Debido a que el diseño se hizo únicamente con dibujos en CADKEY, todos los tubos eran representados por sus ejes, y su unión era fácilmente lograda haciendo llegar los extremos de estos a un nodo común. Esto trajo como consecuencia que este diseño incluyera puntos en donde llegaban hasta 5 tubos que debían ir soldados todos entre sí, con los problemas técnicos y físicos que esto tiene, ya que los tubos que se usarían tenían 1 pulgada de diámetro externo.

Otro punto que trajo problemas fue que todo el dimensionamiento se hizo tomando siempre los máximos o mínimos que establecía el reglamento. Esto no hubiera traído consecuencias negativas si la construcción hubiera sido hecha con maquinaria o métodos precisos, pero en este caso no fue así.

También, el peculiar diseño de la transmisión que consistía en 2 poleas dispuestas verticalmente, permitía que el vehículo tuviera más espacio hacia el frente de la cabina ya que requería de poco espacio en la parte posterior, pero esto también provocaba que se tuviera un centro de gravedad alto y eso hubiera afectado el desempeño del vehículo durante la competencia.

Por último, un grave error fue no haber investigado la diversidad de tubos de acero existentes en el mercado, lo que provocó que la selección hecha no fuera la más acertada. También la lámina usada fue de un espesor mucho mayor al especificado en el reglamento, pero se usó por haber sido la más disponible en esos momentos.

## 2. Construcción

Los principales problemas se produjeron al hacer los dobleces en los tubos, ya que la máquina dobladora usada era totalmente 'hechiza'. No se contaba con los datos de doblado adecuados al diámetro del tubo, lo que provocaba que éste se colapsara; para evitarlo, se cubría al tubo con 2 mitades de uno de mayor diámetro externo en la parte donde se hacía el doblado, y aunque esto efectivamente evitaba los colapsos, el tubo presentaba un deslizamiento difícil de controlar provocado por la falta de contacto directo con el dado. Esto trajo como consecuencia el aumento en el radio de doblado, según se muestra en el siguiente dibujo:

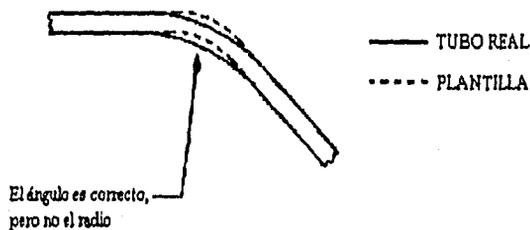


Fig. 3

Otro detalle no considerado durante la construcción fue la necesidad de tener planos fijos de referencia al momento de estar soldando la estructura para poder obtener siempre los ángulos correctos. Debido a esto hubo un momento en que fue necesario ensamblar paralelamente dos planos horizontales de aproximadamente 2 metros de longitud cada uno, lo que llevó mucho tiempo y fue hecho con poca precisión.

También tuvimos problemas por no haber considerado la distorsión producida por el calor generado con la soldadura de arco eléctrico, lo que tuvo sus peores efectos al ensamblar la suspensión.

### 3. Consecuencias

Fueron tres las principales consecuencias derivadas de todos estos errores. La primera estuvo relacionada con los errores en la construcción. Debido a que la jaula para volcadura fue diseñada con las dimensiones mínimas fijadas por el reglamento, los errores mencionados durante el doblado del tubo provocaron que la cabina quedara fuera de las especificaciones, como se ve en la figura 4.

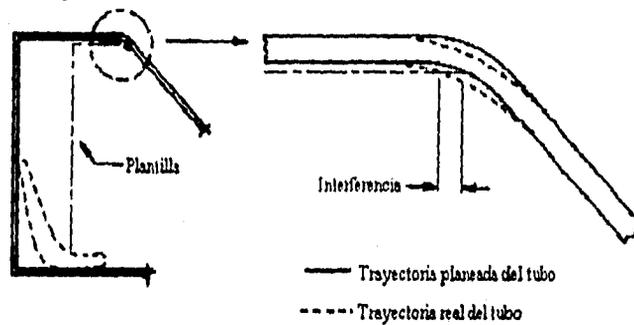


Fig. 4

El error fue detectado hasta que ya estaba soldada toda la estructura, y además con poco tiempo para ser corregido. Después de un análisis de las posibles soluciones, se decidió colocar el asiento al revés, con lo cual lográbamos retrasar el punto de medición de la plantilla lo suficiente como para quedar al límite. Esto se muestra en la figura 5.

La segunda consecuencia estuvo relacionada con la transportación del vehículo, ya que ésta se hizo en una camioneta pick-up cuya caja no cerraba debido a una pequeña interferencia. Esto se resolvía sacando un poco de aire de las llantas del vehículo, pero era necesario volver a inflarlas antes de competir, con la consecuente pérdida de tiempo.



- Reuniones periódicas: Para evitar problemas de comunicación, se estableció un calendario de reuniones con todos los integrantes del equipo para esta fase. Era importante conocer las decisiones tomadas en cada sistema para poder compaginarlas con el trabajo de los demás. Sirvieron como apoyo en esta etapa la construcción de un modelo a escala del vehículo así como dibujar por computadora el diseño de cada sistema para evitar interferencias y usar adecuadamente el espacio disponible.

El siguiente fue el proceso de diseño para la estructura, desde las decisiones iniciales hasta su dimensionamiento final, dividido en las etapas antes mencionadas.

### **1. Presentaciones**

El objetivo para el sistema de la estructura era dejar definidos los siguientes puntos:

- Funciones de la estructura
- Plan del proyecto

Después de haber establecido el plan, se agregó un nuevo objetivo que fue dejar terminada la primera parte de éste.

A continuación se tratará a detalle cada uno de esos objetivos.

#### **a. Funciones de la estructura**

Todo el trabajo que se hiciera sería desarrollado bajo la siguiente premisa: "La estructura debe servir como soporte para todos los sistemas del automóvil minimizando el peso y cuidando siempre la seguridad del conductor", como se dejó claro al inicio de este capítulo.

Con esto se buscaba evitar algunos de los errores cometidos en el vehículo anterior, como fueron el estar repitiendo diseños con el consecuente retraso en el inicio de la construcción, o haber hecho una selección incorrecta de los materiales.

### **b. Plan del proyecto**

Se definieron las siguientes fases:

- **Criterios de selección del material:** Agosto 1993
- **Diseño:** Agosto-Septiembre 1993
- **Simulación:** Octubre 1993
- **Correcciones al diseño:** Octubre 1993
- **Construcción:** Noviembre 1993-Enero 1994
- **Pruebas** Febrero-Marzo 1994
- **Acabados** Abril 1994

### **c. Criterios de selección del material**

La selección de los materiales con los cuales sería construido el vehículo, tenía que estar apoyada en un principio con los siguientes criterios, dejando la selección final hasta después de haber observado los resultados en la simulación:

- ⇒ **Innovación:** Es uno de los puntos juzgados en el diseño mecánico (pruebas estáticas).
- ⇒ **Peso:** Debe ser el menor posible sin descuidar las propiedades mecánicas del reglamento.
- ⇒ **Facilidad de manufactura:** Todo el proceso de producción debe poder hacerse en el taller de la Universidad o a bajos costos en talleres profesionales.
- ⇒ **Disponibilidad en el mercado:** Las formas comerciales del material seleccionado debían cumplir con los requerimientos del reglamento, esto se refiere en particular a la tubería.
- ⇒ **Costo:** Además de las limitaciones naturales debidas al presupuesto, un vehículo de producción barata es bien calificado en las pruebas estáticas.

El orden en que serían considerados estos criterios fue el siguiente: peso, disponibilidad en el mercado, costo, facilidad de manufactura e innovación.

Estos parámetros servían para acotar la gran cantidad de materiales que podrían ser considerados. Por ejemplo, si se buscaran materiales 'novedosos' y ligeros, se pensarían como primeras opciones en el duraluminio y el zincalco debido a sus buenas propiedades mecánicas; pero ambos tienen las siguientes desventajas:

- No son producidos comercialmente en forma de tubería.
- Tienen un costo elevado (de dos a cuatro veces el del acero)
- Son difíciles de soldar

Por lo pronto, y como primera prueba en la simulación, los materiales considerados son tubería con costura de acero mecánico (hecho con aceros del 0.10% al 0.20% de C), 3/4" diámetro nominal cédula 10, y lámina negra de calibre 26. Esta selección es siguiendo las especificaciones dimensionales del reglamento, y apoyado en la tabla 1.

## **2. Reuniones periódicas**

El objetivo de esta etapa para la estructura fue dejarla completamente dimensionada.

Todo el diseño estuvo hecho en CADKEY, sirviendo esto para obtener los planos finales de construcción así como aquéllos en los que se mostraban los elementos de seguridad y que eran pedidos por el reglamento. Otra ventaja de hacer el diseño de este modo fue que junto con los diseños de los demás sistemas hechos en la misma aplicación, se podían obtener vistas generales del vehículo para descubrir interferencias y corregirlas a tiempo, siendo esto mucho más fácil que hacer dichas correcciones hasta el momento de la construcción, como ocurrió en el vehículo anterior.

		CÉDULAS					
MEDIDA NOMINAL PULGADAS	DIÁMETRO EXTERIOR PULGADAS	5S	10S	40/40S	80/80S	160	XXS
1/8	0.405		0.049	0.068	0.095		
			0.280	0.360	0.470		
1/4	0.540		0.065	0.088	0.119		
			0.490	0.630	0.800		
3/8	0.675		0.065	0.091	0.126		
			0.630	0.840	1.100		
1/2	0.840	0.065	0.083	0.109	0.147	0.187	0.294
		0.800	1.000	1.270	1.620	1.940	2.550
3/4	1.050	0.065	0.083	0.113	0.154	0.218	0.308
		1.020	1.280	1.700	2.190	2.900	3.600
1	1.315	0.065	0.109	0.133	0.179	0.250	0.358
		1.300	2.090	2.500	3.200	4.200	5.400
1 1/4	1.660	0.065	0.109	0.140	0.191	0.250	0.382
		1.600	2.700	3.400	4.500	5.600	7.700
1 1/2	1.900	0.065	0.109	0.145	0.200	0.281	0.400
		1.900	3.100	4.000	5.400	7.200	9.500

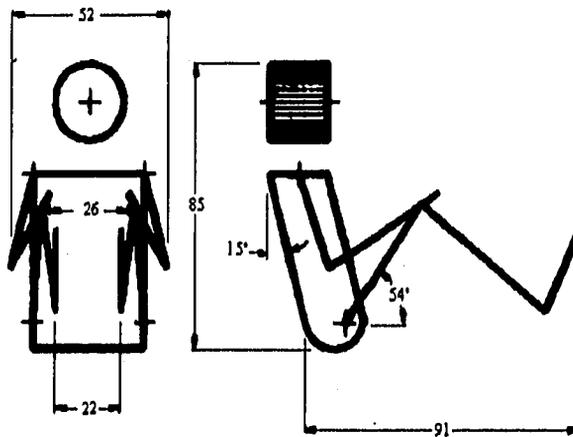
Tabla 1. Espesor de pared en pulgadas y pesos en kg. por metro de tubería (Aceros Fortuna)

#### a. Dimensiones generales

La decisión inicial fue determinar el largo y ancho total del vehículo considerando las restricciones del reglamento. Debido a las sinuosidades del camino donde se desarrolla la carrera final de resistencia, y con base en la experiencia de muchos diseños hechos por otras escuelas, no es conveniente diseñar con una longitud cercana al máximo de 2.44 metros porque el vehículo tendría en general un pobre desempeño. Los resultados han demostrado que los vehículos ganadores tienen una longitud no mayor de 2 metros. Esto y la experiencia del vehículo anterior fueron los factores que determinaron fijar un largo total de 1.90 metros.

Referente al ancho, fueron las necesidades mismas de la suspensión las que recomendaban tratar de usar el máximo permisible; sin embargo, decidió dejarse un margen de seguridad





NOTA: Cotas en cm.

Fig. 7

Esa postura fue probada con los miembros del equipo, inclusive considerando la inclinación que llevaría al frente la estructura según se verá en el siguiente tema.

De acuerdo a las dimensiones mostradas en la figura 7, la cabina tendría las siguientes características:

- Una longitud de 95 centímetros, la cual incluye el espacio necesitado por el piloto más un margen para el asiento. Esto limitaba la longitud de la que disponían los demás sistemas, especialmente la suspensión trasera y la transmisión, para no rebasar los 1.90 metros de longitud total del vehículo.
- Un ancho mínimo de 35 centímetros al frente necesario para que los pies no tuvieran ninguna interferencia al operar el freno y el acelerador. Esto fijaba el ancho del que disponía la suspensión delantera para no sobrepasar la cota establecida de 1.40 metros.
- Inclinación de 15° en el respaldo.
- Un ancho máximo de 75 centímetros en el respaldo a la altura de los codos (tomado de la estructura del vehículo anterior) suficiente para que los brazos vayan siempre protegidos por la cabina cuando se está conduciendo.

- Se dejaba limitada el área por donde pasarían el volante con su eje y el sistema de la dirección (por debajo de las pantorrillas del conductor)

### **c. Suspensión**

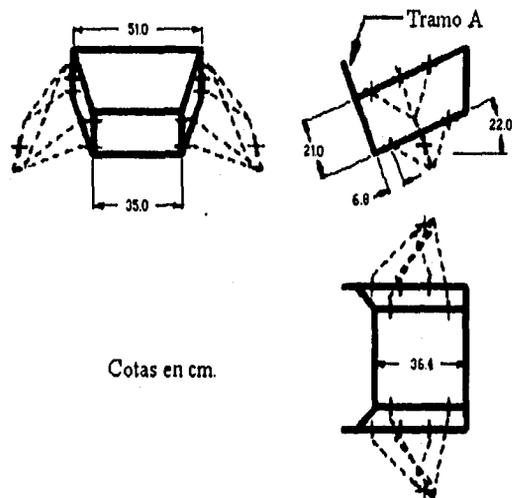
Este sistema fue el que tuvo mayor influencia durante todo el diseño de la estructura. Debido a que los requerimientos de la suspensión delantera fueron muy distintos a los de la trasera se tratarán por separado, pero indicando en cada caso las restricciones resultantes.

#### **1) Suspensión delantera**

El diseño de este sistema implicaba lo siguiente:

- Mantener una inclinación de  $22^\circ$  respecto a la horizontal hacia el frente del vehículo.
- Cada uno de los brazos de esta suspensión se uniría a la estructura por 4 soportes, dos superiores y dos inferiores, que deberían estar separados entre sí por 25 centímetros de eje a eje.
- A la mitad de la distancia entre los 2 soportes superiores debería colocarse otro donde se apoyaría el amortiguador.
- Los soportes del brazo superior deben coincidir con los del inferior en planos perpendiculares a los  $22^\circ$  de inclinación.
- La distancia entre los niveles superior e inferior de los soportes sería de 21 centímetros.
- La diferencia de longitud de los brazos superior e inferior requería que el tubo donde se apoyara el brazo superior estuviera 8 centímetros más alejado del plano longitudinal del vehículo que el tubo para el brazo inferior.
- Todos los soportes para los brazos deben estar a una distancia no menor a 2 centímetros de cualquier lugar donde exista soldadura para evitar el reblandecimiento del material por sobrecalentamiento.

La única restricción que recibió esta suspensión fue el espacio mínimo requerido para la parte delantera de la cabina, necesario para usar el acelerador y el freno sin dificultades. Con esta limitación, y conociendo el ancho total del vehículo y el ancho de las llantas, se fijaron las longitudes de los brazos quedando finalmente el siguiente diseño:



Cotas en cm.

Fig. 8

Cabe hacer dos observaciones sobre este dibujo. Primero, el tramo A es perpendicular a los tubos donde se apoya la suspensión para que la inclinación de  $22^\circ$  fuera lo más corta posible y el frente del vehículo no estuviera muy elevado, ya que esto resultaría en una posición más incómoda para el piloto.

Segundo, la cota de 6.8 centímetros que se muestra entre el tramo A y el soporte de la suspensión abarca los 2 cm. de distancia que debe haber entre cualquier soldadura, 3.5 cm. que hay entre el inicio del soporte y su eje medio, y media pulgada correspondiente al radio del tubo del tramo A, porque las líneas de la estructura representan los ejes de los tubos.

## 2) Suspensión trasera

La interacción entre el diseño de la parte trasera de la estructura y el de esta suspensión fue más dinámica.

Debido a la experiencia del primer año de asistencia a esta competencia, en la que se observó como un vehículo se partía en dos al fallar las soldaduras que unían a la cabina con la parte trasera del vehículo, se decidió que era conveniente mantener al menos un tramo continuo de tubería que uniera estas dos partes de la estructura.

El tramo que fue seleccionado con dicha finalidad fue aquél que serviría como protección contra impactos laterales en la cabina. Como se mencionó anteriormente en las restricciones del reglamento, este refuerzo debía tener una altura mínima. Dicha altura se mantendría a todo lo largo del vehículo con el objetivo de que al construirse, todos los tubos fueran doblados en un solo plano para facilitar la manufactura; por lo tanto, esta era una restricción que recibía el diseño de la suspensión trasera porque de ese tubo saldrían los apoyos para los amortiguadores.

Otra condición que tuvo esta suspensión por parte de la estructura fue el espacio longitudinal con el que contaba, el cual era obtenido como la diferencia entre el largo total y lo asignado a la cabina.

En la figura 9 se muestra el diseño final de la suspensión, mostrando las cotas que afectaron a la estructura. Nuevamente, los apoyos debían ir soldados al menos a 2 centímetros de cualquier otro cordón de soldadura.

De acuerdo al ancho total fijado para el vehículo y conociendo la distancia que habría de los apoyos del brazo hacia la llanta, el tubo sobre el cual estaría apoyado el brazo debía estar paralelo al plano longitudinal del vehículo a una distancia de 16 centímetros.

Por otra parte, la posición de dicho tubo estaba determinada por la distancia entre los apoyos y el ángulo del eje que los une; sin embargo, este tubo no podría seguir la

misma trayectoria que el eje porque interferiría con la flecha de salida de la transmisión a la llanta.

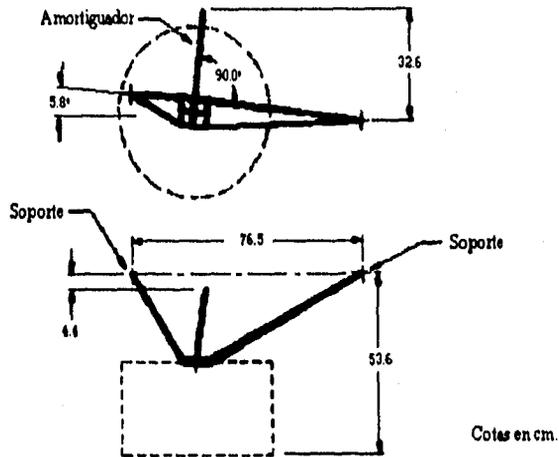


Fig. 9

De acuerdo a especificaciones de la suspensión, el eje del tubo debía pasar al menos 6 centímetros por debajo de la flecha para evitar cualquier interferencia, por lo que el diseño quedó de la siguiente manera:

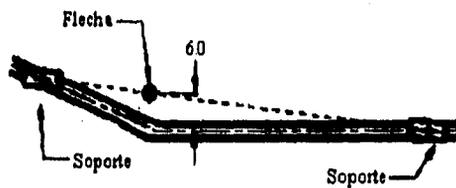


Fig. 10

Otros requerimientos del diseño de la suspensión trasera eran los referentes al amortiguador. Se pueden ver en la figura 9 los planos vertical y horizontal donde estaría el soporte del amortiguador, definiendo la altura y los dobleces del tubo que vendría de la cabina. Además,

este soporte debía apoyarse en un tubo que mantuviera, en un plano paralelo al longitudinal del vehículo, la misma inclinación que muestra el amortiguador en la parte superior de la figura 9.

El diseño final de la parte trasera de la estructura fue el siguiente:

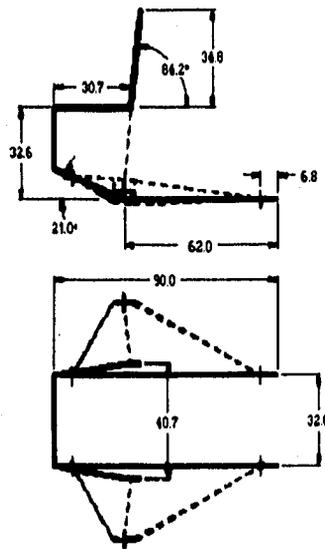


Fig. 11

#### d. Jaula para volcaduras y dimensiones finales de la cabina

Esta parte del diseño estaba supeditada a la de la suspensión por dos motivos:

- La suspensión trasera fijó la altura a la que pasaría el refuerzo lateral de la cabina.
- La suspensión delantera definió la parte frontal de la estructura donde estarían dos de los apoyos de la jaula para volcaduras.

En la figura 12 se muestra la vista lateral del vehículo junto con la plantilla especificada en el reglamento para el diseño de la jaula. Debido a que la plantilla debía ser colocada sobre la superficie del asiento, era necesario definir su espesor dejando el resto de las dimensiones para

un subtema posterior. El espesor fijado fue de 3 centímetros. Obsérvese que la inclinación del respaldo corresponde a la indicada en la figura 7.

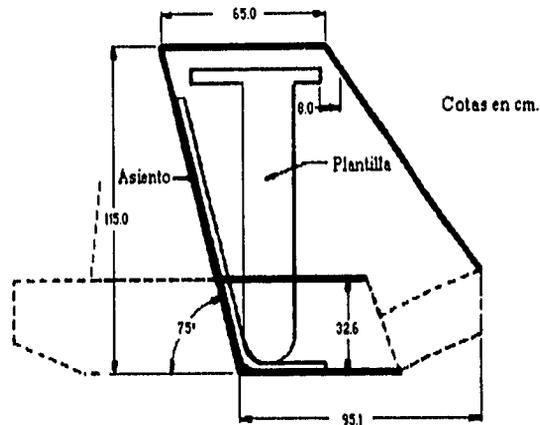


Fig. 12

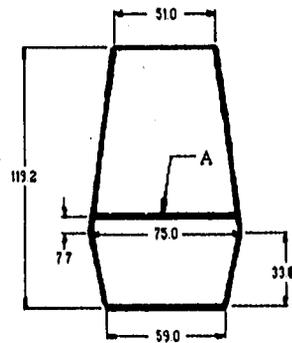
El margen de 8 centímetros entre la plantilla y el frente de la jaula se dejó considerando el radio del tubo y su forro de material resiliente, así como para absorber los posibles errores que se produjeran en la construcción de la jaula o en la del asiento.

La figura 13 muestra el respaldo de la cabina. El elemento señalado con la letra A tenía tres funciones:

- Refuerzo
- Soporte para unir el asiento a la estructura
- Soporte para la parte superior del cinturón de seguridad

Su posición estuvo determinada por este último objetivo, ya que según el reglamento esos apoyos no debían estar por arriba de los hombros del piloto.

Los anteriores son los elementos mínimos necesarios de acuerdo al reglamento; cualquier otro elemento que fuese requerido como refuerzo se obtendría de la simulación, la cual se presentará en el próximo capítulo.



Cotas en cm.

Fig. 13

### e. Transmisión

Las limitaciones entre la estructura y este sistema fueron mucho menores que en el caso de la suspensión. La única decisión que involucraba ambos sistemas fue la ubicación del motor.

Dos objetivos que se tuvieron presentes durante todo el diseño fueron:

- Mantener un centro de gravedad lo más bajo posible
- Tener un ensamblado modular, es decir, que el montaje de cada uno de los sistemas fuera prácticamente independiente de los demás.

Estas dos ideas eran principalmente aplicables a la transmisión para evitar los errores mencionados al principio del capítulo.

El motor iría instalado en lo más bajo de la parte trasera de la estructura, e inmediatamente atrás de la cabina. Como ya se tenían en CADKEY los dibujos de todo lo diseñado de la estructura hasta ese momento, se dibujó también un modelo con las dimensiones generales del motor para representarlo y fijar las posiciones de sus soportes. El resultado final se muestra en el siguiente dibujo.

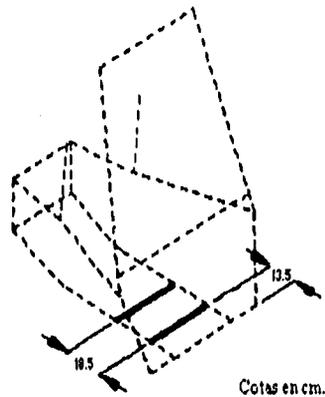


Fig. 14

Para cumplir con lo referente al diseño modular era necesario dejar el espacio suficiente para montar y desmontar el motor sin afectar a los demás sistemas, pero cuidando siempre aprovechar al máximo ese espacio.

Algunos resultados del aprovechamiento del espacio fueron ideas como tener toda la transmisión dentro de una sola caja donde iría incluido el disco de los frenos, o el hecho de que la dirección pasara por debajo de las piernas del piloto.

El motivo para dejar en tal grado de independencia al motor fue la naturaleza misma de la competencia. Durante el primer día en el que se llevan a cabo las pruebas estáticas, el motor es ajustado por los jueces a 3800 R.P.M. con la flecha del motor sin carga, por lo que es necesario desconectarlo de la transmisión. También era importante tener esa libertad para corregir rápidamente las fallas que tuviera el motor durante la competencia. En la figura 15 se muestra el espacio dejado para acceder al motor.

Por último, sería necesario instalar un tubo del cual se apoyaría la caja de la transmisión, pero sólo podía determinarse su posición después de construirse ya que nunca se hicieron los planos de esa caja.

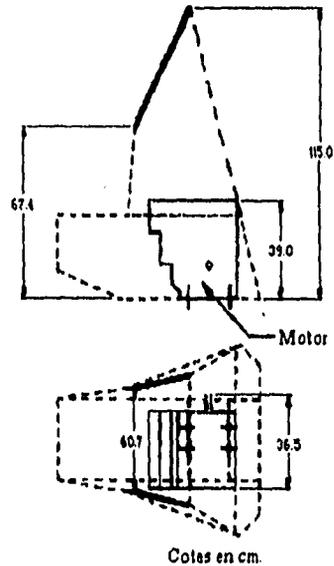


Fig. 15

### f. Dirección

Su colocación fue determinada por la suspensión, al igual que toda la parte delantera del vehículo, por lo que no fue necesaria ninguna coordinación extra entre la dirección y la estructura. Sus apoyos serían soleras unidas a la estructura, pero nuevamente se esperaría hasta el momento de la construcción para fijarlos porque nunca se insertaron los dibujos de este diseño en los planos generales del vehículo.

El sistema usado fue un mecanismo piñón-cremallera de un vehículo comercial al que se le hicieron ciertas modificaciones. Lo único que fue posible establecer en los dibujos del diseño fue la posición aproximada de este mecanismo, el cual se encontraba encerrado en una carcasa; ésta se muestra en la figura 16.

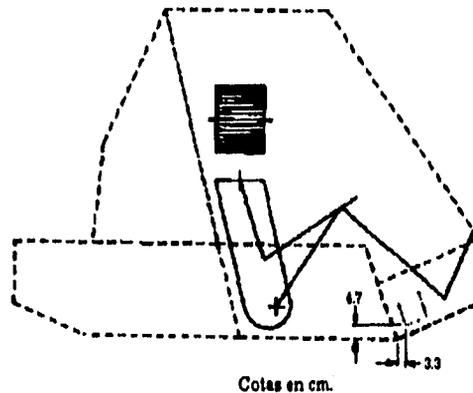


Fig. 16

#### g. Frenos

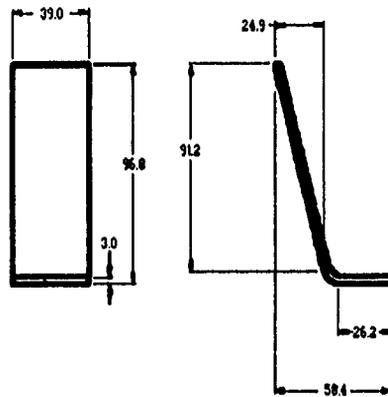
El único soporte que necesitaba de la estructura estaría soldado al tubo donde se apoyaba el brazo derecho de la suspensión trasera, pero éste también se fijó hasta la construcción. El resto del sistema iría dentro de la caja de la transmisión, por lo cual no presentaba mayores consideraciones.

#### h. Asiento

Su diseño estuvo sujeto al espacio disponible en la cabina y a las restricciones del reglamento.

En el respaldo se incorporó la cabecera especificada en el reglamento, así que se mantuvo una estructura continua a todo lo largo, cubierto todo de material resiliente de 1 pulgada de ancho.

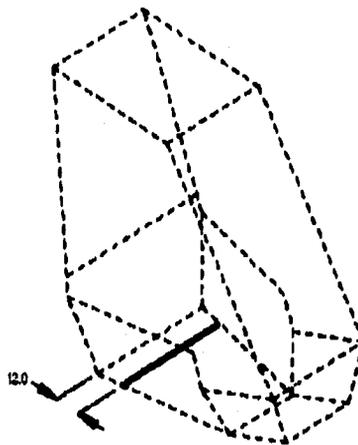
Se decidió dejar un solo ancho en todo el asiento para facilitar su construcción. La dimensión fijada fue la mínima necesaria para que el respaldo sirviera también de apoyo a los hombros del piloto. La longitud de la base estuvo determinada por el espacio en la cabina.



Cotes en cm.

Fig. 17. Asiento

El soporte para la base estaría dado por una solera que se muestra en la figura 18. Esa solera sería también apoyo para la parte inferior del cinturón de seguridad, y fue este objetivo el que determinó su posición, según se muestra en el siguiente dibujo:



Cotes en cm.

Fig. 18

### 3. Planos finales

El último elemento por definir aparece en la figura 19; serviría principalmente como refuerzo en la cabina, pero también estaría como apoyo para colocar los espejos laterales. Su posición se obtuvo experimentalmente considerando esta última función, pero estaría sujeta a los resultados arrojados por la simulación.

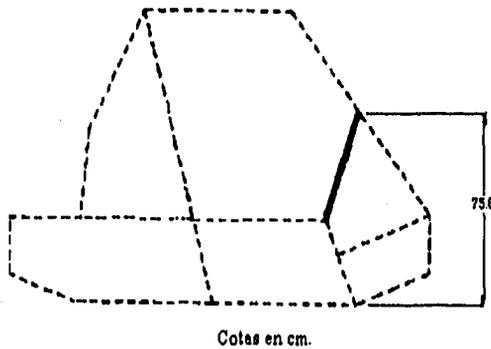
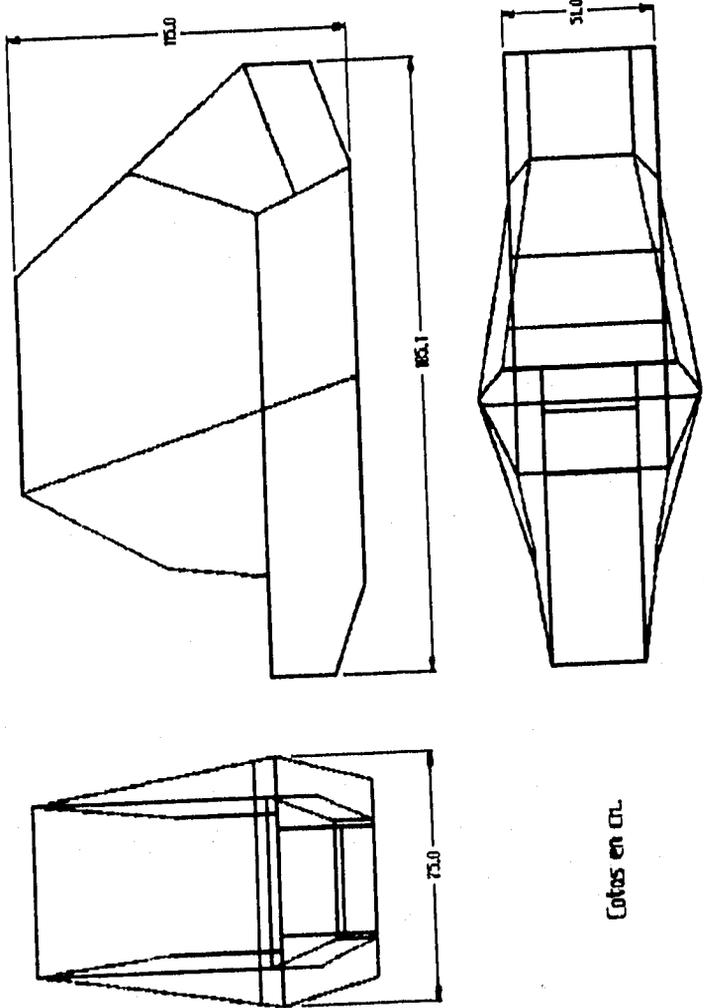


Fig. 19

Los siguientes son los planos finales de la estructura. El primer diseño listo para una simulación por computadora estuvo listo a finales de octubre de 1993, es decir, a tiempo de acuerdo al plan original; sin embargo, esta simulación no se terminó del todo, además de que todavía se hicieron cambios en la estructura hasta finales de diciembre del mismo año. Únicamente se muestran cotas generales, ya que las demás se fueron especificando durante el desarrollo del capítulo. Cabe mencionar que con las cotas mostradas, este vehículo podría ser fácilmente transportado en una camioneta pick-up de caja estándar.

**NOTA:** las líneas representan los ejes de los tubos.



Cotas en cm.

## **CAPÍTULO II SIMULACIÓN**

## **CAPÍTULO II. SIMULACIÓN**

Dentro del proceso de diseño, es necesario someter los resultados obtenidos a las condiciones de trabajo a los que estarán sujetos para comprobar su correcto desempeño o para corregir errores. Existen dos alternativas para hacer esas pruebas: construir un prototipo o hacer alguna simulación, entre las cuales entra la simulación por computadora.

La simulación por computadora es una herramienta importante en la investigación científica; tiene aplicaciones en campos tan variados como son la medicina, la energía nuclear, el diseño de máquinas, la investigación de operaciones, la agricultura y problemas urbanos y económicos.

Su uso cada vez mayor ha sido provocado principalmente por dos factores:

- El desarrollo de computadoras y programas cada vez más potentes y con un mayor enfoque al usuario.
- Las ventajas económicas que implica, ya que se evitan gastos de construcción de prototipos, laboratorios costosos y la reducción en los tiempos de desarrollo de un experimento.

El método de simulación usado en este capítulo se llama Método de Elemento Finito, del cual se dará una breve explicación. Posteriormente se tratarán las características particulares de esta simulación y sus resultados, terminando con las conclusiones obtenidas de dichas pruebas.

En el caso particular de este proyecto, los resultados de la simulación se obtuvieron después de la construcción del prototipo; no obstante, cada etapa se presenta en la secuencia que debió haber seguido.

#### **A. Principios de Elemento Finito**

El Método de Elemento Finito (F.E.M. por sus siglas en inglés) puede ser usado para calcular las características estáticas, dinámicas, térmicas y acústicas de un sistema. Está basado en una teoría mediante la cual cualquier cuerpo puede ser visto como un ensamble de bloques discretos de construcción. La división del cuerpo se hará en un número óptimo de bloques (elementos) que se usarán como base para los cálculos, quedando su cantidad determinada por dos factores: la capacidad de la computadora usada en los cálculos y la precisión deseada en los resultados, siendo ambas directamente proporcionales al número de elementos usados. Estos bloques se consideran separados entre sí y unidos únicamente en puntos específicos llamados nodos, formando así una red. Cada elemento conecta los grados de libertad de sus nodos relacionados, estableciendo cómo interactúan y cómo responden a acciones aplicadas; esto permite que un modelo pueda ser construido de tal manera que tenga la suficiente correspondencia con el cuerpo real en términos de sus características elásticas.

Se puede observar que el nombre del método sintetiza su concepto básico: la transformación de un sistema de ingeniería con un número infinito de variables desconocidas (la respuesta en cualquier lugar de un sistema) a uno que tiene un número finito de variables desconocidas relacionadas entre sí por medio de elementos de tamaño finito, convirtiéndose de esta manera en un sistema algebraico de ecuaciones.

La parte pesada de la solución por elemento finito es la preparación de la información de entrada. La topología de la malla de elementos debe ser descrita en el programa numerando los nodos y especificando sus coordenadas, identificando los elementos y relacionando sus nodos

asociados. La tabulación de toda esta información puede resultar muy tediosa además de ser una tarea muy propensa a errores, sobre todo en estructuras que tengan cientos de nodos. Afortunadamente la tecnología actual ayuda a eliminar estos problemas creando preprocesadores que forman la malla a partir del dibujo de una estructura, y la entrada de las coordenadas de los nodos y la conectividad de elementos se hace automáticamente.

Los resultados de los análisis son dados en forma de deformaciones, modos y distribuciones de esfuerzos, tanto en valores individuales como en gráficas, siendo esta última una presentación más práctica ya que permite hacer una evaluación rápida de los resultados.

Las ventajas de este método son que permite calcular procesos de cargas complejas (líneas de fuerza, puntos de concentración de esfuerzos) en estructuras complejas. También permite calcular variaciones de materiales (espesores de placas metálicas, materiales de refuerzo), incluyendo materiales anisotrópicos (materiales compuestos)

Dentro de sus límites está la precisión, la cual depende de los tipos de elementos, su cantidad y distribución dentro de la estructura. Otra limitación es la diferencia entre la estructura modelada y la real, ya que puede ocurrir que el espesor real de placas metálicas varíe de los valores nominales debido a procesos de estirados profundos, que algunos materiales presenten anisotropía después de un proceso de conformado, o que las juntas soldadas no sean hechas con precisión.

### **B. Preparativos para la simulación**

El objetivo de la simulación de la estructura es analizar su comportamiento mecánico ante diversas situaciones críticas que pueden presentarse en la competencia y producir fallas.

Hay dos puntos a tomar en cuenta para el desarrollo de esta simulación:

- La estructura debe simularse junto con la suspensión, ya que una de las funciones de este sistema es reducir los esfuerzos transmitidos al ocupante y los componentes del

vehículo. Una suspensión inadecuada producirá la destrucción del vehículo, por más rígido que éste sea.

- Se usarán las mismas condiciones de frontera que fueron especificadas para el diseño de la suspensión. Estas condiciones son las fuerzas ejercidas sobre la suspensión al chocar contra algún objeto de forma circular y la suposición de que el coche no se levanta del suelo durante el choque con ese objeto.

Se simularán tres casos, todos ellos considerando una velocidad del vehículo de 35 km/h:

- 1.- Choque contra un obstáculo de 20 centímetros de radio<sup>1</sup> suponiendo que únicamente un lado de la suspensión delantera cargará con todo el peso.
- 2.- Repetir el caso anterior suponiendo que el choque se da de manera simultánea en el mismo lado de la suspensión delantera y trasera.
- 3.- Un lado de la suspensión delantera cae en un bache mientras el resto del vehículo permanece en un mismo nivel.

Para calcular las fuerzas involucradas en estos casos se usó todo el procedimiento seguido en el diseño de la suspensión, el cual se basó en la segunda ley de Newton de la cual se desprende el principio de impulso y cantidad de movimiento, y considerando las siguientes suposiciones: la rueda posee una geometría plenamente circular, incluso al impactarse con una irregularidad del camino; las irregularidades del camino también poseen forma plenamente circular y no son deformables; la energía cinética se conserva; no existen fuerzas a lo largo del plano transversal del vehículo.

Otro caso que en un principio también se consideró para simular fue aquél en el que el vehículo se volteara y quedara apoyado únicamente en la jaula para volcaduras, pero se descartó por ser poco probable debido al centro de gravedad del vehículo (ver anexo 3).

Los resultados que se analizarán para cada caso son:

---

<sup>1</sup>El diseño de la suspensión estuvo hecho considerando ese tamaño de obstáculo como el más grande que puede presentarse en la carrera de resistencia.

1.- Identificación de los elementos sometidos a los esfuerzos de tracción, compresión y cortantes, de mayor y menor magnitud.

2.- Localización de aquellos puntos que tengan los mayores desplazamientos locales.

Con esto se pretende aprovechar la herramienta de elemento finito para anticipar cualquier falla en el diseño y hacer sus correcciones todavía en planos.

A continuación se presentarán las características del equipo y el programa con los que se hizo la simulación, además de toda la información necesaria de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo anterior: creación de la malla, identificación y ubicación de los nodos, identificación de los elementos y sus nodos asociados, y descripción de los tipos de elementos.

### **1. Equipo y programa**

La simulación se realizó en una estación HP Apollo 9000 serie 400 (procesador 68040 a 25 MHz, 400 MB en HD y 32 MB en RAM), perteneciente a los laboratorios de Diseño Asistido por Computadora de ingeniería mecánica en la U.N.A.M. El programa usado fue el NISA versión 92.0, desarrollado por Engineering Mechanics Research Corporation en E.U.A.

### **2. Malla**

Una de las ventajas del programa utilizado es que permite hacer toda la preparación de la malla a partir de un dibujo en AUTOCAD, eliminando el paso de tener que capturar toda la información con los posibles errores que esto puede acarrear. Como el diseño estaba hecho en dibujos de CADKEY, únicamente fue necesario hacer una transformación de su formato para que pudiera ser leído por el programa.

### 3. Nodos

Los extremos de los elementos que forman la malla son los nodos. A continuación se muestra una lista de los 116 nodos usados para la elaboración del sistema, con sus coordenadas en metros y el número de identificación que usó el programa para cada uno de ellos.

NÚM.	X	Y	Z	NÚM.	X	Y	Z
1	-1.0597	-0.3643	0.2706	2	-1.2645	-0.2550	1.0206
4	-1.5086	-0.2035	0.5449	6	-1.5441	-0.2035	0.1967
7	-1.0397	-0.3750	0.1967	11	-0.6145	-0.2550	1.0206
14	-0.3110	-0.2550	0.6285	15	-0.4520	-0.2550	0.1967
19	-0.3989	-0.2550	0.0653	21	-0.3361	-0.2550	0.0907
23	-0.2202	-0.2550	0.1375	25	-0.1044	-0.2550	0.1843
27	0.0000	-0.2550	0.2265	30	-0.1015	-0.2943	0.1774
33	0.0000	-0.1750	0.0000	37	-0.0257	-0.1750	-0.0104
40	-0.2575	-0.1750	-0.1040	41	-0.3202	-0.1750	-0.1294
45	-0.9507	-0.2950	-0.1294	48	-0.8307	-0.2722	-0.1294
51	-1.8507	-0.1600	0.1967	52	-1.8507	-0.1600	-0.0219
56	-1.7835	-0.1600	-0.0477	58	-1.5713	-0.1600	-0.1294
60	-1.2711	-0.1600	-0.1294	61	-1.0861	-0.1600	-0.1294
63	-1.0181	-0.1600	-0.1294	65	-0.9507	-0.1600	-0.1294
68	-1.8507	0.0000	0.1967	70	-1.8507	0.0000	-0.0219
72	-1.0597	0.0000	0.2706	73	-1.2711	-0.0800	-0.1294
75	-1.2711	0.0000	-0.1294	78	-1.0861	-0.0800	-0.1294
80	-1.0861	0.0000	-0.1294	84	-0.9507	0.0000	-0.1294
86	-0.8307	0.0000	-0.1294	88	-1.2645	0.0000	1.0206
90	-0.6145	0.0000	1.0206	92	0.0000	0.0000	0.2265
94	-0.3202	0.0000	-0.1294	95	-0.8307	-0.1361	-0.1294
100	-1.6111	-0.4261	-0.0557	101	-1.6154	-0.4213	-0.0963
102	-1.6197	-0.4166	-0.1368	103	-1.5703	-0.4261	-0.0601
104	-1.5746	-0.4213	-0.1006	105	-1.5789	-0.4166	-0.1411
106	-1.5295	-0.4261	-0.0644	107	-1.5338	-0.4213	-0.1050
108	-1.5381	-0.4166	-0.1455	109	-1.5746	-0.5463	-0.1006
146	-0.3333	-0.2943	0.0837	147	-0.1610	-0.4477	-0.0091

NUM.	X	Y	Z	NUM.	X	Y	Z
146	-0.3333	-0.2943	0.0837	147	-0.1610	-0.4477	-0.0091
148	-0.2603	-0.2143	-0.0971	149	-0.0285	-0.2143	-0.0034
150	-0.0773	-0.4460	-0.1566	151	-0.0981	-0.4460	-0.1650
152	-0.1188	-0.4460	-0.1734	153	-0.0880	-0.4966	-0.1900
154	-0.1245	-0.4722	-0.0995	155	-0.1245	-0.5372	-0.0995
156	-0.2362	-0.2910	0.1769	212	0.0000	0.0000	0.0000
215	-1.0597	0.3643	0.2706	216	-1.2645	0.2550	1.0206
217	-1.5086	0.2035	0.5449	218	-1.5441	0.2035	0.1967
219	-1.0397	0.3750	0.1967	220	-0.6145	0.2550	1.0206
221	-0.3110	0.2550	0.6285	222	-0.4520	0.2550	0.1967
223	-0.3989	0.2550	0.0653	224	-0.3361	0.2550	0.0907
225	-0.2202	0.2550	0.1375	226	-0.1044	0.2550	0.1843
227	0.0000	0.2550	0.2265	228	-0.1015	0.2943	0.1774
229	0.0000	0.1750	0.0000	230	-0.0257	0.1750	-0.0104
231	-0.2575	0.1750	-0.1040	232	-0.3202	0.1750	-0.1294
233	-0.9507	0.2950	-0.1294	234	-0.8307	0.2722	-0.1294
235	-1.8507	0.1600	0.1967	236	-1.8507	0.1600	-0.0219
237	-1.7835	0.1600	-0.0477	238	-1.5713	0.1600	-0.1294
239	-1.2711	0.1600	-0.1294	240	-1.0861	0.1600	-0.1294
241	-1.0181	0.1600	-0.1294	242	-0.9507	0.1600	-0.1294
246	-1.2711	0.0800	-0.1294	248	-1.0861	0.0800	-0.1294
256	-0.8307	0.1361	-0.1294	257	-1.6111	0.4261	-0.0557
258	-1.6154	0.4213	-0.0963	259	-1.6197	0.4166	-0.1368
260	-1.5703	0.4261	-0.0601	261	-1.5746	0.4213	-0.1006
262	-1.5789	0.4166	-0.1411	263	-1.5295	0.4261	-0.0644
264	-1.5338	0.4213	-0.1050	265	-1.5381	0.4166	-0.1455
266	-1.5746	0.5463	-0.1006	267	-0.3333	0.2943	0.0837
268	-0.1610	0.4477	-0.0091	269	-0.2603	0.2143	-0.0971
270	-0.0285	0.2143	-0.0034	271	-0.0773	0.4460	-0.1566
272	-0.0981	0.4460	-0.1650	273	-0.1188	0.4460	-0.1734
274	-0.0880	0.4966	-0.1900	275	-0.1245	0.4722	-0.0995
276	-0.1245	0.5372	-0.0995	277	-0.2362	0.2910	0.1769

NUM.	X	Y	Z	NUM.	X	Y	Z
146	-0.3333	-0.2943	0.0837	147	-0.1610	-0.4477	-0.0091
148	-0.2603	-0.2143	-0.0971	149	-0.0285	-0.2143	-0.0034
150	-0.0773	-0.4460	-0.1566	151	-0.0981	-0.4460	-0.1650
152	-0.1188	-0.4460	-0.1734	153	-0.0880	-0.4966	-0.1900
154	-0.1245	-0.4722	-0.0995	155	-0.1245	-0.5372	-0.0995
156	-0.2362	-0.2910	0.1769	212	0.0000	0.0000	0.0000
215	-1.0597	0.3643	0.2706	216	-1.2645	0.2550	1.0206
217	-1.5086	0.2035	0.5449	218	-1.5441	0.2035	0.1967
219	-1.0397	0.3750	0.1967	220	-0.6145	0.2550	1.0206
221	-0.3110	0.2550	0.6285	222	-0.4520	0.2550	0.1967
223	-0.3989	0.2550	0.0653	224	-0.3361	0.2550	0.0907
225	-0.2202	0.2550	0.1375	226	-0.1044	0.2550	0.1843
227	0.0000	0.2550	0.2265	228	-0.1015	0.2943	0.1774
229	0.0000	0.1750	0.0000	230	-0.0257	0.1750	-0.0104
231	-0.2575	0.1750	-0.1040	232	-0.3202	0.1750	-0.1294
233	-0.9507	0.2950	-0.1294	234	-0.8307	0.2722	-0.1294
235	-1.8507	0.1600	0.1967	236	-1.8507	0.1600	-0.0219
237	-1.7835	0.1600	-0.0477	238	-1.5713	0.1600	-0.1294
239	-1.2711	0.1600	-0.1294	240	-1.0861	0.1600	-0.1294
241	-1.0181	0.1600	-0.1294	242	-0.9507	0.1600	-0.1294
246	-1.2711	0.0800	-0.1294	248	-1.0861	0.0800	-0.1294
256	-0.8307	0.1361	-0.1294	257	-1.6111	0.4261	-0.0557
258	-1.6154	0.4213	-0.0963	259	-1.6197	0.4166	-0.1368
260	-1.5703	0.4261	-0.0601	261	-1.5746	0.4213	-0.1006
262	-1.5789	0.4166	-0.1411	263	-1.5295	0.4261	-0.0644
264	-1.5338	0.4213	-0.1050	265	-1.5381	0.4166	-0.1455
266	-1.5746	0.5463	-0.1006	267	-0.3333	0.2943	0.0837
268	-0.1610	0.4477	-0.0091	269	-0.2603	0.2143	-0.0971
270	-0.0285	0.2143	-0.0034	271	-0.0773	0.4460	-0.1566
272	-0.0981	0.4460	-0.1650	273	-0.1188	0.4460	-0.1734
274	-0.0880	0.4966	-0.1900	275	-0.1245	0.4722	-0.0995
276	-0.1245	0.5372	-0.0995	277	-0.2362	0.2910	0.1769

#### 4. Elementos

Los datos que deben prepararse en esta parte son la descripción de los tipos de elementos que forman al sistema así como su identificación de acuerdo a los nodos asociados.

Los tipos de elementos que formarán la malla varían de acuerdo al tipo de análisis que se hará (de esfuerzos o térmico) y a la geometría del cuerpo que se quiere simular. Cada tipo de elemento está definido por un número determinado de nodos con ciertos grados de libertad y por algunas propiedades mecánicas y físicas. Algunos ejemplos de estos tipos son: barras bidimensionales (definidas por dos nodos con dos grados de libertad cada uno), vigas elásticas tridimensionales y resortes (definidos por dos nodos con seis grados de libertad cada uno), y placas (definidas por cuatro nodos con seis grados de libertad cada uno).

A continuación se describe cada tipo de elemento de acuerdo a su material y características dimensionales, así como los nodos relacionados a cada elemento de ese tipo.

##### TIPO DE ELEMENTO # 1: Tubo de acero 1020 CR, 3/4" cédula 10

Este material se utilizó prácticamente en toda la estructura y suspensión. Se simuló mediante un elemento tipo viga<sup>2</sup> de forma tubular con las siguientes características:

$E$  (módulo de elasticidad)= 205E9 Pa

$\nu$  (relación de Poisson)=0.29

Diámetro externo=0.02667 m

Espesor de pared= 0.00211 m

$\rho$  (densidad)=7,798 kg/m<sup>3</sup>

El siguiente es el listado de los elementos con estas características, indicando el número de identificación del elemento y sus nodos relacionados.

---

<sup>2</sup>Este tipo de elemento se especifica mediante dos nodos, cada uno de ellos con seis grados de libertad.

ELEMENTO	NOD OS		ELEMENTO	NOD OS	
1	1	2	2	2	4
3	4	6	4	7	6
5	1	7	6	11	2
7	11	14	8	15	14
9	7	15	10	19	15
11	21	19	12	23	21
13	25	23	14	27	25
16	14	27	17	33	27
19	37	33	20	37	40
21	41	40	22	41	19
23	45	7	24	45	48
25	48	41	26	51	52
27	6	51	28	52	56
29	56	58	30	58	60
31	61	60	32	63	61
33	65	63	34	51	68
35	52	70	36	1	72
41	45	65	42	65	84
44	2	88	45	11	90
46	27	92	47	41	94
50	56	102	51	100	56
52	63	106	53	63	108
70	147	146	71	30	147
76	149	150	79	148	152
80	150	153	81	152	153
82	151	150	83	152	151
88	33	212	89	216	215
90	217	216	91	218	217
92	218	219	93	219	215
94	216	220	95	221	220
96	221	222	97	222	219
98	222	223	99	223	224

ELEMENTO	NOD OS		ELEMENTO	NOD OS	
100	224	225	101	225	226
102	226	227	104	227	221
105	227	229	106	229	230
107	231	230	108	231	232
109	223	232	110	219	233
111	234	233	112	232	234
113	236	235	114	235	218
115	237	236	116	238	237
117	239	238	118	239	240
119	240	241	120	241	242
121	68	235	122	70	236
123	72	215	128	242	233
129	84	242	130	88	216
131	90	220	132	92	227
133	94	232	136	259	237
137	237	257	138	263	241
139	265	241	144	267	268
145	268	228	150	271	270
153	273	269	154	274	271
155	274	273	156	271	272
157	272	273	162	212	229

TIPO DE ELEMENTO # 2: Barra sólida de acero forjado

Este material se utilizó para los portamangos de la suspensión delantera. Se simuló mediante un elemento tipo viga de forma circular con las siguientes características:

$$E= 205E9 \text{ Pa}$$

$$\nu=0.26$$

$$\text{Diámetro}=0.0127 \text{ m}$$

$$\rho=7.798 \text{ kg/m}^3$$

ELEMENTO	NOD OS	
73	147	154
74	154	153
147	275	268
148	274	275

**TIPO DE ELEMENTO # 3: Solera rectangular de fierro**

Este material se usó para los apoyos del motor y para el apoyo inferior del asiento. Se simuló mediante un elemento tipo viga de forma rectangular con las siguientes características:

$$E= 205E9 \text{ Pa}$$

$$\nu=0.28$$

$$\text{Base}=0.0381 \text{ m}$$

$$\text{Altura}=0.00635 \text{ m}$$

$$\rho=7,798 \text{ kg/m}^3$$

ELEMENTO	NOD OS		ELEMENTO	NOD OS	
37	73	60	124	239	246
38	75	73	125	246	75
39	61	78	126	248	240
40	78	80	127	80	248
48	95	86	134	86	256
49	48	95	135	256	234

**TIPO DE ELEMENTO # 4: Solera de acero 1020 CR de 0.25" de espesor.**

Este material se usó para los apoyos de los brazos de la suspensión delantera. Se simuló mediante un elemento tipo viga de forma rectangular con las siguientes características:

$$E= 205E9 \text{ Pa}$$

$$\nu=0.29$$

Base=0.032m

Altura=0.0127 m

$\rho=7,798 \text{ kg/m}^3$

ELEMENTO	NOD OS		ELEMENTO	NOD OS	
15	25	30	103	228	226
68	156	23	142	225	277
69	21	146	143	267	224
77	37	149	151	270	230
78	40	148	152	269	231

**TIPO DE ELEMENTO # 5: Barra sólida de acero forjado.**

Este material se utilizó para los mangos de la suspensión delantera. Se simuló mediante un elemento tipo viga de forma circular con las siguientes características:

$E= 205E9 \text{ Pa}$

$\nu=0.26$

Diámetro=0.031 m

$\rho=7,798 \text{ kg/m}^3$

ELEMENTO	NOD OS	
75	154	155
149	276	275

**TIPO DE ELEMENTO # 6: Barra sólida de acero 1010 CR.**

Este material se utilizó para los ejes que unen a las ruedas con la suspensión trasera. Se simuló mediante un elemento tipo viga de forma circular con las siguientes características:

$E= 205E9 \text{ Pa}$

$\nu=0.29$

Diámetro=0,033 m

$\rho=7,798 \text{ kg/m}^3$

ELEMENTO	NOD OS	
55	104	109
141	266	261

**TIPO DE ELEMENTO # 7: Amortiguadores traseros.**

Este elemento se representó únicamente con un resorte; no se consideró la constante de amortiguamiento debido a que este valor no lo proporcionan los fabricantes. Se simuló mediante un elemento tipo brecha<sup>3</sup> con la siguiente característica:

$K$  (constante de resorte)= 25,822 N/m

ELEMENTO	NOD OS	
54	104	6
140	218	261

**TIPO DE ELEMENTO # 8: Amortiguadores delanteros.**

Este elemento se representó únicamente con un resorte; no se consideró la constante de amortiguamiento debido a que este valor no lo proporcionan los fabricantes. Se simuló mediante un elemento tipo brecha con la siguiente característica:

$K= 17,074 \text{ N/m}$

ELEMENTO	NOD OS	
72	156	151
146	272	277

<sup>3</sup>Este elemento establece un vacío entre dos puntos entre los que actúa una constante de resorte. El elemento se especifica mediante dos nodos con tres grados de libertad cada uno

**TIPO DE ELEMENTO # 9: Solera de acero 1020 CR de 0.25" de espesor.**

Este material se usó para la placa de soporte de la suspensión trasera. Se simuló mediante un elemento tipo corteza<sup>4</sup> con las siguientes características:

$$E= 205E9 \text{ Pa}$$

$$\nu=0.29$$

$$\text{Espesor}=0.00635\text{m}$$

$$\rho=7,798 \text{ kg/m}^3$$

ELEMENTO	NOD OS			
84	101	102	105	104
85	104	105	108	107
86	107	106	103	104
87	104	103	100	101
158	258	261	262	259
159	261	264	265	262
160	264	261	260	263
161	261	258	257	260

### **C. Simulación**

Para cada uno de los casos que se estudiarán, la información se presentará de la siguiente manera: condiciones de frontera (desplazamientos y fuerzas o momentos), dibujo del sistema con las condiciones de frontera, y resumen de los resultados, primero para los elementos tipo viga, después para los tipo placa y por último un breve listado de los mayores desplazamientos nodales.

#### **1. Primer caso**

Las siguientes son las condiciones de frontera usadas en este caso:

<sup>4</sup>Este elemento sirve para representar una placa. Se especifica mediante 4 nodos con 6 grados de libertad cada uno.

**DESPLAZAMIENTOS**

NODO	UX	UY	UZ	ROTX	ROTZ
109	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
276	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Estos valores corresponden a la suposición de que el vehículo no se levantará del suelo mientras esté golpeando con un obstáculo. Los nodos sobre los que se aplican estas condiciones corresponden a los extremos del mango de la llanta delantera izquierda y a los ejes de las llantas traseras. Únicamente se permite la rotación en el eje de la llanta.

**FUERZAS**

NODO	FUERZA	VALOR (N)
73	FZ	-49,05
78	FZ	-49,05
95	FZ	-294,3
155	FX	-32,290
155	FZ	38,165
246	FZ	-49,05
248	FZ	-49,05
256	FZ	-294,3

Las fuerzas sobre los nodos 73, 78, 246 y 248 corresponden al peso del motor sobre las soleras de apoyo; las fuerzas en los nodos 95 y 256 corresponden al peso del piloto, y está aplicado sobre la solera que sirve de base al asiento. Las fuerzas en el nodo 155 corresponden al choque contra un objeto de 20 centímetros de radio y están aplicadas en el extremo del mango de la llanta delantera derecha; estos valores fueron obtenidos del diseño de la suspensión.

A continuación se muestra un dibujo del sistema con estas condiciones de frontera:

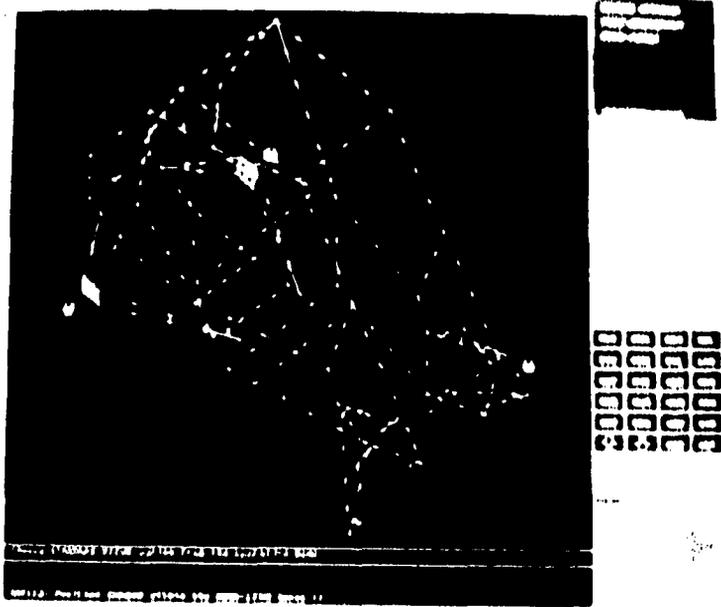


Fig. 1

Los resultados que se obtuvieron de esta simulación fueron los siguientes:

**ESFUERZOS LOCALES RESULTANTES MÍNIMOS Y MÁXIMOS**

(Para elementos tipo viga)

TIPO DE ESFUERZO	MÍNIMO		MÁXIMO	
	ELEMENTO	VALOR(Pa)	ELEMENTO	VALOR(Pa)
Axial	73	-61,753.2	73	61,753.2
Cortante en Y	74	-34,727.9	74	34,727.9
Cortante en Z	141	-38,609.6	141	38,609.6

Torsión	99	-41,288.6	99	41,288.6
Momento en Y	149	-8,286.32	149	10,744.5
Momento en Z	10	-4,061.05	147	3,874.55

Los elementos 73 y 74 corresponden al portamangos derecho; el elemento 141 representa el eje de la llanta izquierda trasera; el elemento 99 pertenece al tubo que sirve como apoyo a la parte superior del brazo de la suspensión delantera izquierda; el elemento 149 corresponde al mango izquierdo; el elemento 147 representa la parte superior del portamangos izquierdo; el tramo 10 pertenece al tubo que une los apoyos de los brazos de la suspensión delantera con el resto del vehículo.

#### VALORES MÁXIMOS DE LAS FUNCIONES DE ESFUERZO

(Para elementos tipo corteza)

	NODO	VALOR(Pa)
ESFUERZO CORTANTE MAXIMO EQUIVALENTE	259	354.768E6
VON MISES	259	625.803E6

El nodo 259 representa la esquina inferior izquierda de la placa usada en la suspensión trasera izquierda.

#### MAYORES DESPLAZAMIENTOS NODALES

LINEAL	ROTACIONAL
NODO	NODO
11	107
155	264
90	262
153	105
154	260

14	103
150	258
220	101
151	268
152	228

En los desplazamientos lineales, la mayoría de los nodos pertenecen a la suspensión delantera, como pueden ser mangos, portamangos, amortiguadores o tubería de sus brazos. Sólo los nodos 11, 90, 220 y 14 pertenecen a la estructura; los tres primeros pertenecen a la barra frontal del aro principal de la jaula para volcaduras, el cuarto corresponde al extremo superior del tubo que serviría de base para el espejo lateral derecho.

En los desplazamientos rotacionales, los primeros ocho nodos pertenecen a las placas usadas en la suspensión trasera, y sólo los últimos dos son de la suspensión delantera izquierda.

## 2. Segundo caso

Las siguientes son las condiciones de frontera:

### DESPLAZAMIENTOS

NODO	UX	UY	UZ	ROTX	ROTZ
266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
276	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Estas condiciones tienen la misma explicación que el caso anterior, pero sólo se aplican para las suspensiones delantera y trasera del lado izquierdo.

### FUERZAS

NODO	FUERZA	VALOR (N)
73	FZ	-49.05
78	FZ	-49.05

95	FZ	-294.3
109	FX	-19,374
109	FZ	22,899
155	FX	-12,916
155	FZ	15,266
246	FZ	-49.05
248	FZ	-49.05
256	FZ	-294.3

Las fuerzas sobre los nodos 73, 78, 246 y 248 corresponden al peso del motor sobre las soleras de apoyo; las fuerzas en los nodos 95 y 256 corresponden al peso del piloto, y está aplicado sobre la solera que sirve de base al asiento. Las fuerzas en el nodo 155 corresponden al choque contra un objeto de 20 centímetros de radio y están aplicadas en el extremo del mango de la llanta delantera derecha. Las fuerzas en el nodo 109 corresponden al choque con un objeto de igual tamaño y están aplicadas en el extremo del eje de la llanta trasera derecha; estos valores fueron obtenidos del diseño de la suspensión.

En la figura 2 se muestra un dibujo del sistema con estas condiciones de frontera.

Los resultados que se obtuvieron de esta simulación fueron los siguientes:

#### ESFUERZOS LOCALES RESULTANTES MÍNIMOS Y MÁXIMOS

(Para elementos tipo viga)

TIPO DE ESFUERZO	MÍNIMO		MÁXIMO	
	ELEMENTO	VALOR(Pa)	ELEMENTO	VALOR(Pa)
Axial	150	-44,310,700	150	44,310,700
Cortante en Y	106	-26,604,400	106	26,604,400
Cortante en Z	151	-30,868,200	151	30,868,200

Torsión	149	-6,525,210	149	6,525,210
Momento en Y	151	-1,421,950	147	2,717,170
Momento en Z	109	-2,592,640	102	1,411,780

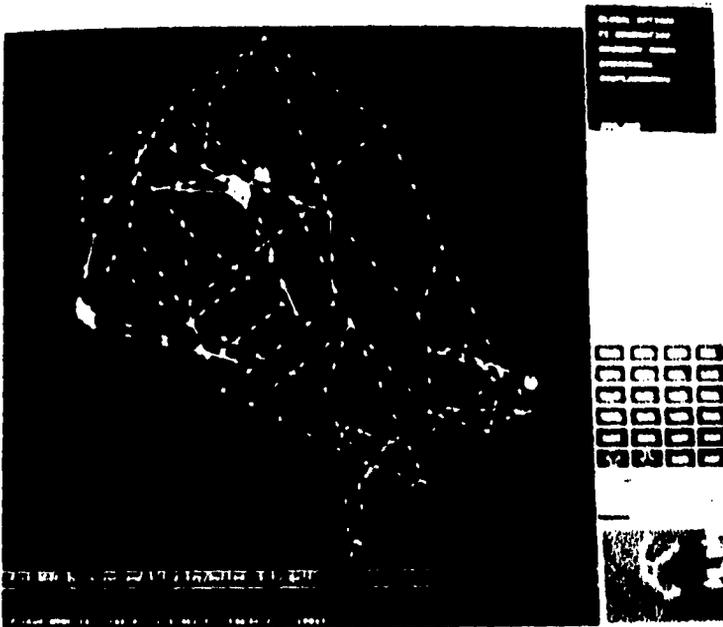


Fig. 2

El elemento 150 pertenece a la parte inferior del brazo de la suspensión delantera izquierda; los elementos 106 y 102 corresponden a tramos de los tubos inferior y superior respectivamente que sirven de apoyo al brazo izquierdo de la suspensión delantera; el elemento 151 pertenece a una articulación de la suspensión delantera izquierda; los nodos 149 y 147 corresponden al mango y portamangos izquierdo respectivamente; el elemento 109 pertenece al tubo que une a la suspensión delantera con el resto de la estructura.

### VALORES MÁXIMOS DE LAS FUNCIONES DE ESFUERZO

(Para elementos tipo corteza)

	NODO	VALOR(Pa)
ESFUERZO CORTANTE MAXIMO EQUIVALENTE	108	2939E9
VON MISES	108	5090.5E9

El nodo 108 es la esquina inferior derecha de la placa usada en la suspensión trasera derecha.

### MAYORES DESPLAZAMIENTOS NODALES

LINEAL	ROTACIONAL
NODO	NODO
109	104
2	109
11	107
88	105
90	103
216	101
220	262
14	260
155	276
153	275

En los desplazamiento rotacionales, todos los nodos pertenecen a la suspensión, trasera (placas y ejes de las llantas) y delantera (mango y portamangos). En los movimientos lineales, los nodos 2, 11, 88, 90, 216 y 220 pertenecen a las barras delantera y trasera del aro principal

de la jaula para volcaduras; el nodo 14 repite igual que en el caso anterior; el resto de nodos pertenecen a las suspensiones delantera y trasera.

### 3. Tercer caso

Las siguientes son las condiciones de frontera:

#### DESPLAZAMIENTOS

NODO	UX	UY	UZ	ROTX	ROTZ
109	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
276	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Estos valores son los mismos que en el primer caso.

#### FUERZAS Y MOMENTOS

NODO	VALOR	VALOR
73	FZ	-49.05 N
78	FZ	-49.05 N
95	FZ	-294.3 N
155	MX	-15,266 Nm
155	MZ	-12,916 Nm
246	FZ	-49.05 N
248	FZ	-49.05 N
256	FZ	-294.3 N

Las fuerzas sobre los nodos 73, 78, 246 y 248 corresponden al peso del motor sobre las soleras de apoyo; las fuerzas en los nodos 95 y 256 corresponden al peso del piloto, y está aplicado sobre la solera que sirve de base al asiento. Los momentos en el nodo 155 son producidos por la llanta que se encuentra en desnivel respecto a las demás, y están aplicados en

el extremo del mango de la llanta delantera derecha; estos valores fueron obtenidos del diseño de la suspensión.

A continuación se muestra un dibujo del sistema con estas condiciones de frontera:

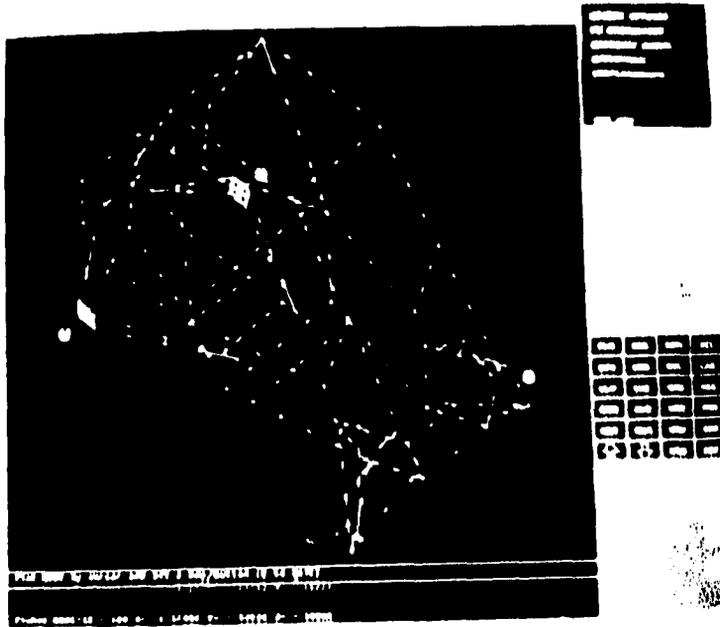


Fig. 3

Los resultados que se obtuvieron de esta simulación fueron los siguientes:

#### ESFUERZOS LOCALES RESULTANTES MÍNIMOS Y MÁXIMOS

(Para elementos tipo viga)

TIPO DE ESFUERZO	MÍNIMO		MÁXIMO	
	ELEMENTO	VALOR(Pa)	ELEMENTO	VALOR(Pa)
Axial	80	-120,270	80	120,270
Cortante en Y	74	-88,822.8	74	88,822.8

Cortante en Z	77	-59,494.7	77	59,494.7
Torsión	11	-4,176.24	11	4,176.24
Momento en Y	75	-15,266	75	15,266
Momento en Z	75	-12,916	75	12,916

El elemento 80 es tubería del brazo derecho de la suspensión delantera; los elementos 74 y 75 son del portamangos y mango derecho respectivamente; el elemento 77 es una articulación del brazo derecho de la suspensión delantera; el elemento 11 pertenece a la tubería que sirve de apoyo a la parte superior del brazo derecho de la suspensión delantera.

#### VALORES MÁXIMOS DE LAS FUNCIONES DE ESFUERZO

(Para elementos tipo corteza)

	NODO	VALOR(Pa)
ESFUERZO CORTANTE MAXIMO EQUIVALENTE	106	345.38E6
VON MISES	106	599.33E6

El nodo 106 es la esquina superior derecha de la placa usada en la suspensión trasera derecha.

#### MAYORES DESPLAZAMIENTOS NODALES

LINEAL	ROTACIONAL
NODO	NODO
11	103
155	260
90	262
220	105
14	107
153	264

2	155
150	154
151	101
88	258

Para los desplazamientos lineales, los nodos 11, 90, 220, 14, 2 y 88 repiten igual que en el caso anterior; el resto pertenece a las suspensiones delantera y trasera (amortiguadores, mangos, portamangos y tubería).

Referente a los desplazamientos rotacionales, todos vuelven a pertenecer únicamente a los mecanismos de la suspensión, principalmente a las placas de la trasera y al mango y portamangos de la delantera derecha.

#### **D. Análisis de los resultados**

El siguiente análisis hará referencia únicamente de aquellos nodos y elementos que aparecen en los resultados anteriores y que son parte de la estructura. Los resultados que aparecen referentes a la suspensión se mencionarán únicamente en las conclusiones.

En el primer caso, el elemento 99 está sometido a los máximos esfuerzos de tensión y compresión producidos por torsión. Este elemento está entre el soporte posterior de la parte superior del brazo izquierdo de la suspensión delantera, y el tubo perpendicular al cual se une. El elemento 10 está sujeto al máximo esfuerzo de compresión producido por un momento respecto a Z; este elemento corresponde al tubo que está entre el extremo derecho del refuerzo longitudinal de la cabina y el extremo posterior del tubo al cual se unen los apoyos superiores para el brazo derecho de la suspensión delantera. Esto implica que se deberá tener especial cuidado en las soldaduras que unan estos elementos, tanto tubos entre sí como tubos con los soportes de la suspensión.

De acuerdo a los desplazamientos, se deberá cuidar la soldadura o el doblado que se haga en la barra frontal del aro principal de la jaula para volcaduras, formado por los elementos 45 y 131.

El elemento que se colocó finalmente como refuerzo en la cabina y como apoyo para el espejo retrovisor derecho (elemento 8) va a ser una pieza fundamental, ya que sus dos extremos aparecen como puntos críticos, por un lado tiene uno de los desplazamientos máximos y por el otro está unido al elemento 10.

En el segundo caso, los resultados son muy parecidos. Referente a los máximos esfuerzos resultantes, los elementos 102 y 106 son tubos que van de la parte frontal del vehículo hacia los soportes frontales superior e inferior respectivamente del brazo izquierdo de la suspensión delantera. El elemento 109 está unido al tubo donde se apoya la parte superior del brazo izquierdo de la suspensión delantera. Esto vuelve a indicar el cuidado especial que se debe tener al unir toda la parte de la estructura que irá relacionada a la suspensión delantera y sus apoyos correspondientes.

Los desplazamientos son menores que en el caso anterior debido a que la estructura tiene más libertades de movimiento gracias a las condiciones de frontera, pero el aro principal de la jaula para volcaduras sigue apareciendo como un área de especial cuidado, tanto en sus tramos delantero como trasero (elementos 45, 130 y 131). El elemento 8 vuelve a resultar un elemento importante.

El tercer caso trae pocos resultados nuevos respecto a los dos anteriores, y únicamente sirve para confirmar que las dos áreas de la estructura en las que debe tenerse especial cuidado son su parte frontal, la jaula para volcadura y los refuerzos de la cabina.

Respecto a la parte trasera, no apareció ningún resultado de consideración, pero no por eso debe prestarse menos atención a la calidad de su manufactura.

### **E. Conclusiones**

**ESFUERZOS LOCALES RESULTANTES:** Prestando especial atención a los esfuerzos axiales y de torsión máximos y mínimos, se puede ver que en todos los casos sus valores están muy por debajo de los esfuerzos de cedencia (250 MPa a tracción y compresión y 145 MPa a corte); esto permite determinar que cualquiera de los elementos tipo viga no sufrirá ninguna falla mecánica con unos factores de seguridad de 5.6 y 25, más que suficiente para cualquier diseño de este tipo (el factor de seguridad recomendado es de 4). La mayor parte de los elementos que figuran en estos resultados pertenecen al mecanismo de la suspensión; pero aquellos que pertenecen a la estructura también están directamente relacionados con ese sistema, porque todos son tubos a los que se unen los apoyos de la suspensión o tubos que los unen con el resto de la estructura, por lo cual habrá que tener especial cuidado en la unión de estos tramos.

**FUNCIONES DE ESFUERZO:** El criterio del esfuerzo cortante máximo establece que un componente estructural dado es seguro siempre y cuando el valor máximo del esfuerzo cortante en dicho componente permanezca menor que el correspondiente valor del esfuerzo cortante en una probeta a tracción del mismo material cuando la probeta empieza a fluir. El criterio de Von Mises establece que un componente estructural dado es seguro siempre y cuando el valor máximo de la energía de distorsión por unidad de volumen en dicho material sea menor que la energía de distorsión por unidad de volumen requerido para causar fluencia en una probeta de prueba del mismo material a tracción.

Para los elementos tipo corteza, los criterios de esfuerzo cortante máximo y el de Von Mises (energía de distorsión máxima) indican que estos elementos sufrirán falla mecánica. Cabe hacer dos consideraciones: la primera es referente a las condiciones de las fuerzas aplicadas, porque se está haciendo la suposición que la llanta y los rines no absorben parte de la energía del choque contra un objeto, y por eso la simulación involucra fuerzas mucho mayores que las que

realmente pueden estarse aplicando; la segunda va orientada hacia un rediseño de estos elementos, tanto del material como de su geometría, para así quedar abajo de los esfuerzos de cedencia.

**DESPLAZAMIENTOS NODALES:** Debido a los puntos en que se aplicaban las fuerzas y a la suposición de que el vehículo no se levanta del suelo durante el choque contra un objeto, éste tenderá a sufrir una torsión en la dirección de su eje longitudinal. Considerando que el centro de gravedad del vehículo es relativamente bajo, esa torsión provocará que las partes superiores de la estructura sufran los mayores desplazamientos, y es por eso que se debe tener cuidado al ensamblar la jaula para voleaduras y todos sus elementos relacionados.

## **CAPÍTULO III CONSTRUCCIÓN**

### **CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN**

Esta etapa del proyecto inició a finales de enero, es decir, casi con 3 meses de atraso respecto al plan original; pero parte de este tiempo pudo recuperarse debido a que la construcción se efectuó en la mitad de lo planeado.

El proceso estuvo formado por los siguientes puntos:

- Fabricación del asiento
- Doblada, corte y esmerilado de tubos
- Unión de los tubos mediante soldadura
- Ensamblado de los sistemas
- Pailería
- Instalación de los dispositivos de seguridad
- Pruebas
- Pintura y acabados

A continuación se desarrollará cada uno de ellos, dejando hacia el final del capítulo la explicación de los errores y los aciertos a lo largo de esta etapa.

### **A. Fabricación del asiento**

Aunque el asiento no es en sí parte de la estructura, se dejó como responsabilidad de quien desarrollara este sistema debido a su dependencia del espacio disponible en la cabina y a las necesidades del reglamento; lo mismo ocurrió con los dispositivos de seguridad, como se mencionará en su oportunidad.

Se presentaban dos posibilidades: comprarlo en el mercado o fabricarlo. Las ventajas de la primera opción eran que el asiento tendría una excelente presentación y la inversión de tiempo sería menor, mientras que su desventaja principal era el costo ya que la mayoría de estos artículos son de importación. Por contrapartida, la segunda opción presentaba una gran ventaja: la posibilidad de tener un asiento a la medida exacta de las necesidades de espacio.

La solución tomada procuró combinar lo mejor de ambas alternativas. Debido a que ya se tenía terminado su diseño con todas las especificaciones, éste se construyó en una fábrica dedicada a la manufactura de asientos para automóviles comerciales.

El proceso de construcción fue el siguiente, mostrándose en la figura 1 el resultado final:

- El marco estuvo hecho mediante un sólo tramo de tubo doblado y soldado en la parte correspondiente al extremo superior del respaldo, para que en caso de que esta unión fallara no quedaran los extremos del tubo cercanos al piloto y así evitar cualquier peligro.
- A todo lo largo del respaldo se soldaron varillas equidistantes que servirían de apoyo para el piloto y para el material de relleno.
- Para la base del asiento se usó una parrilla<sup>1</sup> de asiento comercial.

Finalmente, al marco le fueron soldados dos tornillos de 1/4" por 4" en la parte correspondiente al respaldo que servirían para unirlo a la estructura mediante el tubo puesto con esa finalidad en la cabina; después se le agregó el material de relleno y la vestidura.

---

<sup>1</sup>Entramado de alambres y resortes que sirve para dar apoyo y muelleo.

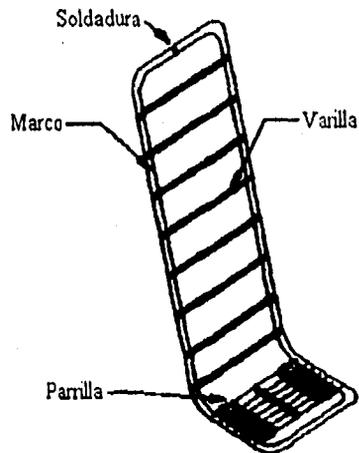


Fig. 1

### **B. Doblada de tubos**

Este es un proceso complejo debido a los estados de compresión y tensión que sufre el material en la zona de doblado. Los principales factores que deben cuidarse durante este proceso son: el radio de doblado mínimo permisible (en función del material y su geometría), la recuperación elástica del material (la cual puede ser compensada haciendo el doblado a un ángulo menor al especificado o aplicando una presión suficiente que elimine la zona elástica) y evitar que el tubo se colapse al doblarlo (usando algún material de relleno para el tubo en la zona del doblado).

#### **I. Selección**

Al seleccionar los tramos de tubo que debían ser doblados se tenían dos objetivos:

- Que todos los dobleces fueran posibles en un solo plano
- Minimizar el número de soldaduras.

El primer punto se apoya en la naturaleza misma del proceso y su equipo necesario: la mayoría de los métodos para doblar los tubos permiten controlar el ángulo en el plano que forman las herramientas, por lo cual es recomendable mantener todos los dobleces de una pieza en ese mismo plano y no complicar el proceso teniendo que regular el ángulo de otros planos. Para obtener mejores resultados al doblar formas complejas es recomendable usar otros métodos, como doblar el tubo alrededor de un bloque con la forma final preestablecida o usar prensas hidráulicas especialmente hechas para doblar tubos o barras.

El segundo punto buscaba la continuidad de las propiedades mecánicas del material, las cuales pueden ser afectadas al soldarlo. También se pretendía eliminar los posibles defectos del proceso mismo de soldadura.

De este modo, se puede concluir que los dos objetivos planteados intentaban facilitar el proceso de manufactura y reducir sus costos.

En la figura 2 se muestra un diagrama en explosión de los tramos que forman la estructura, resaltando aquéllos que debían doblarse. A cada tramo se le asigna un número de identificación, arábigo para los tramos doblados y romano para los tramos rectos, ya que será la forma en que se hará referencia a ellos a todo lo largo del capítulo.

## **2. Planos**

Los planos obtenidos al final del primer capítulo irían sufriendo modificaciones por las características mismas de los procesos de manufactura, específicamente por la doblada de tubos. Es importante siempre reflejar esos cambios en los planos para poder hacer las modificaciones necesarias antes de la fabricación.

Como se muestra en la figura 3, las distancias a modificar respecto a la intersección de los ejes de los tubos son directamente proporcionales al radio de doblado, por lo cual es importante trabajar con el menor radio posible.

El primer punto se apoya en la naturaleza misma del proceso y su equipo necesario: la mayoría de los métodos para doblar los tubos permiten controlar el ángulo en el plano que forman las herramientas, por lo cual es recomendable mantener todos los dobleces de una pieza en ese mismo plano y no complicar el proceso teniendo que regular el ángulo de otros planos. Para obtener mejores resultados al doblar formas complejas es recomendable usar otros métodos, como doblar el tubo alrededor de un bloque con la forma final preestablecida o usar prensas hidráulicas especialmente hechas para doblar tubos o barras.

El segundo punto buscaba la continuidad de las propiedades mecánicas del material, las cuales pueden ser afectadas al soldarlo. También se pretendía eliminar los posibles defectos del proceso mismo de soldadura.

De este modo, se puede concluir que los dos objetivos planteados intentaban facilitar el proceso de manufactura y reducir sus costos.

En la figura 2 se muestra un diagrama en explosión de los tramos que forman la estructura, resaltando aquéllos que debían doblarse. A cada tramo se le asigna un número de identificación, arábigo para los tramos doblados y romano para los tramos rectos, ya que será la forma en que se hará referencia a ellos a todo lo largo del capítulo.

## **2. Planos**

Los planos obtenidos al final del primer capítulo irían sufriendo modificaciones por las características mismas de los procesos de manufactura, específicamente por la doblada de tubos. Es importante siempre reflejar esos cambios en los planos para poder hacer las modificaciones necesarias antes de la fabricación.

Como se muestra en la figura 3, las distancias a modificar respecto a la intersección de los ejes de los tubos son directamente proporcionales al radio de doblado, por lo cual es importante trabajar con el menor radio posible.

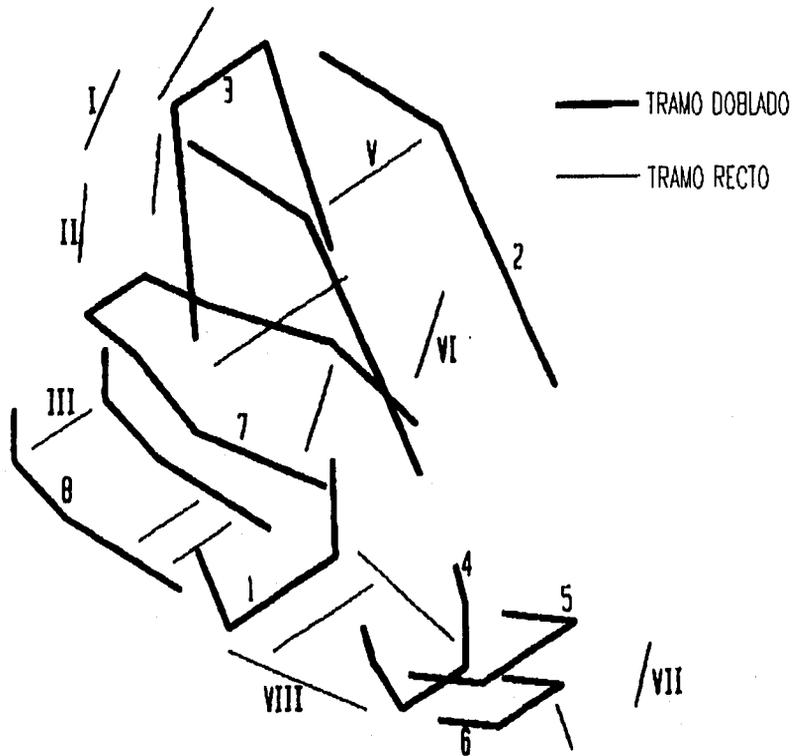


Fig. 2

El trabajo de doblado se hizo en un taller especializado ya que es un proceso cuya precisión es importante. El radio mínimo de doblado con el que trabajaba dicho taller para un tubo de 1 pulgada de diámetro exterior era de 60.325 mm. al eje del tubo, por lo que con este dato y con los tramos seleccionados para doblarse pudieron aplicarse en los planos los cambios necesarios.

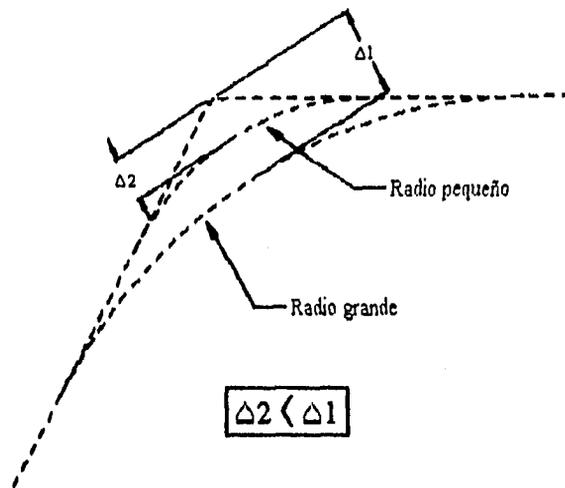


Fig. 3

En la figura 4 se muestran un dibujo en isométrico del diseño sin considerar los dobleces y otro con ellos para que se puedan apreciar algunas de las diferencias.

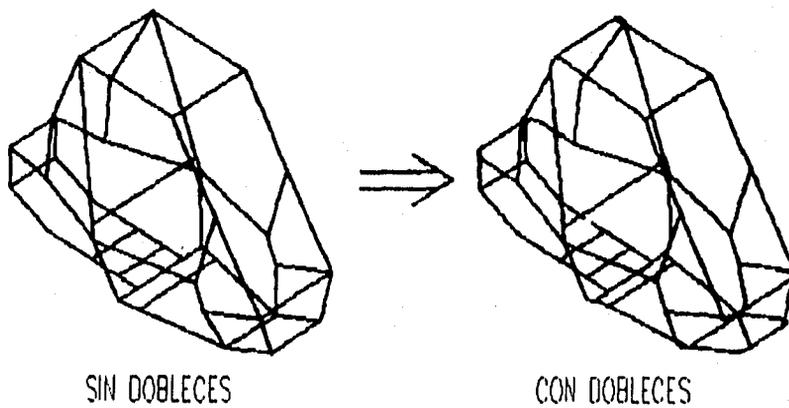


Fig. 4

Para su manufactura, el taller necesitaba planos donde se mostraran acotados los ejes de los tramos rectos hasta su intersección (sin considerar el doblez), así como el ángulo de doblado y las cotas principales considerando el diámetro exterior del tubo.

En la figura 5 aparecen los planos entregados a ese taller. Como medida de seguridad, las cotas tienen un margen de aproximadamente 5 cm. en los extremos del tubo para evitar problemas al momento de ensamblarlos.

Como nota final, es importante mencionar que si este proceso se hace en algún taller externo no se mencione que dicho trabajo se necesita para construir un vehículo, porque esto ocasiona que los costos del trabajo puedan elevarse hasta el doble.

### **C. Corte y esmerilado**

Esta etapa es necesaria para dejar preparados los tubos para su ensamblado. El objetivo era dejar los extremos de todos los tramos, tanto rectos como doblados, con la inclinación y curvaturas necesarias para que embonaran al ángulo adecuado en los lugares correspondientes y sin dejar grandes espacios que tuvieran que llenarse con soldadura. Cabe mencionar que para facilitar la manufactura se buscó que cualquier extremo llegara a una parte recta de tubo y no a medio doblez, ya que hubiera elevado la complejidad del proceso para alcanzar el objetivo planteado.

#### **1. Corte de los tubos**

Las longitudes de cada tramo y los ángulos de unión entre tubos se obtienen de los planos en computadora; pero hay que considerar que esas dimensiones son entre los ejes de los tubos, y por lo tanto se tendría en cada extremo un sobrante aproximado al radio externo del tubo.

Es necesario analizar en cada caso el sobrante en los extremos de los tubos, como se verá en el siguiente ejemplo: suponiendo la intersección del tubo A con el tubo B en ángulo recto, si se

Fébe A. Carrillo Hernández  
Universidad Panamericana

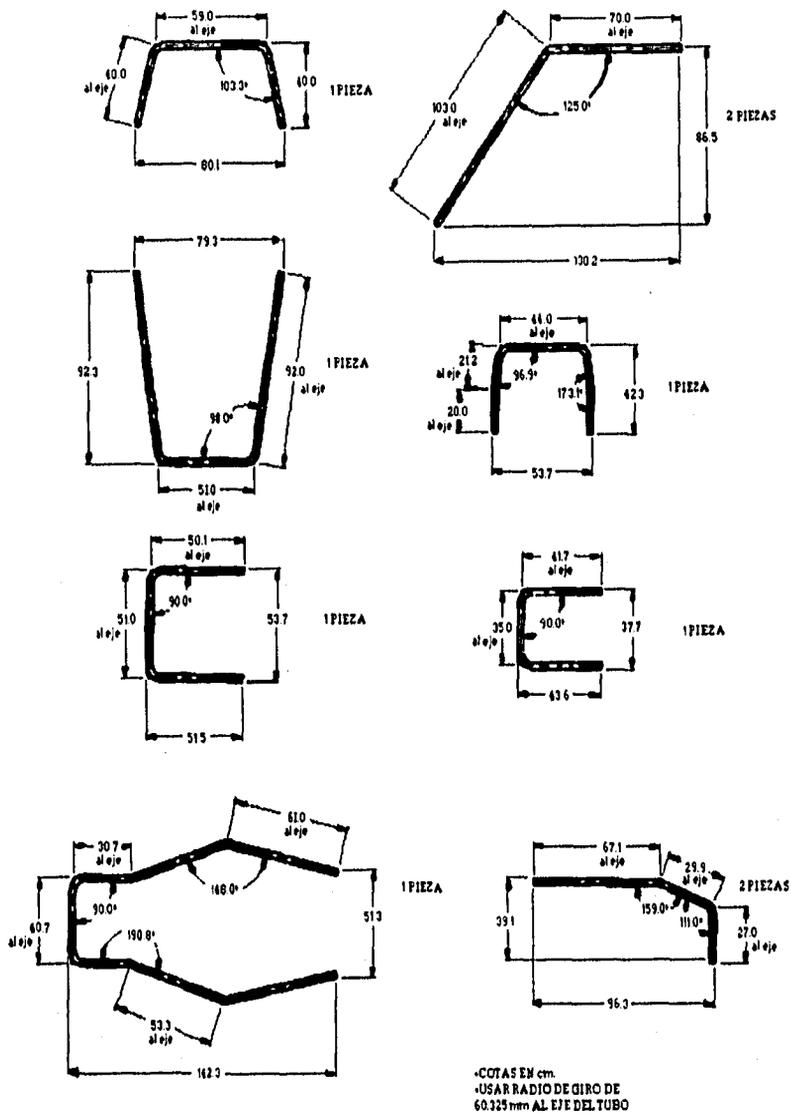


Fig 5

hace el corte de B a la dimensión indicada en los planos se tendría que rebajar mucho material mediante el esmerilado; pero por otro lado, si el corte en B elimina lo correspondiente al radio externo del tubo A queda mucho espacio por llenar con soldadura. Esto se ilustra en el siguiente dibujo.

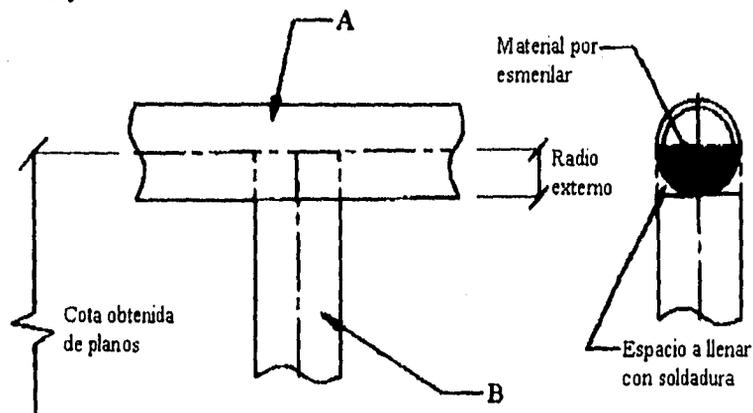


Fig. 6

Para equilibrar ambas situaciones, se optó por hacer el corte del tubo B incluyendo la mitad del radio externo de A (figura 7); esto reducía mucho el material que debía esmerilarse y el espacio entre tubos era prácticamente nulo.

Para los casos en que el ángulo de intersección entre los tubos A y B no fue cercano a los  $90^\circ$ , el corte del tubo se hizo de la siguiente manera: se marcaba sobre B la dimensión indicada en los planos; nuevamente, bajo el supuesto de que la intersección debía interferir una distancia igual a la mitad del radio externo del tubo, trigonométricamente se obtenía qué tanto más arriba o abajo de la marca anterior debía hacerse el corte de B. Estas últimas marcas se hacían diametralmente en B y siendo colineales con el eje del tubo A.

Por ejemplo, el caso de los tramos VII que encajan a  $70.5^\circ$  con los tramos 5 y 6 se muestra en la figura 8. En la parte izquierda del dibujo se acotan las distancias entre la intersección de

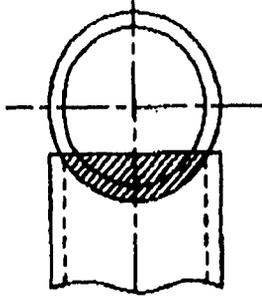


Fig. 7

los ejes de los tubos (que es la dimensión indicada en los planos) y la intersección del tramo VII con la línea que representa el medio radio del tubo 5. Se ve que estas cotas son diametralmente opuestas y colineales al eje del tubo 5. En la parte derecha del dibujo, las cotas señaladas determinan el ángulo al que debe hacerse el corte.

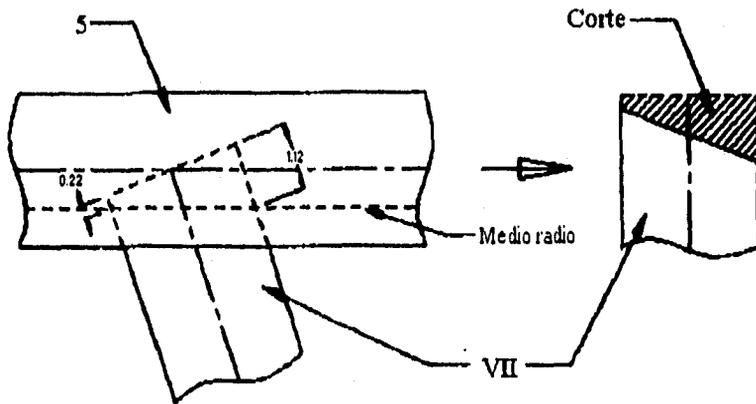


Fig. 8

Estos procedimientos fueron usados para todas las intersecciones, pero por cuestiones prácticas no se presentará cada caso. Lo importante es dejar claro los principios generales que se siguieron.

## 2. Esmerilado de los tubos

Este proceso era necesario para aumentar la superficie de contacto entre los dos tubos a soldar, para evitar tener cordones de soldadura demasiado gruesos y para aumentar la penetración de la soldadura en el material. La cantidad de material a esmerilar en cada caso se obtenía de los dibujos de la sección anterior y de manera experimental. Por ejemplo, cuando un tubo A embonaba en B, el procedimiento fue el siguiente:

1.- Marcar sobre A la distancia entre su extremo y el punto donde termina la interferencia con B. Esta marca debía hacerse en dos lugares diametralmente opuestos y colineales al eje de B. Las distancias podían obtenerse mediante los dibujos como el presentado al final de la sección anterior o trigonométicamente.

2.- Comenzar a esmerilar A hasta llegar a las marcas anteriores, dando la curvatura correspondiente a la parte externa de B.

3.- Asentar A con B para localizar los puntos irregulares que impidan una buena unión.

4.- Esmerilar dichos puntos y repetir el paso anterior hasta obtener resultados satisfactorios.

En la figura 9 se muestra la forma final de A suponiendo que embonara en ángulo recto con B. El mismo procedimiento fue utilizado para cualquier tubo.

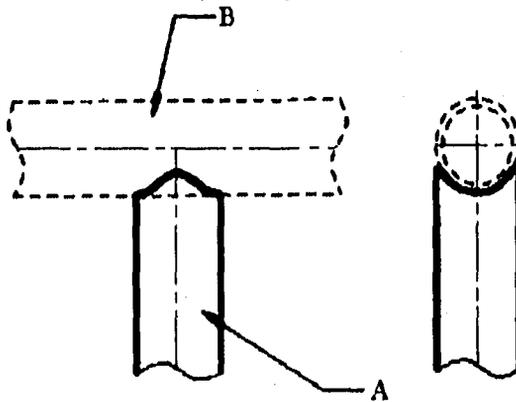


Fig. 9

#### **D. Soldadura de los tubos**

La secuencia de unión de los tubos que forman la estructura debía ser cuidadosamente seleccionada para asegurar la precisión del proceso y evitar complicaciones.

El objetivo era trabajar con secciones de la estructura relativamente pequeñas y obtener fácilmente planos absolutos de referencia; de este modo los tramos quedarían soldados en las posiciones correctas, de manera sencilla y ordenada.

En un principio la unión se hizo únicamente con puntos de soldadura por arco eléctrico (usando electrodos 6018), y ya ensamblada la estructura se llevó a un taller para que la soldadura final se hiciera a todo lo largo del contorno que forma la intersección de los tubos usando el método MIG, el cual proporciona uniones más limpias y con menor distorsión térmica que con arco eléctrico; sólo en cuatro uniones se usó este último método como refuerzo. Hay que recordar que en estos métodos de soldadura deben cuidarse los siguientes parámetros: pureza y continuidad del cordón de soldadura, así como su penetración.

La secuencia de unión se muestra en las distintas etapas de la figura 10, presentando a continuación una breve descripción de cada una de ellas.

a. La primera unión fue del tramo 1 con el 7. El plano de referencia usado fue el suelo, por lo que sólo debió cuidarse que el tramo 1 tuviera su inclinación de  $105.3^\circ$  respecto a la horizontal. En la parte izquierda de este dibujo se muestra la posición en que se hizo la soldadura, pero a la derecha se muestra un isométrico para representar su ubicación dentro de la estructura general.

b. Unir los tramos 8 con los 7 y 1. El plano de referencia fue el tramo 7, el cual debía ser paralelo al suelo. Una vez colocados los tramos 8 y antes de soldarlos se verificó que quedaran horizontales, lo cual debía cumplirse para que los tramos estuvieran ensamblados correctamente.

c. Unir 3 con 7. El plano de referencia lo daba lo que ya se tenía soldado de la estructura hasta ese momento, por lo que sólo debió verificarse la inclinación de  $105.3^\circ$  respecto a la horizontal del tramo 3.

d. Unir 5 y 6 con 4. Estas uniones eran a  $90^\circ$ , por lo que el plano de referencia fue el tramo 4 colocado sobre el suelo. Nuevamente, en la parte izquierda del dibujo se muestra la posición en la que se hizo la soldadura, pero en el isométrico de la derecha se muestra de acuerdo a su posición en la estructura.

e. Unir los tramos VII con los 5 y 6. En este caso no fue necesario un plano de referencia porque ya se tenían fijos los puntos correspondientes a los extremos de estos tramos.

f. Unir los dos grupos obtenidos hasta el momento. El plano de referencia fue el suelo, cuidando que la parte delantera de la estructura quedara a  $22^\circ$  respecto a la horizontal. Estos dos puntos de unión fueron reforzados con un cordón de soldadura por arco eléctrico.

g. Unir los VIII entre 1 y 4. El plano de referencia fue el suelo, aunque éste no hubiera sido necesario porque ya estaban completamente ubicados los puntos donde irían los extremos de los tramos VIII.

h. Unir los II a 7. El plano de referencia lo daba toda la parte inferior de la estructura, por lo que únicamente se cuidó la inclinación de  $84.2^\circ$  respecto a la horizontal que debían tener los tramos II.

i. Unir los tramos I. Tampoco se necesitó plano de referencia porque ya estaban fijos sus extremos y por lo tanto su posición. Los dos puntos de unión de los tramos I con los II también fueron reforzados con arco eléctrico.

j. Unir el tramo III entre los 8. Únicamente se verificó que quedara completamente horizontal.

k. Unir el tramo IX. Su posición se obtenía de los planos, y al soldarlo se observó que quedara horizontalmente.

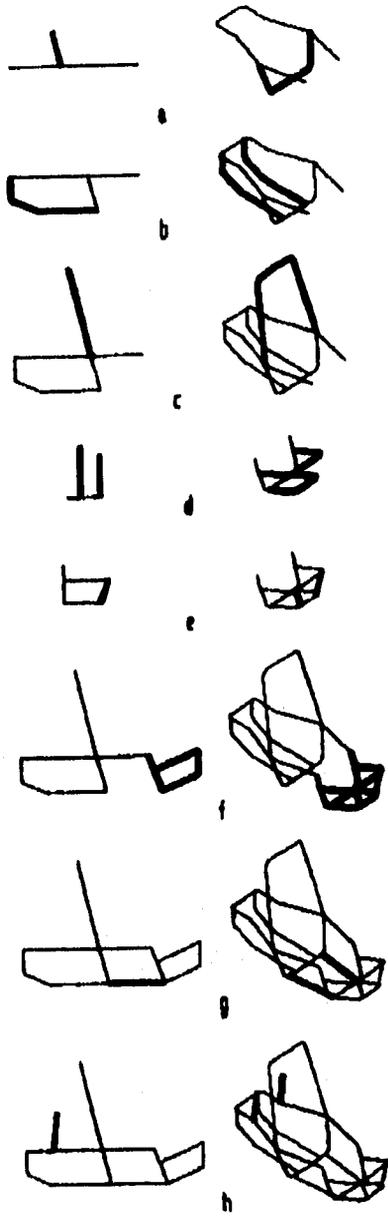


Fig 10a

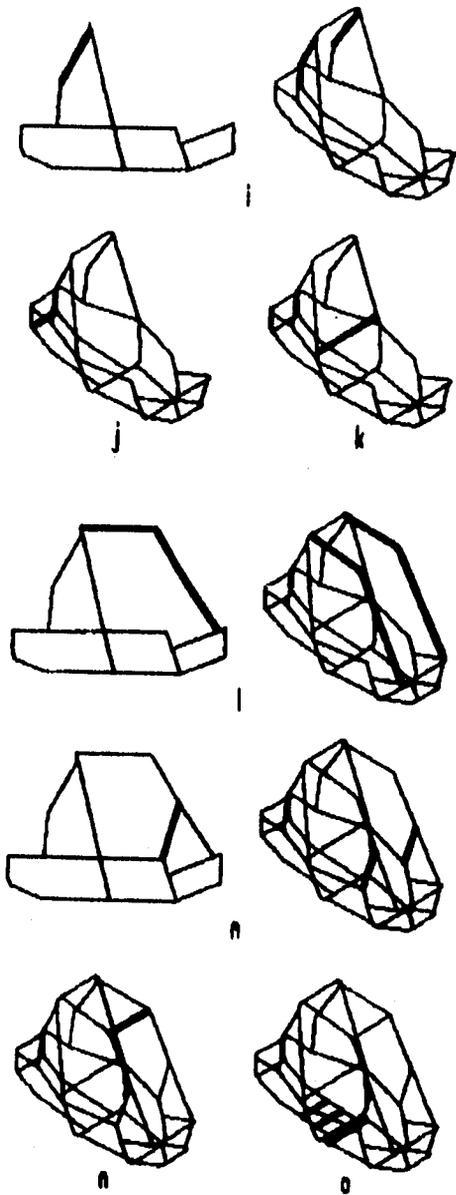


Fig 10b

l. Unión de los tramos 2, cuyos extremos ya estaban fijos y su única referencia fue conservar su parte superior en un plano horizontal.

m. Unión de los tramos VI. Uno de sus extremos estaba fijado por la estructura y el otro se obtenía de los planos. No usó ninguna otra referencia.

n. Unión del tramo V. Su posición estaba fija y sólo se cuidó que quedara en un plano horizontal.

o. Unión de las soleras que servirían de soporte para el motor y para el asiento. Su ubicación se obtenía de planos.

Aunque los procesos de corte, esmerilado y soldadura de tubos se expusieron de manera secuencial, no siempre siguieron ese orden. En algunas ocasiones se requería tener una parte de la estructura ya soldada para proceder al corte y esmerilado de otros segmentos, pero no se entró a ese nivel de detalle por claridad en la exposición.

### **E. Ensamblado de los sistemas**

Como se ha mencionado anteriormente, todo el diseño de los diversos sistemas se trató de hacer de manera integral para facilitar la construcción y evitar interferencias; sin embargo, por diversas razones este objetivo se pudo cumplir únicamente para la suspensión y la transmisión, dejando la dirección y los frenos con una metodología más empírica.

#### **1. Suspensión**

Este sistema se ensambló fácilmente en la estructura gracias a que en los planos del diseño quedó especificada la posición de todos los puntos de unión entre los sistemas, que eran los soportes para los brazos y los soportes para los amortiguadores. Todo el proceso consistió en soldar dichos soportes con arco eléctrico usando electrodos 6018.

## **2. Transmisión**

Este sistema quedó integrado casi totalmente en el diseño a la estructura; por ejemplo, el motor, las poleas y engranes estaban claramente localizados. Pero otros elementos fueron determinados empíricamente conforme avanzaba el proceso de construcción, como el caso del soporte para la caja de la transmisión y el del apoyo para el acelerador, que aunque estuvieron planeados, nunca quedaron claramente dimensionados.

Para la caja de la transmisión se soldó un tubo en la parte posterior del tramo 7 de tubería, mientras que el apoyo del acelerador fue una solera que se soldó en la parte delantera derecha del tramo 6.

## **3. Frenos**

Parte de este sistema quedó integrado al diseño gracias al sistema de la transmisión, pero los puntos que lo unirían a la estructura fueron establecidos nuevamente de manera empírica, como fueron el caso del soporte para el cáliper y el apoyo para el freno, quedando ambos soldados hasta que la estructura estuvo terminada.

El soporte del cáliper fue una placa de acero soldada al tramo 8 derecho cerca del doblé de 159°. El soporte para el freno fue igual que el del acelerador, pero soldado en la parte delantera izquierda del tramo 6.

## **4. Dirección**

Lo único especificado en planos para este sistema era la posición del sistema piñón-cremallera, pero sus apoyos y el mecanismo que condujera el movimiento del volante a este sistema se hicieron empíricamente, siendo probablemente el sistema que llevó más tiempo ensamblar.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

79

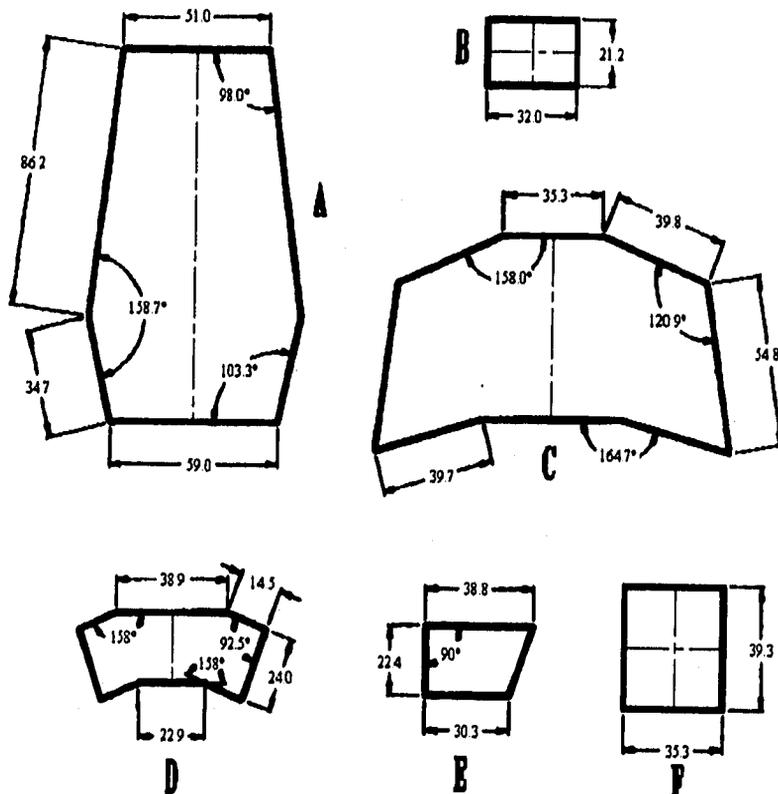
#### **F. Pailería**

El reglamento exigía el uso de láminas en la parte inferior y en la posterior de la cabina (ver restricciones del reglamento en el capítulo I), pero por cuestiones de seguridad también se usaron en la parte baja de ambos costados para evitar que algún objeto externo pudiera entrar y causarle daño al piloto.

Otras dos láminas se usaron en la parte delantera y trasera del vehículo para mostrar el número usado durante la competencia, de acuerdo a lo especificado en el reglamento.

En la figura 11 se muestran los cortes iniciales de las láminas mencionadas, pero sufrieron modificaciones al momento de instalarse. En todos los casos se les redondearon las esquinas por cuestiones de seguridad; a la lámina A, que estaría en el respaldo de la cabina, se le hicieron unos cortes para que no interfiriera con los tubos 2, 7 y VIII; a la lámina F se le hicieron unos cortes en la parte delantera para que librara los soportes de los pedales y parte del mecanismo de la dirección, ya que iría colocada en la parte inferior del frente de la cabina; de la lámina E se hicieron dos piezas para cada uno de los costados de la parte delantera de la cabina, pero como irían por dentro, se les hicieron unos dobleces para aumentar el espacio disponible; las láminas B y D irían en las partes trasera y delantera del vehículo respectivamente; la lámina C serviría para cubrir la parte inferior y las laterales de la cabina a la altura del asiento. Las últimas tres láminas no requirieron mayores modificaciones porque irían por la parte externa de la estructura y no interferían con ningún tubo.

Las láminas se unieron a los tubos con remaches POP de 3/16" por 1/4" cada 10 centímetros, por lo cual fueron necesarios cerca de 100 remaches. Es importante no dejar mucho espacio entre remaches, ya que la lámina produciría ruido debido a las vibraciones del vehículo en funcionamiento.



Cotas en cm.

Fig. 11

### **G. Instalación de los dispositivos de seguridad**

Como se mencionó al inicio del capítulo, los dispositivos de seguridad fueron responsabilidad de quien diseñara la estructura. La instalación de estos dispositivos abarcó los siguientes puntos:

- **Cubierta del mecanismo de la dirección:** Debido a que este mecanismo iría por dentro de la cabina, era necesario cubrirlo para evitar que entrara en contacto con las piernas o los pies del piloto. Esta cubierta se unió a las láminas E y F con tornillos de 1/16" y usando arandelas de presión.
- **Cinturón de seguridad:** Dos puntos de apoyo se tomaron del tubo donde se uniría el respaldo del asiento, mientras que los otros dos fueron de la solera donde se apoyaría la base del asiento. Se usaron tornillos de 3/8" grado 8 con tuercas de seguridad. Los puntos de apoyo se muestran en la figura 12.
- **Protección de la tubería:** Los tubos de casi toda la cabina fueron forrados por tubo Insul (aislamiento térmico a base de nitrato PVC) como protección para el piloto. En la figura 12 se muestran los tubos que se forraron.

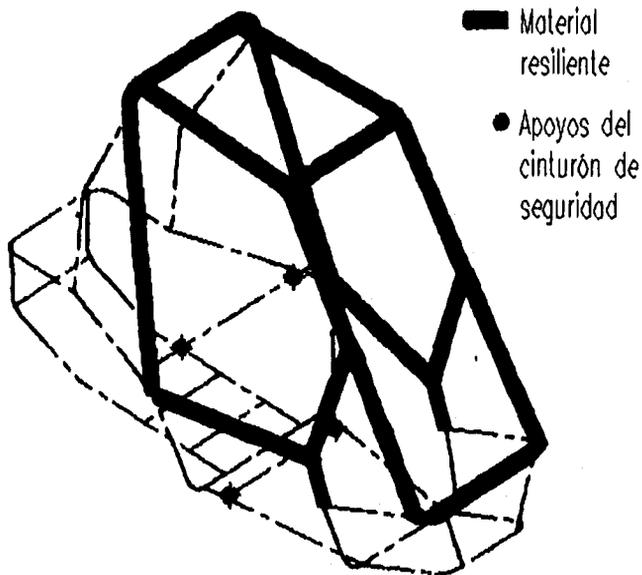


Fig. 12

- **Instalación del asiento:** Como medida de seguridad, se usaba doble tuerca para los tornillos del asiento.
- **Charola para escurrimientos:** Se remachó una lámina doblada en forma de charola en la parte inferior del tanque de la gasolina para evitar que cualquier escurrimiento del combustible cayera sobre el motor. Los remaches usados fueron los mismos que para las demás láminas.
- **Tanque de gasolina:** Debía quedar completamente protegido por la estructura en caso de volcadura. Su posición se muestra en la figura 13. Se usaron tornillos de 3/8" con tuercas de seguridad.
- **Extintidor:** Es importante que estuviera al alcance del piloto, por lo cual se colocó dentro de la cabina por debajo de sus piernas. Se usaron tornillos de 3/8" con tuercas de seguridad. Véase la figura 13.
- **Interruptor de apagado del motor (*Kill switch*):** Este interruptor ponía en tierra el encendido del motor. Debía estar también al alcance del piloto, por lo cual se colocó sobre el tubo VI izquierdo. Un cable corría por dentro de la cabina hacia el motor.
- **Muñequeras:** Iban unidas al volante con tornillos de 1/4" y tuercas de seguridad.
- **Espejos retrovisores:** Se colocaron dos espejos a ambos lados sobre bases soldadas a los tubos VI.

#### **H. Pruebas, pintura y acabados**

Las pruebas se hicieron en la segunda quincena de marzo de 1994, es decir, únicamente durante dos semanas en lugar de los dos meses que se tenían planeados.

Con la reducción del tiempo las pruebas efectuadas no tuvieron la duración deseada, además de que fueron hechas en terrenos poco exigentes al desempeño del vehículo. Esto provocó que

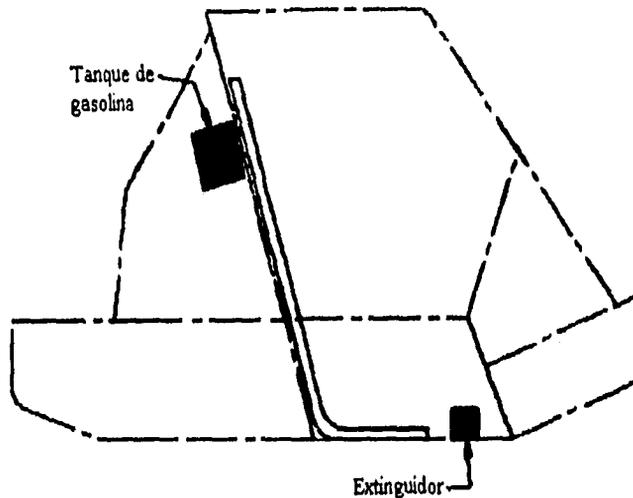


Fig. 13

algunas fallas no fueran detectadas sino hasta la competencia, a pesar de los ajustes que se hicieron. En el caso particular de la estructura, no se realizaron correcciones durante el periodo de pruebas.

Para el pintado se desmontaron todos los sistemas de la estructura. Todos los tubos y las láminas fueron limpiados con *thinner* para eliminar cualquier residuo de grasa producido por la construcción. Al momento de volver a ensamblar los sistemas se tuvieron que hacer nuevamente ciertos ajustes y pruebas para dejarlos funcionando correctamente. Los acabados (calcomanías del número de competencia, del escudo de la escuela y del nombre del vehículo, un banderín y el forro de los tubos de la cabina) se colocaron después de haber transportado el vehículo hasta la ciudad donde se efectuó la competencia para evitar que fueran maltratados.

## **I. Errores y aciertos**

### **1. Errores**

Los siguientes son los puntos negativos del diseño y la construcción del vehículo, los cuales

deben tenerse muy en cuenta para corregir en proyectos posteriores:

- Selección de tubos a doblar: Los tramos I y II se podían haber obtenido con un sólo tramo doblado, eliminando dos de los cuatro cordones de soldadura que fueron reforzados. Es importante que al hacer la selección se cubran todos los casos posibles.
- Usar el material correcto: Aunque ya se tenían las especificaciones del tubo y la lámina que deberían usarse, se cambiaron por diversos motivos. El tubo de 3/4" de diámetro nominal cédula 10 no lo trabajaban las compañías grandes mas que en acero inoxidable, y sólo se encontró en acero al carbono en una casa pequeña pero con un espesor de pared muy irregular, por lo que finalmente se usó el cédula 40 con un incremento en peso de casi el 33%. No se buscó alguna especificación alternativa, como el de 1" de diámetro nominal cédula 5 donde el incremento en peso hubiera sido sólo del 1.5%, pero con los problemas de tener un espesor menor de pared.

También se usó lámina distinta a la especificada, ocupando lámina galvanizada cédula 22 ya que fue la disponible en el momento; pero esto implicó más peso además de que la pintura se cae fácilmente aunque se lije la superficie, disminuyendo la calidad de la presentación. Toda la lámina usada fue del mismo tipo.

- Discrepancia entre los modelos y la realidad: Aunque los diseños de los sistemas se hicieron en los mismos planos y se construyó un modelo a escala para poder identificar interferencias y espacios disponibles, si éstos no se hacen con precisión no se cumple el objetivo. En este caso, el modelo que representaba al motor tenía un error respecto a las dimensiones reales en una de sus aristas; esto provocó que se tuviera un espacio desperdiciado de aproximadamente 10 centímetros entre el motor y el respaldo de la cabina. Para aprovechar ese espacio dentro de la cabina, se le hicieron modificaciones al tramo IX de tubería y a la lámina A, lo cual provocó retrasos en la construcción.

## **2. Aciertos**

Los errores tuvieron un peso menor que los aciertos porque los primeros aparecieron aisladamente, mientras que los segundos estuvieron presentes a todo lo largo del proyecto. No se puede decir que los siguientes puntos conformen la metodología óptima de trabajo en este tipo de proyectos, pero ciertamente ayudan a tener directrices claras y darle una coherencia general al trabajo, siendo éstas dos últimas, las ideas que siempre deben tenerse en mente:

- **Un diseño integral:** Los sistemas siempre fueron diseñados como parte de un todo y no de manera independiente. La estructura siempre tuvo en cuenta las necesidades de los demás sistemas.
- **Una planeación correcta:** Todo el plan del proyecto estuvo perfectamente definido desde el principio, y aunque no se cumplió siempre, evitó las incertidumbres de ir planeando sobre la marcha. El programa para la estructura se fue mencionando a lo largo de este capítulo.
- **La eliminación de tiempos muertos:** Los calendarios de construcción de todos los sistemas fueron coordinados de tal manera que la finalización de uno coincidiera con la finalización o el avance suficiente de los demás sistemas relacionados. La estructura no fue el primer sistema en construirse, pero estuvo terminado para cuando fue necesario ensamblar los demás.
- **El uso de mano de obra especializada:** Obviamente por cuestiones presupuestales y por propio interés, ésta no fue usada en toda la construcción, pero fue útil en algunas tareas para obtener trabajos de calidad en poco tiempo. En el caso de la estructura, se utilizó para la doblada y soldadura de tubos, y para la fabricación del asiento.
- **Experiencias anteriores:** El análisis sobre las causas de los errores del proyecto anterior fue acertado, lo cual sirvió para no repetirlos. El de la estructura se expone en el primer capítulo.

- La creación de un ambiente de trabajo en equipo: Mantener una comunicación constante entre los integrantes del equipo además de estar dispuesto a ser operativo cuando fuese necesario.

#### **J. Ficha técnica de la estructura**

- Dimensiones generales: Longitud: 187.6 cm.  
Ancho: 77.5 cm.  
Altura: 117.5 cm.

- Tubo usado: Acero mecánico con costura, 3/4" diámetro nominal cédula 40

Total de tubería: 20.3 m (34.12 kg.)

- Lámina usada: Acero galvanizado cédula 22

Total de lámina: 2 m<sup>2</sup> (12.05 kg.)

- Soldadura: cordones con MIG y puntos con arco eléctrico usando electrodos 6018

Total de cordones de soldadura: 47

- Solera usada: Solera de fierro de 1/4" por 1 1/2"

Total de solera: 104 cm. (2 kg.)

- Material usado como forro en los tubos de la cabina: Tubo Insul

Total de tubo Insul: 8.70 m

- Remaches usados: POP de 3/16" por 1/4"

- **Peso del asiento:**      **Armazón: 3.42 kg.**  
                                 **Forro y vestidura: 2.25 kg.**

- **Peso aproximado de los elementos de seguridad: 4 kg.**

**TOTAL DEL PESO DE LA ESTRUCTURA → 55.84 kg.**  
**(Incluyendo elementos de seguridad)**

**El vehículo estuvo planeado para pesar 180 kg. sin piloto.**

**CAPÍTULO IV**  
**FABRICACIÓN EN**  
**SERIE**

#### **CAPÍTULO IV. FABRICACIÓN EN SERIE**

Como se menciona al inicio del primer capítulo, una de las normas establecidas en el reglamento de competencia es la suposición de que el diseño del vehículo será aprobado por una fábrica para una producción anual de 4,000 unidades.

Los métodos de manufactura empleados para una producción en serie pueden ser distintos a los usados en la construcción del prototipo; es por ello que a continuación se hará un análisis de las distintas alternativas comerciales para los procesos usados en la fabricación de la estructura (doblada y soldadura de tubos, corte y conformado de láminas y su unión con tubería). El estudio no pretende dar una explicación profunda de cada uno de los procesos, sino mencionar únicamente aquellas características que permitan hacer una comparación entre los distintos procedimientos y que sirvan para determinar su adaptación a este diseño en particular. Se considerará que los materiales empleados en la construcción serán aquellos especificados en la etapa de diseño.

Por último se hará un breve análisis de los costos unitarios para la materia prima y la mano de obra considerando la producción en serie. El nivel de sencillez de este análisis va de acuerdo al reporte de costos solicitado como uno más de los eventos de la competencia, por lo tanto no

es del interés de este caso considerar gastos indirectos, amortizaciones, ni demás variables económicas que intervienen en un proyecto real.

#### **A. Procesos para doblar tubos**

Las máquinas usadas para doblar tubos pueden clasificarse de manera general en tres grupos: dobladoras rotatorias, prensas y dobladoras de rodillos.

Las rotatorias pueden dividirse a su vez en tres tipos: por tensión (*stretch bending*), por compresión (*compression bending*) y por estirado (*draw bending*). En las dos primeras se usa un dado fijo con la forma del doblado, pero varían en la forma en que el tubo es ajustado al dado: en la doblada por tensión se aplica una fuerza en ambos extremos del tubo, mientras que en la de compresión se fija un extremo al dado con una abrazadera y la fuerza se aplica al otro extremo con una zapata que corre sobre el tubo. El equipo usado es igual si se dobla manual o mecánicamente; manualmente se pueden doblar tubos hasta de 1.5 pulgadas de diámetro exterior y 0.065 pulgadas de pared, pero el proceso es lento y su repetibilidad es cuestionable. De manera mecánica se pueden doblar tubos de un máximo de 12 pulgadas de diámetro y 0.25 pulgadas de pared.

Las prensas para doblar son máquinas hidráulicas especialmente hechas para esta tarea. El doblado se consigue mediante la presión de una matriz unida a un ariete; el tubo se encuentra recargado en otra matrices y en un sistema de amortiguamiento. El doblado se logra sin arrugas ni distorsión a mayor velocidad, y su diseño abierto permite obtener formas complejas (varios dobleces en varios planos) en un sólo montaje.

Las dobladoras de rodillos constan de tres rodillos en disposición piramidal a través de los cuales pasa el tubo. Uno de los rodillos es ajustable para obtener distintos radios de curvatura, la cual es siempre uniforme. Este procedimiento es adecuado para obtener arcos, círculos o hélices. Se pueden doblar tubos de hasta 8 pulgadas de diámetro por 0.240 pulgadas de pared.

Un factor importante a considerar en este proceso es que las herramientas deben tener canales de guía cuidadosamente formados para dar apoyo a las paredes exteriores del tubo y preservar la sección transversal mientras se dobla.

Otro punto que debe cuidarse al doblar tubos es la necesidad de usar herramientas especiales para evitar colapsos o aplastamientos descontrolados en el doblado, convirtiéndose esto en un aspecto más crítico conforme el espesor del tubo y el radio del doblado disminuyen. El método más simple y viejo es usar partículas sueltas de algún material bien compactado, normalmente arena, en el interior de la parte a doblar; con esto se logra dar soporte y distribuir los esfuerzos, retirándose la arena después del proceso. Esto es muy usado para doblar tubos mediante calentamiento.

Con la misma finalidad se pueden usar mandriles, los cuales se pueden clasificar en tres tipos: rígidos, flexibles y articulados. Los rígidos se ajustan en el interior del tubo y en ocasiones se les da forma para conformarse al principio del doblado; sin embargo, debido a su rigidez le dan soporte a la circunferencia total del tubo únicamente hasta el punto de doblado y no más allá a la tangente del doblado. Los mandriles flexibles se doblan junto con el tubo; generalmente están hechos de láminas o tiras delgadas. Este tipo de mandril se usa para tubos cuadrados que requiere pocos dobleces. Insertar y remover los mandriles flexibles es normalmente difícil. Finalmente, los mandriles articulados están formados por secciones individuales conectadas (a modo de collar de perlas); la forma de esas secciones es muy variada, siendo el más usado el mandril de bola.

El método seleccionado para una aplicación particular depende del equipo disponible, el tamaño de la producción, las dimensiones y el material del tubo, el radio de doblado, el número de dobleces en una pieza de trabajo y la precisión requerida.

En este caso, el tubo a doblar es de acero de bajo carbono, 3/4" diámetro nominal cédula 10, con costura. El menor ángulo de doblado es de  $6.9^\circ$  y el mayor de  $90^\circ$  con tolerancia de  $\pm 1^\circ$ .

Por vehículo deben hacerse 26 dobleces (104,000 en la producción total, o 50 dobleces por hora). El radio de doblado es de 60.325 mm. al eje del tubo. Con base en estos parámetros y a las características de las herramientas, el procedimiento debe hacerse usando dobladoras rotatorias por estirado, impulsadas mecánicamente.

Para determinar si se requiere un mandril al doblar el tubo, existen nomogramas<sup>1</sup> que establecen si se necesita o no y de qué tipo debe ser. Los parámetros usados en el nomograma son la relación del tubo (definida como  $D/t$ , donde  $D$  es el diámetro externo del tubo y  $t$  es el espesor de pared) y la relación del doblado ( $R/D$ , donde  $R$  es el radio del doblado medido al centro del tubo). En este caso particular, la relación del tubo es de 12.65 y la relación del doblado vale 2.375, y de acuerdo al nomograma cae en la zona que no requiere mandril.

### **B. Soldadura**

Existe una gran variedad de métodos para este procedimiento, pero el siguiente estudio se limitará a tratar aquéllos comercialmente usados para el material involucrado en este diseño, es decir, aceros al carbono con espesores inferiores a los 3 milímetros.

Estos métodos son los siguientes: arco eléctrico revestido (SMAW), arco sumergido (SAW), MIG (GMAW), TIG (GTAW), por resistencia (RW), de arco por presión (FW), a gas (OFW), con rayo de electrones (EBW) y por rayo láser (LBW).

**SMAW:** Es un proceso por arco donde la unión es producida por el calentamiento con un arco entre un electrodo metálico protegido y las piezas de trabajo. La protección se logra con la descomposición de la cubierta del electrodo. No se requiere hacer presión y el metal de relleno se obtiene del electrodo.

Este proceso se emplea para la producción en forma manual o automatizada, y tiene muchas áreas de aplicación, particularmente en la fabricación de maquinaria, equipo de transporte,

---

<sup>1</sup>Cfr. American Society for Metals, Metals Handbook, E.U.A., 1987, p. 667, tomo 14

sistemas de tubería y en varias estructuras.

**SAW:** La unión es producida por el calentamiento con un arco entre un electrodo metálico sin cubierta protectora y las piezas de trabajo. El arco queda cubierto por una capa de material granular fundible colocado sobre la pieza de trabajo. No se ejerce presión y el material de aporte se obtiene del electrodo y algunas veces de una varilla suplementaria.

Este método puede usarse con equipo totalmente automatizado (las alimentaciones del fundente granular y el electrodo están controladas) o semiautomatizados (las alimentaciones se controlan manualmente). Debido a que el fundente granular debe cubrir la unión a soldar, este método se limita a piezas colocadas en posición horizontal y es especialmente apropiado para uniones en línea recta y de gran longitud.

**GMAW:** El área de soldadura se cubre por una fuente externa de gas inerte (argón, helio, dióxido de carbono o mezclas). El alambre descubierto consumible se alimenta automáticamente a través de una boquilla hacia el arco. Estas soldaduras están relativamente libres de escoria, y por lo tanto pueden depositarse múltiples capas en la unión sin necesidad del paso intermedio de limpieza.

Este proceso es adecuado para soldar gran variedad de metales ferrosos y no ferrosos. Debido a su naturaleza relativamente simple, el entrenamiento del operador es sencillo. El proceso es rápido, versátil y económico (tiene una productividad dos veces mayor a la del SMAW). Es un proceso fácilmente automatizado y adaptable a manufactura flexible.

**GTAW:** El electrodo no se consume y el material de aporte se obtiene de un alambre. Se puede obtener un tamaño de arco constante y estable a un nivel constante de corriente. El material de aporte es similar al de la pieza de trabajo, aunque en los casos que existan juntas poco separadas pueden soldarse sin este material. El gas que se usa como protección es usualmente argón o helio, o una mezcla de ambos.

Este método se usa para una gran variedad de metales, especialmente aluminio, magnesio, titanio y metales refractarios. Es especialmente útil para placas delgadas. El costo del gas inerte hace este proceso más caro que el SMAW, pero proporciona soldadura de muy alta calidad y acabado superficial.

**RW:** Es un grupo de procesos de soldadura donde la unión es producida por el calor obtenido de la resistencia de la corriente eléctrica en un circuito en el cual la pieza de trabajo es una de las partes, y por la aplicación de presión. Hay seis tipos de procesos en este grupo: soldadura de puntos por resistencia (RSW), de costura por resistencia (RSEW), de proyección por resistencia (RPW), de arco con presión (FW), de recalado (UW) y de impacto (PEW).

Los más usados son los tres primeros. La RSW está restringida a placas delgadas, principalmente acero inoxidable, aluminio, magnesio, níquel y sus aleaciones, bronce y latón, y es difícil soldar metales diferentes. La RSEW se usa sobre todo para altas producciones, pero está restringida a la unión de metales que son más delgados que los unidos por soldadura de punto. La RPW es similar a la de puntos, pero permite soldar piezas de mayor espesor.

**FW:** Las superficies que van a soldarse se sujetan en sostenes y se colocan muy próximas una de la otra de tal modo que se puede producir el arco eléctrico entre las superficies provocando calor hasta la temperatura de fusión. El proceso requiere precalentamiento para piezas grandes y voluminosas y un tratamiento térmico posterior. Se usa comúnmente con metales ferrosos; también permite tener soldaduras de metales diferentes, incluyendo metales refractarios como el tungsteno, molibdeno y tantalio. Es un proceso adecuado para las uniones a tope.

**OFW:** Grupo de procesos de soldadura donde la unión es producida por el calentamiento de una flama de gas con o sin la aplicación de presión y con o sin el uso de material de relleno. Existen tres tipos: soldadura oxiacetileno (OAW), oxihidrógeno (OHW), y de gas a presión (PGW). La OAW puede usar fundentes para evitar la oxidación y mejorar la unión; es

apropiada para metales ferrosos y no ferrosos, y puede soldar secciones metálicas gruesas. La OHW se usa con metales de bajo punto de fusión, como el aluminio, magnesio y plomo. La PGW no requiere varilla de relleno; se aplica presión en las partes calentadas, y puede trabajar con metales ferrosos y no ferrosos.

**EBW:** La unión es producida por el calor obtenido de un rayo concentrado compuesto principalmente de electrones de alta velocidad que chocan contra la superficie a unir. Tiene una distorsión mínima el área de soldadura. Puede trabajar casi con cualquier metal.

**LBW:** La unión es obtenida por el calor debido a la aplicación de un rayo coherente concentrado que choca contra las superficies de la unión. Se puede usar en una gran variedad de metales y es particularmente efectiva en piezas delgadas de trabajo. Tiene altas velocidades de aplicación.

Debido a su naturaleza, algunos de estos procesos no pueden usarse para la unión de los tubos considerando que se requieren cordones en diversas posiciones. Los procesos que no se ajustan a esta necesidad son los RW, FW y SAW.

Para continuar con el proceso de selección es necesario recurrir al estudio de otros parámetros. El orden en que se considerarán estos parámetros es: productividad, distorsión térmica (por sus efectos mecánicos) y costos.

Respecto a la productividad, el OFW tiene una gran desventaja respecto a los demás debido a su generación de calor relativamente baja, lo que provoca que tenga una velocidad baja de aplicación.

Considerando el siguiente parámetro, el SMAW produce la mayor distorsión térmica entre los procesos restantes, además de que tiene un ciclo largo de aplicación debido al paso intermedio de limpieza de escoria y las correcciones finales que deben hacerse al cordón de soldadura para mejorar su presentación.

En el caso de los métodos EBW y LBW, el trabajo final es de gran calidad, pero tienen como principal inconveniente el elevado costo de sus equipos, por lo cual quedan descartados, dejando la decisión final entre el GMAW y el GTAW. Ambos procesos producen uniones de gran calidad (mecánica y de presentación) y limpieza, además de que generan pocas distorsiones térmicas; sin embargo, el GTAW tiene dos desventajas: es un proceso más caro y tiene menor disponibilidad de operadores, por lo cual se deduce que el método seleccionado para la unión de los tubos será la soldadura GMAW.

De acuerdo a los dibujos del diseño, se requieren 45 cordones de soldadura para unir todos los tubos; considerando que cada cordón se aplica en todo el perímetro de la intersección de los tubos, se deben usar aproximadamente 3.77 metros de soldadura por vehículo.

### **C. Preparación de las uniones de los tubos**

En cada uno de los extremos del tubo era necesario remover un poco de material para reducir los espacios existentes en las uniones.

Los procesos de remoción de material se pueden clasificar en tres categorías: eliminación mediante desbaste, eliminación sin desbaste y eliminación de metal mediante calor. El más usado de estos métodos es el de eliminación mediante desbaste; éste emplea una herramienta cortante endurecida para formar (y eliminar) la viruta. Por su parte, la eliminación de material sin desbaste agrupa una serie de procesos basados en fenómenos físicos, químicos y eléctricos. La tercera forma de eliminar material emplea la flama ardiente para fundir el material de la pieza de trabajo (por ejemplo, oxiacetileno, plasma, etc.)

Los procesos del segundo grupo son recomendados para materiales muy duros, además de que tienen baja velocidad de producción, mientras que los del tercer grupo dejan muy malos acabados superficiales. Es por eso que el siguiente análisis se enfocará a los métodos de eliminación de material con desbaste.

Estos métodos son: torneado, fresado, cepillado, escariado, esmerilado, taladrado y rimado. El torneado y esmerilado pueden maquinar superficies planas, cilíndricas internas y cilíndricas externas; el fresado y cepillado permiten trabajar con superficies planas; el escariado puede trabajar superficies planas y cilíndricas internas; el taladrado y rimado sirven para superficies cilíndricas internas.

En este caso, el maquinado debe dejar una superficie cóncava en el extremo del tubo, lo cual sería difícilmente conseguido con las herramientas convencionales de los métodos arriba mencionados. Dos alternativas que surgen son el fresado de forma y el esmerilado de forma. En ambos casos tendrían que usarse herramientas especiales con la forma externa del tubo de 1 pulgada de diámetro externo, siendo el único modo de obtener de manera precisa esa forma compleja.

De estas opciones, el fresado sería un proceso más lento y poco versátil para controlar los ángulos necesarios en los distintos tramos de tubo, por lo cual se escoge el esmerilado de forma.

## **D. Lámina**

### **1. Corte**

Existen dos procesos de corte para las láminas del vehículo: uno es la creación de muescas (*notching*) para aquellas láminas que interfirieran con tubos, y el segundo es el corte para la obtención final de la forma (*blanking*), considerando la eliminación de esquinas. Ambos procesos deben hacerse en troqueles de corte, que pueden ser simples, compuestos, progresivos y de transferencia. Los simples permiten hacer una operación a la vez y son cargados y descargados individualmente. Los compuestos son troqueles de una estación en los cuales se puede hacer más de una operación con una sola carrera de presión sin necesidad de volver a colocar la pieza de trabajo; se limitan a operaciones de corte relativamente simple. Los

progresivos desarrollan una serie de operaciones en dos o más estaciones en cada carrera de presión, y son adecuados para grandes producciones. Los de transferencia son similares a los progresivos excepto porque las piezas de trabajo no están unidas a una tira y tienen que moverse mecánicamente de estación a estación, colocadas normalmente en línea recta o en círculo.

Por la sencillez de las operaciones que tienen que hacerse y por el tamaño de la producción, se recomienda usar troqueles compuestos.

## **2. Conformado**

Este proceso es necesario para dar forma a las láminas mediante la presión de un punzón sobre una matriz. Las formas usadas en este diseño son sencillas: algunos dobleces y el conformado de las orillas para que tomen la forma del tubo al que serán unidos; estas piezas se pueden obtener en una sola operación, permitiendo tener una producción rápida.

Un parámetro importante es la lubricación, que tiene como objetivo el desgaste de las herramientas y reducir la fricción en áreas críticas.

## **3. Unión a tubos**

Los métodos más comúnmente usados para unir láminas a tubos son: remaches y soldadura de puntos por resistencia; las desventajas del primer método es la necesidad de hacer perforaciones en la lámina y el tubo, y las desventajas mecánicas que trae esto en la tubería.

La soldadura de puntos por resistencia se estudió anteriormente en este capítulo. El espacio que debe existir entre dos puntos estará en función de la vibración y el ruido que provoquen las láminas, aunque este problema puede disminuirse por el conformado de las láminas que produce mejoras en sus propiedades mecánicas.

**E. Análisis de costos**

NOTA: Para este análisis, se considera que el precio al mayoreo de la materia prima es el 60% del precio al menudeo. Esta aproximación está permitida por el reglamento.

**MATERIA PRIMA**

Concepto	Cantidad	Precio unitario (N\$)	Total (N\$)
Tubería de acero	20.3 m.	7.10 por metro	144.13
Lámina negra	2 m <sup>2</sup>	8.93 por m <sup>2</sup>	17.86
<b>TOTAL:</b>			<b>161.99</b>

**MANO DE OBRA Y MATERIALES**

Concepto	Cantidad	Total (N\$)
Doblada de tubos	26 dobleces	100.00
Esmerilado de tubos	46	60.00
Soldadura GMAW	3.77 m.	30.00
Soldadura de puntos	35 puntos	20.00
Corte y conformado de láminas	--	30.00
<b>TOTAL:</b>		<b>240.00</b>

## **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

Es importante hacer un análisis de los factores que contribuyen a tener un proyecto sólido y, como consecuencia, buenos resultados en la competencia. Estos factores se pueden dividir en dos grupos: los referentes a la organización (antes y durante la competencia) y los de desempeño del vehículo. Por último, se hará un análisis final de la estructura y se mencionarán algunos puntos sobre los que ésta puede ir evolucionando.

**Factores de organización:** En cualquier proyecto que involucre trabajo en equipo, es necesario mantener una organización clara y sencilla. Ésta puede estar apoyada en las siguientes bases:

1.- Responsabilidades bien definidas: Esto se logra controlando el número de integrantes del equipo. Cada sistema del vehículo (estructura, suspensión, dirección, transmisión y frenos) debe ser desarrollado sólo por una persona, a menos que su complejidad amerite la participación de dos personas máximo. Esto permite decir que el tamaño ideal del equipo es de 5 ó 6 integrantes; la experiencia ha demostrado que equipos con 10 ó más personas tienen resultados poco eficientes.

2.- Financiamiento: Este aspecto debe cubrirse preferentemente desde el inicio del proyecto

asegurando las fuentes de financiamiento, que pueden ser los mismos integrantes del equipo o patrocinios industriales, particulares o de la escuela.

3.- Plan de trabajo: Desde el principio del proyecto debe establecerse un calendario de actividades, con fechas y metas objetivas a las cuales se comprometan todos los integrantes del equipo; la existencia de estos hitos permite evaluar en cualquier momento el desarrollo del proyecto. Puede tomarse como referencia el plan mostrado en el primer capítulo.

4.- Reuniones periódicas: Ya que se tiene una completa interdependencia de los sistemas, es necesario mantener una continua comunicación sobre las decisiones que se tomen para cada uno de ellos. Estas reuniones deben hacerse desde el principio del proyecto para evitar contratiempos posteriores, y es recomendable hacer las minutas correspondientes.

5.- Asignación de tareas para la carrera final: Todos los integrantes del equipo tienen que participar activamente durante las cuatro horas de duración. En una reunión previa pueden discutirse las posiciones que cada uno tendrá dentro y fuera de los *pits*, quiénes serán pilotos, por cuánto tiempo y en qué orden, y por último definir las responsabilidades para corregir las fallas del vehículo. Para esto último sirve tener separadas las herramientas específicas de cada sistema y aquellas que sean de uso común.

**Factores de desempeño del vehículo:** Los siguientes puntos deben considerarse con el fin de disminuir los imprevistos durante la competencia.

1.- Es fundamental el período de pruebas del vehículo al finalizar su construcción. Éste sirve para hacer los ajustes y correcciones necesarios a tiempo, y no hacerlos cuando ya se está en competencia; deben hacerse con tiempo suficiente para poder corregir cualquier falla que surja, por grave que sea. Este tiempo también sirve para probar a los pilotos más adecuados para los distintos eventos de la competencia.

2.- Es recomendable que en el equipo exista al menos un integrante con la experiencia de haber ido a una competencia anterior, ya que en ésta no sólo cuenta la parte mecánica para el

buen desempeño del vehículo, el factor humano también influye. Esa experiencia puede ayudar a manejar favorablemente los detalles particulares de cada prueba.

3.- Aunque se tenga un vehículo veloz y potente, es importante cuidarlo durante la carrera final. Ésta es más una prueba de resistencia que de velocidad, lo que se demuestra con dos hechos: los vehículos que plantearon su estrategia en ir rápido para dar más vueltas pasaron más tiempo en reparaciones que compitiendo; además, el promedio de velocidad del vehículo ganador en 1994 fue de 25.3 km/h (a pesar de que fueron segundo lugar en la prueba de aceleración).

Ahora se hará un resumen final sobre los puntos más significativos de la estructura, mencionando sus puntos fuertes y débiles, y aquellos aspectos que deben cuidarse en proyectos posteriores para mantener un diseño competitivo.

**Puntos fuertes:**

- Completa orientación hacia las necesidades de los demás sistemas.
- Resistencia mecánica, demostrada desde la simulación y comprobada durante las competencias.
- Notable mejoría respecto al proyecto anterior, tanto en la calidad del trabajo como en una distribución más inteligente de los elementos estructurales, quedando demostrado con la reducción del 21% en la tubería usada.

**Puntos débiles:**

- Con las diferencias entre los materiales especificados en el diseño y aquéllos usados, se tuvo un aumento aproximado de 12 kg. en el peso del vehículo.
- Se debe cuidar más la presentación de los acabados finales, por ejemplo, la apariencia de la pintura.

**Puntos a evolucionar:** Sin descuidar los aspectos mencionados en este trabajo para la estructura, las siguientes son áreas sobre las cuales deben apoyarse diseños posteriores.

- Reducción de la cantidad de material usado: Esto se logrará aprovechando al máximo el uso de los elementos estructurales y buscando diseños innovadores que salgan de los estereotipos conocidos.
- Experimentar con materiales que ayuden a tener una buena presentación final y sean ligeros, por ejemplo, fibra de vidrio o polímeros. Estos se recomiendan únicamente para los acabados, y no para algún elemento estructural.
- Aumentar el espacio en la cabina: Con base en el presente diseño y dando una nueva distribución a los sistemas de la parte trasera del vehículo, se puede lograr un aumento de 10 a 20 centímetros en la cabina para comodidad del piloto sin sobrepasar la extensión total de 1.90 m.

La relación entre los estudios profesionales y la participación en estas competencias es en ambos sentidos. Por un lado, para tener un prototipo competitivo y de calidad son necesarias una serie de herramientas obtenidas a lo largo de los estudios, especialmente en los últimos dos años; estas herramientas son: el uso de programas de diseño asistido por computadora (CAD), conocer los principios de métodos como el de elemento finito para el análisis de sistemas mecánicos, saber sobre los procesos de manufactura empleados industrialmente y sus aplicaciones, y los estudios en mecánica de sólidos y diseño de máquinas. Por otro lado, la participación en este tipo de competencias resulta un excelente complemento para la preparación de los estudiantes, tanto en el aspecto técnico como para fomentar el trabajo en equipo y sus responsabilidades inherentes

Sin embargo, las herramientas necesarias para participar en esta competencia en particular no se limitan únicamente al ámbito escolar; también son necesarios algunos estudios básicos de

mecánica del automóvil que permitan comprender la relación y el funcionamiento de los distintos sistemas. Estas relaciones son principalmente entre la dirección y la suspensión delantera, entre la transmisión con la suspensión trasera y los frenos, y la relación de todos estos con la estructura y viceversa, la cual se ha mencionado a lo largo de este trabajo.

Las universidades juegan un papel importante para fomentar la participación continua de los estudiantes en estas competencias; esa participación traerá como principales beneficios la retroalimentación de los conocimientos adquiridos y el aprovechamiento de las curvas de experiencia generadas, así como poder constatar que la preparación de los estudiantes de ingeniería en México está al nivel de aquéllos en Canadá y Estados Unidos.

Por último, este análisis sistematizado de los pasos necesarios para obtener la estructura de estos vehículos (diseño, simulación, rediseño si es necesario y construcción), pretende hacer que en próximas participaciones se tengan prototipos más eficientes y de ese modo contribuir al mejoramiento de los resultados obtenidos.

**ANEXOS**

## ANEXO 1

### EVENTOS DE LA COMPETENCIA

La competencia consta de un total de 1000 puntos posibles divididos de la siguiente manera:

<b>Pruebas estáticas</b>	
Diseño de ingeniería y seguridad	100
Presentación de ventas de ingeniería	100
Costo	100
<b>Pruebas de desempeño</b>	
Maniobrabilidad	100
Aceleración	100
Ascenso de colina	100
Carrera de resistencia de 4 horas	400
<b>TOTAL</b>	<b>1000</b>

#### Diseño de ingeniería y seguridad

Este evento califica todos los detalles relacionados con la seguridad y se lleva a cabo el primer día de competencia. Los vehículos serán inspeccionados para que cumplan con los requerimientos mínimos de seguridad. Así mismo, dentro de las pruebas de seguridad del vehículo está la de frenado, en la cual se verifica que los frenos bloqueen completamente las llantas motrices.

El diseño mecánico será juzgado en base a las siguientes características: estética, dispositivos estructurales, facilidad de producción en masa e innovación.

#### Presentación de venta de ingeniería

La presentación se hace durante el primer día de competencia. Se dispone de 5 minutos para mostrar las ventajas y cualidades del vehículo diseñado con la intención de vender ese proyecto a una firma ficticia. La presentación se hace a 3 jueces, y para la misma se pueden usar grabaciones en video, transparencias, acetatos, etc., influyendo la calidad de la presentación en la puntuación obtenida.

### Costos

El costo de producción del vehículo debe ser presentado en un reporte a más tardar a las 9:00 del primer día de competencia. El reporte tiene 2 calificaciones:

**Costo: 15 puntos**

**Calidad del reporte: 85 puntos**

Todos los costos presentados deben estar basados en una producción de 4000 unidades anuales y no en el costo de fabricación del prototipo. Los precios de partes deben ser los de mayoreo, y los costos de los procesos de manufactura deben ser de aquéllos que se usarían para la producción en serie y no de los usados para la construcción del prototipo.

La calidad del reporte facilita la revisión del mismo a los jueces. El costo debe estar dividido en los siguientes sistemas: estructura, suspensión, tren de potencia, frenos, controles y dirección, y acabados. Los costos presentados son revisados por los jueces y corregidos si se considera que son inferiores a los costos reales. Los precios de fabricación deben ser presentados mediante cotizaciones avaladas por alguna compañía; si son trabajos demasiado pequeños como para pedir cotización se debe calcular el costo. Si no se dispone del precio al mayoreo de las partes usadas se usará un 60% del precio al menudeo.

### Prueba de aceleración

Cada carro tendrá 2 carreras de 50 yardas en terreno plano tomando en cuenta el tiempo más bajo para la puntuación.

### Prueba de maniobrabilidad

Este evento es una prueba de agilidad y capacidad del vehículo para dar vueltas a baja y alta velocidad. El terreno de la pista es ligeramente rugoso tipo auto-cross. Cada vehículo tendrá derecho a dos carreras y se tomará en cuenta para la puntuación general el tiempo más bajo incluyendo las penalizaciones acumuladas por cada obstáculo derribado.

### Ascenso de colina

Es una prueba para la potencia del vehículo a baja velocidad. Cada vehículo tendrá dos oportunidades, empezando al pie de sendas colinas con velocidad cero. La puntuación de esta prueba va en proporción directa a la distancia recorrida en la colina y al tiempo empleado.

### Carrera de resistencia

Esta carrera dura 4 horas y se califica en base a las vueltas completadas por el vehículo. La pista tiene todo tipo de obstáculos (baches, piedras, zanjas) así como todo tipo de superficies (arena, rocas, lodo). Antes de la carrera los vehículos dan una vuelta de reconocimiento. El orden en que comienzan los vehículos está determinado por la puntuación obtenida en la prueba de aceleración, saliendo primero los de puntuación más alta.

## **DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD<sup>1</sup>**

Los siguientes dispositivos de seguridad no afectan substancialmente a la estructura, pero deben cumplirse para poder participar en las pruebas dinámicas. A éstos se agregan aquéllos mencionados en los capítulos 1 y 3.

- **Sistema de combustible:** Debe prevenirse mecánicamente que los tapones puedan aflojarse debido al movimiento. Los tapones deben prevenir escurrimientos si el vehículo está volteado, además de que el tanque debe contar con una línea de ventilación con el mismo objetivo. Sólo se permite un tanque. Las tuberías con combustible deben estar lejanas a orillas filosas.
- **Combustible:** Es proporcionado por los organizadores de la competencia.
- **Seguros:** Todos los seguros en los sistemas de dirección, suspensión, frenos y sujeciones del conductor deben ser cautivos, lo que implica que deben usarse tuercas de seguridad, arandelas de presión, tuercas dobles, etc.

---

<sup>1</sup>Esto es tan sólo un resumen de aquellos dispositivos no mencionados anteriormente, pero no debe usarse como referencia si se quiere competir. Para ello es necesario revisar profundamente el reglamento vigente que dan a conocer los organizadores, el cual puede variar año con año.

- **Guardas:** Todos los componentes móviles del tren motriz deben tener guardas para prevenir lesiones al conductor o a observadores en caso de falla de los componentes. Deben estar hechas con placas de acero 1010 con espesor mínimo de 0.060 pulgadas. También deben impedir que un dedo pueda quedar atrapado por el tren motriz.
- **Bandera:** Debe colocarse una bandera de aviso color naranja a una altura de 7 a 8 pies del piso. La punta debe estar redondeada.
- **Medidas generales:** Todas las instalaciones y construcciones están sujetas a la aprobación de los oficiales de seguridad, los cuales pueden solicitar modificaciones si lo creen necesario. Para facilitar la inspección pueden solicitarse planos mostrando los dispositivos de seguridad. Cualquier vehículo que sea considerado inseguro no podrá participar en las pruebas de desempeño. Los primeros seis lugares de la prueba de resistencia serán inspeccionados nuevamente.
- **Requerimientos del piloto:** Todos los conductores deben usar casco clase Snell M-85, SA-85, M-90 o SA-90. También deben usarse *goggles* o protección para la cara de material transparente y resistente a impactos. La ropa debe incluir pantalones largos, calcetines, zapatos, guantes y una prenda de manga larga. Todo esto debe usarse mientras el conductor opere el vehículo. Se prohíbe el consumo de alcohol o sustancias controladas.

## ANEXO 2

## RESULTADOS DE LA COMPETENCIA

Pruebas Estáticas

	Lugar	Puntos
• Diseño Mecánico y Seguridad		57.24 de 100
√ Estética (Apariencia, calidad aparente y mano de obra)	33	
√ Dispositivos estructurales (Colocación de miembros estructurales, uso de refuerzos, selección de materiales)	20	
√ Producción en masa (Estandarización de partes, simplicidad, uso de métodos convencionales de manufactura)	8	
√ Innovación (Uso de diseños, materiales y conceptos nuevos o mejorados)	15	
• Presentación de ventas de ingeniería	9	74.33 de 100
• Costo	47	34.20 de 100
• Seguridad <sup>2</sup>	50	98 de 100
<b>TOTAL →</b>	<b>37</b>	<b>263.77 de 400</b>
		<i>(El primer lugar tuvo 326.41 puntos)</i>

Pruebas Dinámicas

• Maniobrabilidad	13	66 de 100
• Aceleración	25	69.46 de 100
• Ascenso de colina	33	30.37 de 100
• Carrera de resistencia	10	305 de 400
<b>TOTAL →</b>	<b>10</b>	<b>470.83 de 700</b>
		<i>(El primer lugar tuvo 623.57 puntos)</i>

**TOTAL GENERAL → 11 734.60**  
*(El primer lugar tuvo 916.28 puntos)*

<sup>2</sup>Este fue un bono de 100 puntos (sobre el total de 1000 de la competencia) que podía aumentar o disminuir de acuerdo a los aciertos o fallas en las medidas de seguridad.

De 63 vehículos inscritos: 5 no llegaron a la competencia  
5 no pasaron las pruebas estáticas  
4 no pudieron competir en la carrera final  
8 dieron menos de 5 vueltas en la carrera final (el ganador dio 42)

De los 15 vehículos mexicanos inscritos ocupamos el tercer lugar.

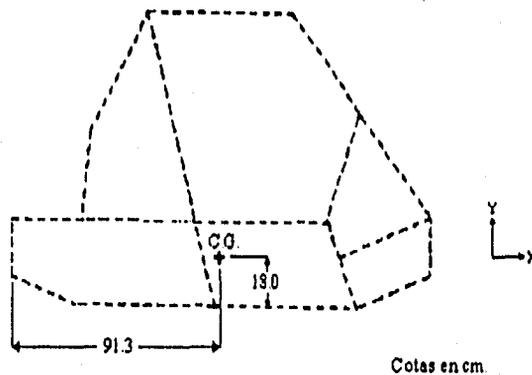
Cabe resaltar la importancia de la carrera final de resistencia. Nuestro equipo pasó en la tabla general del lugar 26 al 11 gracias al buen resultado en esa prueba.

## ANEXO 3

## CENTRO DE GRAVEDAD DEL VEHÍCULO

En el siguiente dibujo se muestra la posición del centro de gravedad del vehículo respecto a la estructura. Para determinar ese punto se consideraron la ubicación y la masa de los siguientes componentes: estructura (tubería y láminas), suspensión, llantas, dirección, motor, caja de la transmisión y piloto.

NOTA: Únicamente se muestra la vista lateral ya que el centro de gravedad se encontraba en el plano de simetría del vehículo.



Gracias a su posición relativamente baja, el vehículo podía tener inclinaciones respecto al eje X de  $76.7^\circ$  y respecto a Z de  $72.4^\circ$  sin voltearse; esto le daba gran estabilidad y pocas posibilidades de volcadura durante la competencia ya que las pendientes más fuertes a las que estuvo sometido fueron cercanas a los  $60^\circ$ .

## **BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Metals, Metals handbook, E.U.A., 1987, tomo 14
- Bosch, Automotive handbook, Alemania, 1986, (2a. ed.)
- DEUTSCHMAN, Aaron, Diseño de máquinas, México, Ed. C.E.C.S.A., 1989
- DIETER, George E., Engineering Design, Reino Unido, Ed. McGraw-Hill, 1987
- -----, Mechanical metallurgy, Reino Unido, Ed. McGraw-Hill, 1988
- JOHNSON, Olat, Diseño de máquinas herramienta, México, Ed. Roble, 1973
- KALPAKJIAN, Serope, Manufacturing processes for engineering materials, E.U.A., Ed. Addison-Wesley, 1991, (2a. ed.)
- RACZYNSKI, Stanislaw, Memorias del Simposium Simulación por computadora en ingeniería industrial y en los problemas de desarrollo urbano, México D.F., U.P.-S.C.S., 1992
- Reglamento de competencia Mini Baja West 1994
- S.A.E., Student action in engineering, Otoño 1993, E.U.A.
- SCHEY, John, Introduction to manufacturing processes, Japón, Ed. McGraw-Hill Kogakusha, 1977
- Sociedad de Ingenieros Automotrices, S.A.E., 25 años en México, México, Revista Auge en México, 1990.
- Swanson Analysis Systems, ANSYS Primer for stress analysis, E.U.A., 1989
- ZAHAVI, Eliahu, The finite element method in machine design, E.U.A., Ed. Prentice Hall, 1992