



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MASA SOPORTE EN FIBRA DE  
CARBONO PARA UN VEHÍCULO MINI-BAJA**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL  
GRADO DE: INGENIERO MECÁNICO**

**PRESENTA:**

**EFRÉN MONSALVO BARRERA  
JAFET CORTÉS RICO**

**TUTOR:  
ING. ARMANDO SÁNCHEZ GUZMÁN**

**2012**

## ÍNDICE

Portada -----	1
Índice -----	2
Introducción -----	3
Objetivo de la tesis -----	4
Antecedentes y descripción de la categoría <i>SAE</i> Mini-Baja -----	4
Descripción de la tesis -----	6
Capítulo 1. La fibra de carbono y sus aplicaciones -----	7
Capítulo 2. Fabricación de piezas (métodos industriales y tradicionales) de fibra de carbono -----	24
Capítulo 3. Diseño de una masa soporte delantera para un vehículo Mini-Baja -----	32
3.1 Identificación de la necesidad -----	33
3.2 Definición del problema -----	36
3.3 Propuesta de elaboración de una masa soporte hecha de fibra de carbono -----	38
3.4 Análisis de la propuesta -----	42
3.4.1 Comparación de esfuerzos de trabajo de las masas -----	44
3.5. Resultados -----	51
3.6 Costos -----	56
Conclusiones y trabajo a futuro -----	59
Apéndice A. Plano de dimensiones de la masa soporte delantera -----	61
Apéndice B. Cálculos para la cantidad de componentes del material compuesto -----	62
Bibliografía -----	64
Documentos electrónicos -----	66

## INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos pueden ser utilizados en diversas industrias debido a sus altas relaciones de esfuerzo y rigidez con respecto al peso; sin embargo, éstos son usualmente débiles bajo cargas de impacto [1].

En la industria automotriz es importante disminuir el peso del vehículo, que le permita un consumo de combustible eficiente y una respuesta de aceleración más rápida, pero que sea resistente en condiciones adversas.

En los vehículos Mini-Baja es común el impacto lateral en la masa soporte delantera debido a diferentes factores, normalmente inevitables, durante competencias y demostraciones.

Dicha fuerza ha ocasionado que ésta pieza falle. Por lo tanto, en este trabajo se presenta un diseño de la masa soporte delantera de un vehículo Mini-Baja en material compuesto reforzado con fibras continuas de carbono. Con la finalidad de que se construya un vehículo *off-road* de menor peso, pero resistente a cualquier condición de competencia, que incremente la probabilidad de triunfo en la categoría *SEA* Mini-Baja.

El diseño de la pieza, mencionada anteriormente, se basa en los diseños hechos por el equipo Baja de la UNAM, manufacturados de acero, y se complementa mediante la teoría de materiales compuestos reforzados con fibras.

Debido a que no se dispone con equipos de instrumentación para evaluar el diseño de manera experimental, se compara el esfuerzo de trabajo con la resistencia de fluencia de cada propuesta estableciendo ciertas hipótesis que simplifican el problema.

## **Objetivo de la Tesis.**

El objetivo de esta tesis es **realizar una propuesta de diseño de masa soporte delantera en fibra de carbono-epóxico para un vehículo Mini-Baja.**

Los alcances de este trabajo son los siguientes:

- Especificaciones de la fibra de carbono en aplicaciones ingenieriles.
- Análisis y síntesis descritos sobre la teoría de materiales compuestos reforzados con fibras continuas de carbono.
- Cálculos para definir la cantidad de componentes de la masa soporte en fibra de carbono-epóxico.
- Comparación del material propuesto con acero y aluminio.
- Estimación de costos.

## **Antecedentes y descripción de la categoría SEA Mini-Baja.**

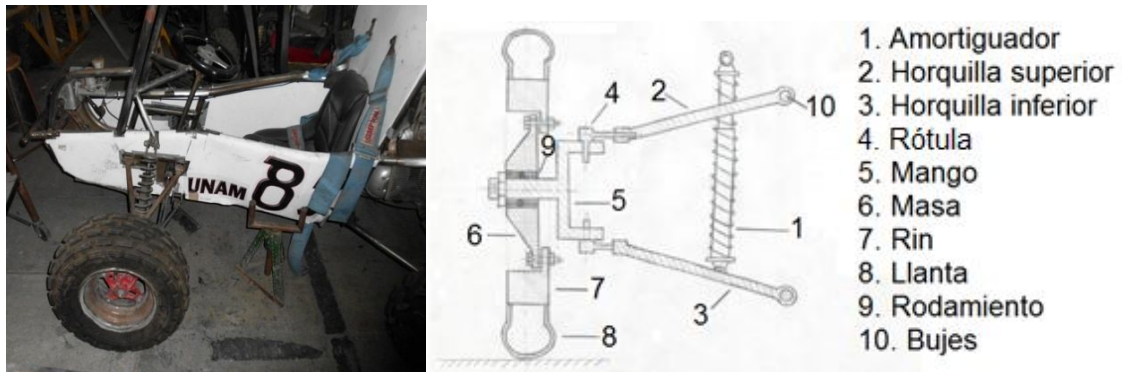
La *SAE (Society of Automotive Engineers)* es una sociedad no lucrativa donde sus miembros, profesionistas de diversas disciplinas de la ingeniería, comparten intereses comunes en el desarrollo de tecnología para el movimiento en aire, agua, tierra y espacio para servir a la humanidad [2].

La categoría *SAE Mini-Baja* es un proyecto internacional que consiste en competencias entre universidades cuyo objetivo es diseñar, construir, probar y promocionar un vehículo monoplaza de tipo *off-road* capaz de resistir pruebas extremas de camino.

Los vehículos tipo Mini-Baja deben desempeñarse de manera óptima en cada una de las pruebas que lo exigen al máximo. Por esta razón, su proceso de construcción es fundamental para que el vehículo pueda participar satisfactoriamente en las competencias Baja SAE.

En éstas competencias es común el derrape de los vehículos debido a las condiciones de las pistas. En consecuencia, los vehículos chocan, tanto con otros vehículos como con objetos que se encuentran fuera de la pista, en diferentes partes y piezas de éste.

Durante la competencia, los vehículos chocan, comúnmente, de manera lateral en la masa soporte delantera, el cual es un componente mecánico que conecta el sistema rin-llanta con el sistema de suspensión mostrado en la siguiente figura.



**Figura 1** Ubicación de la masa soporte delantera [14].

Comúnmente, la Coordinación de la Escudería Puma UNAM, manufactura la masa soporte de acero *AISI* 1015 (acero de bajo carbono) o aluminio 1150. Estos aceros contienen 0.15% de carbono en su aleación y son fácilmente deformables y maquinables; en una palabra son muy fáciles de manufacturar. El aluminio 1150 es una aleación con 99.50% mínimo de pureza de aluminio y algunas de sus características importantes son su maquinabilidad y su baja densidad, que es como una tercera parte de la del acero [4].

La energía asociada con los choques provoca fallas que generan deformación en la masa soporte que afecta el desempeño del vehículo y se pierde tiempo en el cambio de la pieza. Por lo que afecta el desempeño en la competencia.

## **Descripción de la tesis.**

El siguiente trabajo se organiza en cuatro capítulos. En el capítulo uno se realiza una breve revisión bibliográfica acerca de los antecedentes de la fibra de carbono y algunas de sus aplicaciones.

En el capítulo siguiente, se habla de los procesos tradicionales e industriales de manufactura en compuestos termofijos.

En el tercer capítulo, se propone el diseño de una masa soporte delantera de fibra de carbono, planteando los siguientes puntos:

- 1) Se define el problema e identifican las necesidades.
- 2) Se presenta un método para elaborar la pieza en material compuesto reforzado con fibras continuas.
- 3) Se analizan los esfuerzos de trabajo de las diferentes propuestas y se comparan con sus resistencias de fluencia.
- 4) Se calculan los costos de materia prima en la elaboración de la masa soporte.

Por último, en el capítulo cuatro se dan las conclusiones finales de este trabajo de tesis.

## CAPÍTULO 1. LA FIBRA DE CARBONO Y SUS APLICACIONES

La palabra “filamento” es un término general para definir un objeto de longitud finita el cuál es mucho mayor que su diámetro, siendo éste típicamente de 0.1 mm. De este modo, la proporción entre la longitud y el diámetro del filamento es usualmente diez [5]. La fibra, mostrada en la figura 1, es un conjunto estandarizado de longitud indefinida que va desde los 3,000 hasta los 12,000 filamentos [6].



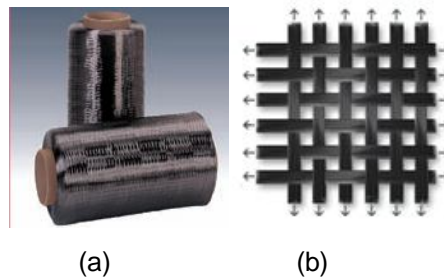
**Figura 1.1** Fibras de carbono estándar [7].

Hoy en día las principales fibras sintéticas son hechas de vidrio, aramida (Kevlar) y carbono. El vidrio es la fibra más utilizada debido a su bajo costo. Las fibras de aramida y de carbono tienen alta resistencia y baja densidad [8]. De estas, el carbono ofrece una gran variedad de fibras debido a la capacidad para controlar su estructura [6].

La fibra de carbono ha sido producida, inadvertidamente, de fibras de celulosa natural como algodón o lino durante miles de años. El primer registro propuesto para la transformación de celulosa a fibra de carbono fue por Thomas Edison en 1878. Edison convirtió algodón, y posteriormente tiras de bambú, en carbono para utilizarlas como filamentos en lámparas eléctricas incandescentes [9].

La fibra de carbono sintética se produce de fibras basadas en PAN (poliacrilonitrilo), rayón o brea [10]. Las formas de productos comerciales de fibra de carbono son: hilos de fibra discontinua de longitud entre 6 y 13 mm, hilos de fibra continua “*rovings*” enrollada en un tubo (figura 1.2a) e hilos

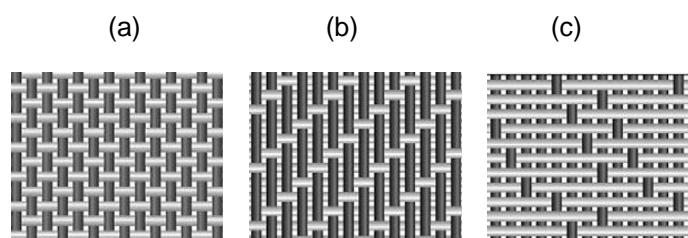
entretreídos (figura 1.2b) con fibra continua entrelazada 90° con respecto a la otra fibra [9].



**Figura 1.2** (a) hilos de fibras continuas o “rovings” (b) hilos entretreídos con fibras continuas [7].

Los tejidos más comunes utilizados en telas de fibra de carbono, mostradas en la figura 1.3, son:

- **Plain.** Es un tejido en el que cada hilo pasa por encima y por debajo del próximo (figura 1.3a). Esta construcción proporciona una tela reforzada ampliamente utilizada en aplicaciones generales y garantiza laminados de buen espesor. Este tipo de tela es muy estable, por lo que difícilmente se distorsiona [10].
- **Twill.** Es un tejido cruzado donde el número de hilos longitudinales, que pasan sobre los transversales y recíprocamente cambian, dando distintas construcciones de tejidos cruzados (figura 1.3b). Estos son fácilmente humedecidos por la resina [10].
- **Satin.** En estas telas el entretreído es similar al *Twill*, aunque el número de hilos longitudinales y transversales que pasan recíprocamente por encima y por debajo es mayor (figura 1.3c). Por lo tanto, un lado del tejido se construye principalmente con fibras longitudinales y el otro lado con transversales. Tiene un excelente acabado superficial, similar al satín, de allí su nombre [10].



**Figura 1.3** Tejidos más comunes utilizados en telas de fibra de carbono [10].



Debido a las pequeñas dimensiones en la sección transversal de las fibras, no son directamente utilizadas en aplicaciones ingenieriles. Por lo tanto, son integradas a otros materiales para formar materiales compuestos [5].

Según Bhagwan [5], los compuestos pueden ser considerados materiales que consisten de dos o más componentes químicamente distintos, en una macroescala<sup>1</sup>, teniendo una interface<sup>2</sup> bien definida entre ellos.

Los compuestos consisten de una o más fases discontinuas, integradas en una fase continua. La fase discontinua, llamada el reforzamiento o material reforzante, es usualmente más dura y fuerte que la fase continua denominada matriz. La matriz sirve para sujetar, transferir cargas y proteger a las fibras de ataques ambientales y daños debido a su manipulación [9].

Las propiedades del compuesto dependen de las propiedades de sus componentes que interactúan de forma sinérgica [5]. Las matrices más comunes para compuestos reforzados con fibras son de materiales poliméricos [9] y son descritas en el siguiente capítulo. Además, es necesario especificar la concentración, tamaño, distribución, orientación y geometría del reforzamiento para clasificar a los materiales compuestos reforzados con fibra como se muestra en la figura 1.4 de la siguiente página.

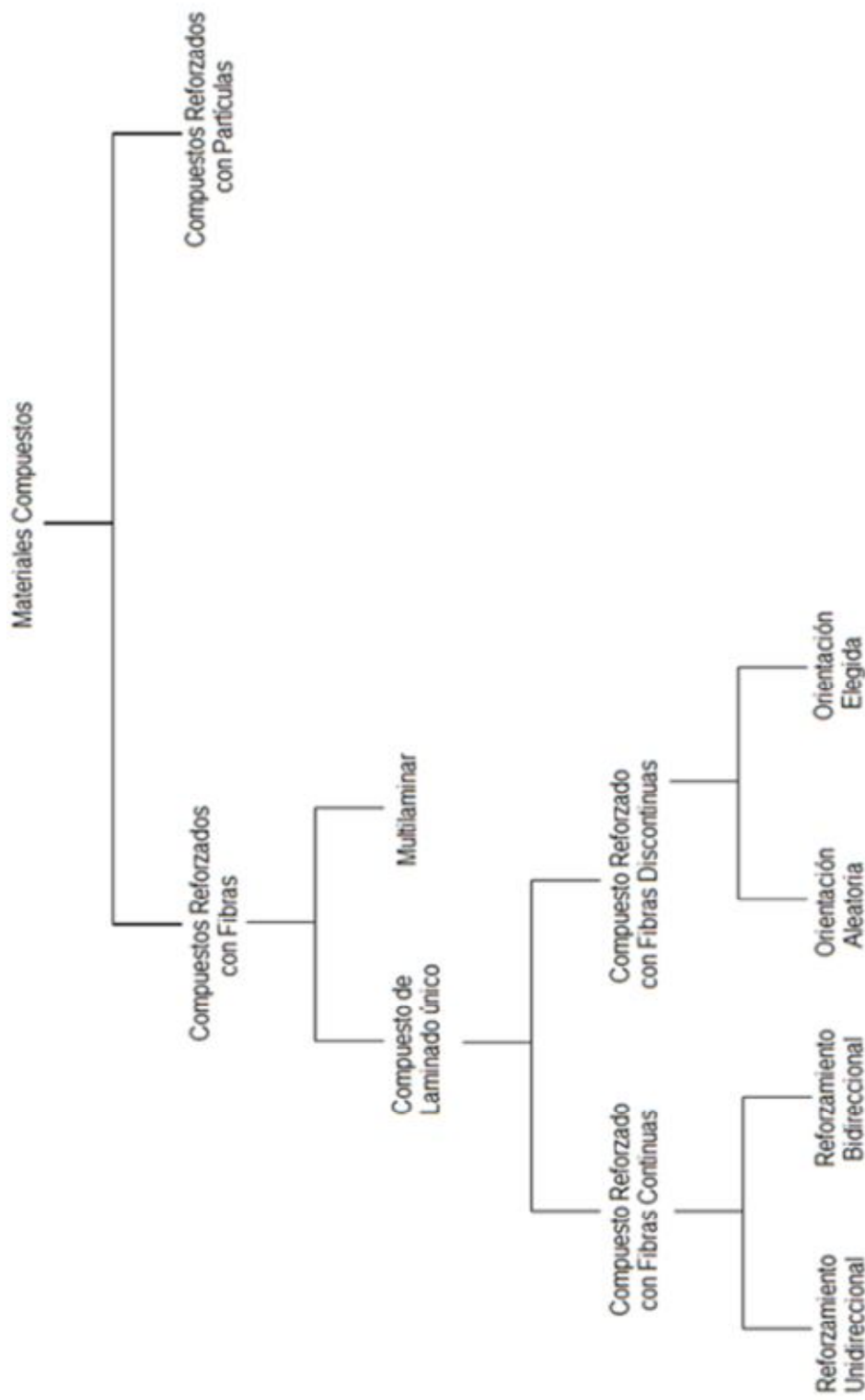
La contribución de los componentes en las propiedades del compuesto se determina mediante la concentración de las fases y se mide mediante la fracción de volumen o la fracción de peso, definidas posteriormente en las ecuaciones 1 y 2 de la página 16.

El tamaño y distribución, además de controlar la textura y homogeneidad del material, determinan, junto con la fracción de volumen, la interface entre las fases del compuesto.

---

<sup>1</sup> El nivel macroestructural es, aproximadamente, mayor o igual que  $10^{-2}$  cm [8].

<sup>2</sup> La interface en compuestos es el área de contacto entre sus componentes [7].



**Figura 1.4** Esquema de clasificación general de materiales compuestos reforzados con fibras [5].

La interface juega un papel importante en las propiedades del compuesto. El área de contacto de las fibras depende de sus dimensiones y acabado superficial [7]. Por lo tanto, la interface de un compuesto se determina mediante el área de contacto superficial entre la fibra y la matriz. Esta unión interfacial es un factor importante y es responsable de transferir la carga desde la matriz a las fibras, las cuales contribuyen en mayor porción en los esfuerzos del compuesto [5].

La orientación del reforzamiento afecta la isotropía del compuesto. Por ejemplo, cuando el reforzamiento es en forma de partícula, con todas sus dimensiones aproximadamente iguales, el compuesto se comporta, esencialmente, como un material isotrópico, cuyas propiedades son independientes de la dirección [5].

La geometría del reforzamiento se describe por su tamaño y forma, la cual puede ser aproximada como esferas o cilindros, contribuye en las propiedades del compuesto.

Los compuestos reforzados con hilos continuos son llamados compuestos reforzados con fibras continuas y de acuerdo al objetivo de este trabajo estos compuestos son el interés principal.

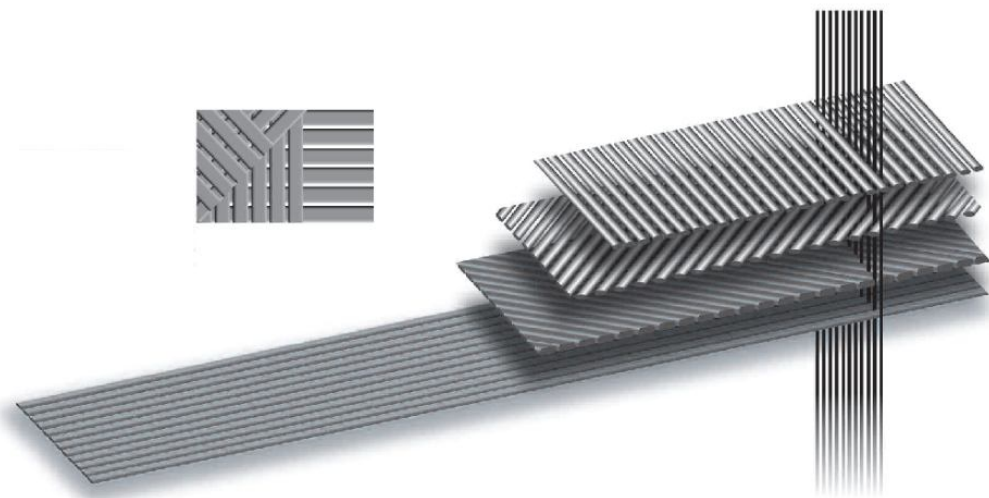
Los defectos en forma de grieta que se hallan perpendicularmente a la dirección de la carga aplicada son particularmente perjudiciales para los esfuerzos en el material. Dichos defectos no se propagan a lo largo de la longitud de las fibras cuando existe una adecuada unión interfacial entre las fibras y la matriz [5]. Por lo tanto, las fibras tienen mejores propiedades a lo largo de su longitud ya que los defectos son reducidos por las pequeñas dimensiones de la sección transversal de la fibra.

Los compuestos reforzados con fibras pueden ser clasificados como compuestos de laminado único o multilaminar. Los compuestos de "lámina única" pueden ser hechos de distintas láminas, una respecto a la otra, pero teniendo la misma orientación y las mismas propiedades. De esta manera la lámina entera puede ser considerada como un compuesto de lámina única.

Cuando los componentes en cada lámina del compuesto unidireccional son los mismos pueden ser referidos como capa, laminado o lámina.

La mayoría de los compuestos utilizados en aplicaciones estructurales son multilaminares, es decir, son compuestos reforzados con fibras que consisten de varias láminas. Cada lámina está hecha usualmente del mismo componente, pero cada una puede diferir de la siguiente en (1) volumen relativo de los componentes, (2) reforzamiento utilizado y (3) orientación de las fibras.

Cada lámina es típicamente de 0.1 mm de espesor [5], y por lo tanto, no puede ser utilizada directamente. Varias láminas unidireccionales pueden ser apiladas en una secuencia de orientación específica para fabricar un compuesto con ciertas propiedades, como se muestra en la figura 1.5.



**Figura 1.5** Laminado con secuencia específica de orientación [10].

La tabla 1 muestra los diferentes tipos de laminados para compuestos reforzados con fibras continuas unidireccionales. Donde  $\theta$  representa un determinado ángulo de orientación de las fibras que varía de 0 a 90 grados con respecto al “cero de referencia” del laminado inicial.

Tabla 1. Tipos de laminados para compuestos reforzados con fibras unidireccionales [11].

Tipo de laminado	Ángulo de orientación de la fibra
Laminado unidireccional	$\dots\theta / \theta / \theta / \theta\dots$
Laminado de apilamiento en ángulo	$\dots+\theta / -\theta / +\theta / -\theta\dots$
Laminado perpendicular	$\dots0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ\dots$
Laminado simétrico	$\dots0^\circ / +\theta / -\theta / -\theta / +\theta / 0^\circ\dots$
Laminado cuasi-isotrópico	$\dots0^\circ / 90^\circ / +\theta / -\theta / -\theta / +\theta / 90^\circ / 0^\circ\dots$

En la figura 1.6 se muestran los laminados cuasi-isotrópico y unidireccional. En el laminado cuasi-isotrópico el ángulo variable de orientación de la fibra es normalmente de 45 o 60 grados [11].

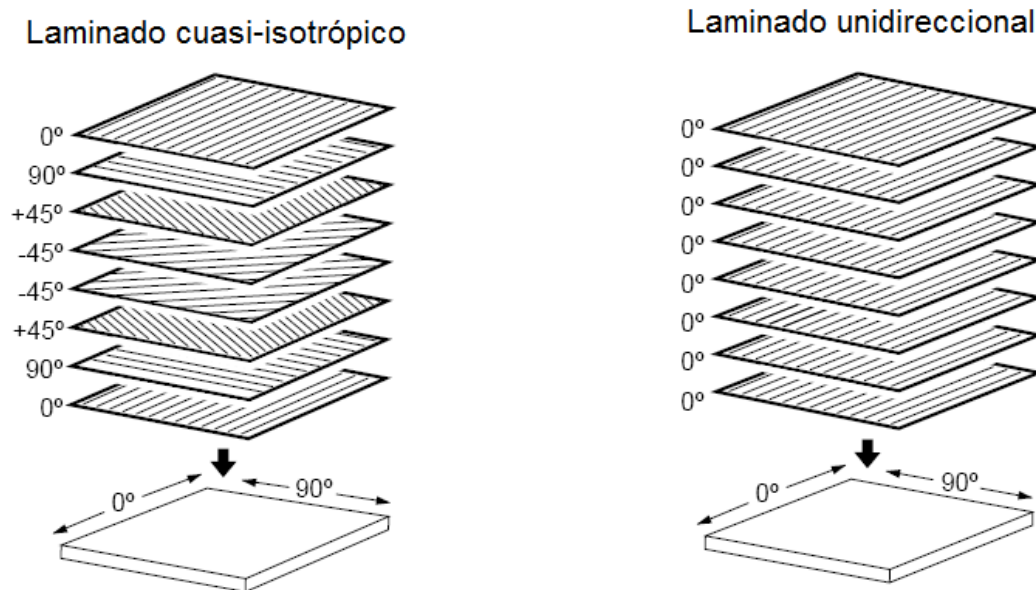
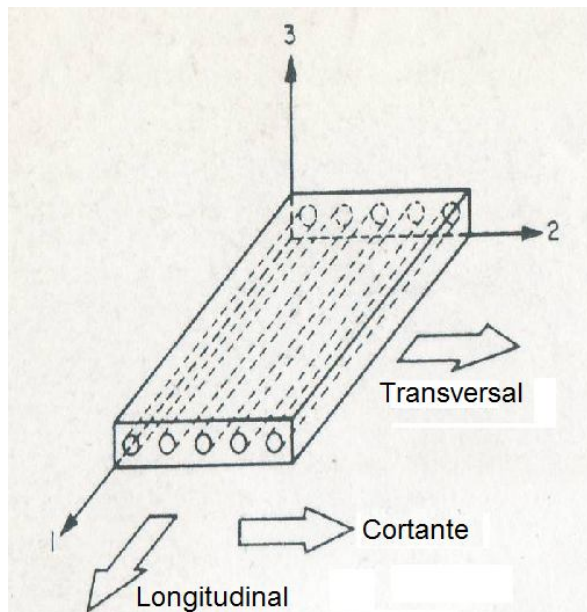


Figura 1.6 Laminados cuasi-isotrópico y unidireccional [10].

La característica sobresaliente de los compuestos de fibras continuas orientadas en diferentes ángulos es que las propiedades deseadas en diferentes direcciones pueden ser fácilmente variadas.

El reforzamiento continuo en un laminado único puede estar orientado en diferentes direcciones para proporcionar ciertas propiedades en el compuesto. El reforzamiento bidireccional o de tela entretrejida puede ser colocado en una lámina única en direcciones mutuamente perpendiculares y puede ser tal que el esfuerzo en dos direcciones perpendiculares sean aproximadamente iguales.

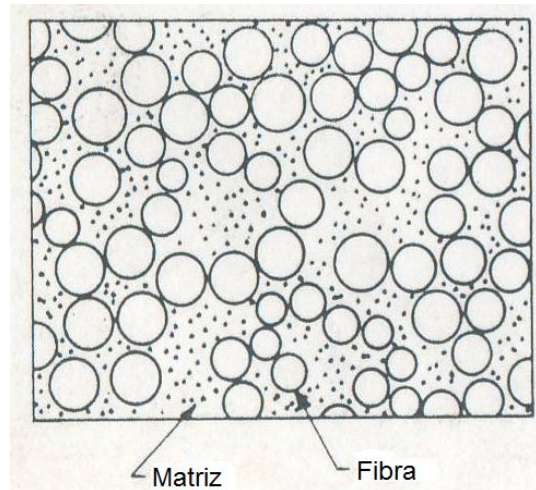
Las láminas de un sistema fibra-resina presentan, en general, comportamiento ortotrópico [12] con respecto a tres planos de simetría. Estos planos coinciden con los ejes 1, 2 y 3 mostrados en la figura 1.7. La dirección paralela a las fibras es llamada la dirección longitudinal (eje 1). La dirección perpendicular a las fibras es llamada la dirección transversal (cualquier dirección en el plano 2-3).



**Figura 1.7** Representación esquemática de un compuesto unidireccional [5].

Un laminado presenta mejores propiedades en la dirección longitudinal y el comportamiento en las otras dos direcciones es aproximadamente el mismo. Por lo tanto, el laminado puede ser considerada transversalmente isotrópico, es decir, isotrópico en el plano 2-3.

Un esquema típico de un laminado fibra-resina en su sección transversal es ilustrada en la figura 1.8. En ésta figura, las fibras están distribuidas aleatoriamente y pueden estar en contacto con otras fibras en algunos lugares.



**Figura 1.8** Diagrama esquemático de la sección transversal de un laminado fibra-resina mostrando una distribución aleatoria de las fibras [5].

Todos los métodos de diseño involucran una comparación entre el esfuerzo real y el esfuerzo admisible del material utilizando un criterio de falla. La dirección del esfuerzo principal no tiene significado para materiales isotrópicos.

El campo del esfuerzo real es obtenido mediante un análisis de carga sobre una lámina. El campo de esfuerzo admisible depende de los esfuerzos en las direcciones principales.

Uno de los factores más importantes que determinan las propiedades del compuesto es la proporción relativa entre la matriz y el material reforzante. Esta proporción puede ser por la fracción de peso o por la fracción de volumen.

La fracción de peso es fácil de obtener durante la fabricación o por uno de los métodos experimentales después de la fabricación. Sin embargo, la fracción de volumen es exclusivamente utilizada en el análisis teórico de materiales compuestos.

De este modo, es deseable que las expresiones de conversión entre la fracción de peso y la fracción de volumen sean prácticas. Estas expresiones son derivadas para un material de dos fases.

Un compuesto unidireccional puede ser modelado considerando las fibras continuas y paralelas a lo largo del compuesto, además de ser uniformes en propiedades y diámetros. Se debe considerar una perfecta unión entre las fibras y la matriz para que no ocurra un deslizamiento en la interface y en condiciones de isodeformación, es decir, que la deformación  $\epsilon$  experimentada por la fibra, matriz y compuesto, son iguales como se muestra posteriormente en la ecuación 5 de la página 17.

Considere el volumen de un material compuesto  $v_c$  que consiste del volumen de las fibras  $v_f$  y el volumen de la matriz  $v_m$ . Representando  $w_c$ ,  $w_f$  y  $w_m$  a los pesos correspondientes al compuesto, fibras y matriz. Denotando la fracción de volumen y fracción de peso por las letras mayúsculas  $V$  y  $W$ , respectivamente.

La fracción de volumen y la fracción de peso están definidas como:

$$V_f = v_f / v_c, \quad V_m = v_m / v_c \quad (1)$$

Donde  $v_c = v_f + v_m$ , y

$$W_f = w_f / w_c, \quad W_m = w_m / w_c \quad (2)$$

Donde  $w_c = w_f + w_m$ .

La conversión entre la fracción de peso y la fracción de volumen puede ser obtenida considerando la definición de fracción de peso y sustituyendo en los pesos por los productos de densidad y volumen como:

$$W_f = (\rho_f / \rho_c) V_f, \quad W_m = (\rho_m / \rho_c) V_m \quad (3)$$



Las relaciones inversas son:

$$V_f = (\rho_c / \rho_f) W_f, \quad V_m = (\rho_c / \rho_m) W_m \quad (4)$$

Donde  $\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$ .

Cabe señalar que la densidad del compuesto calculada teóricamente por la ecuación 3, no siempre coincide con la densidad determinada experimentalmente. Esto se esperará cuando espacios vacíos están presentes en el compuesto. La diferencia en densidades indica el contenido de espacios vacíos y puede afectar significativamente algunas de las propiedades mecánicas del compuesto.

Según Bhagwan [5], si el resultado en el cálculo de contenido de espacios vacíos<sup>3</sup> es mayor a 5% es un compuesto “mal hecho” y significa una menor resistencia a la fatiga, mayor susceptibilidad a la penetración de agua y una variación en esfuerzos. Sin embargo, un buen compuesto debe tener menos del 1% de espacios vacíos.

Para condiciones de isodeformación y suponiendo una buena unión entre las capas del compuesto:

$$\epsilon_f = \epsilon_m = \epsilon_c \quad (5)$$

Si la fibra y la matriz se comportan de manera elástica, los esfuerzos son, respectivamente:

$$\sigma_f = E_f \epsilon_f, \quad \sigma_m = E_m \epsilon_m \quad (6)$$

---

<sup>3</sup> La ecuación de la fracción de volumen de espacios vacíos en materiales compuestos se puede consultar en la bibliografía [5], pag.20.

Los esfuerzos actúan sobre el área de sección transversal de las fibras y la matriz. De este modo, la carga total soportada por el compuesto es la suma de las cargas soportadas por la fibra y la matriz. La carga total causa un esfuerzo promedio que actúa sobre el área total en la sección transversal del compuesto. De esta manera:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (7)$$

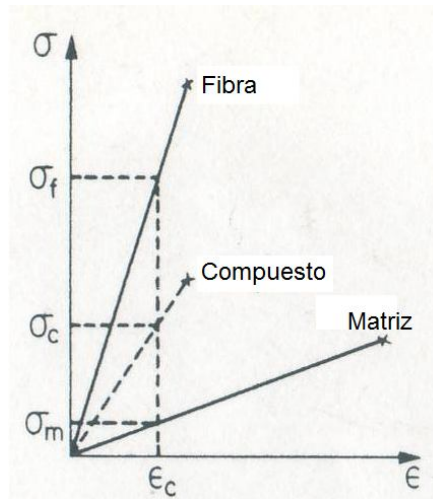
La ecuación (7) puede ser derivada con respecto a la deformación. Donde  $(d\sigma/d\epsilon)$  representa la pendiente del correspondiente diagrama esfuerzo-deformación (figura 1.9) en la deformación dada. Si la curva del esfuerzo-deformación del material es lineal, la pendiente  $(d\sigma/d\epsilon)$  es constante y puede ser sustituida por el módulo elástico  $E$  correspondiente. De este modo:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (8)$$

Donde  $E_c$ ,  $E_f$  y  $E_m$  representan el módulo elástico del compuesto, fibra y matriz, respectivamente.

Las ecuaciones (7) y (8) indican que la contribución de las fibras y la matriz en las propiedades promedio del compuesto son proporcionales a su fracción de volumen.

La ecuación (8) puede ser explicada considerando que la fibra y matriz tienen curvas lineales en un diagrama esfuerzo-deformación (figura 1.9), es decir, se comportan de manera elástica [12] hasta su rotura [5].



**Figura 1.9** Diagrama esfuerzo-deformación longitudinal para compuestos teóricos [5].

La predicción en los resultados de las ecuaciones (7) y (8) son aproximados y concuerdan con los resultados experimentales cuando la carga aplicada es de tracción. Sin embargo, cuando la carga aplicada es de compresión, los valores experimentales pueden desviarse de las predicciones teóricas.

Esto puede ser atribuido al hecho de que el comportamiento de las fibras en el compuesto sometido a cargas de compresión es análogo al comportamiento de columnas sobre una base elástica. De este modo la respuesta del compuesto para carga de compresión depende de las propiedades de la matriz. Esta observación es diferente a la respuesta del compuesto para cargas de tracción, la cuál es gobernada por la fracción de volumen de la fibra.

En un compuesto unidireccional sujeto a carga de tracción longitudinal incrementándose, la falla comenzará por la rotura de la fibra en su sección transversal más débil. Como la carga se incrementa, más fibras se rompen de manera aleatoria, causando una rotura completa en el compuesto [5].

La interface de fibras rotas puede llegar a ser separada por la concentración de esfuerzos en los extremos de la fibra y de este modo puede contribuir a la separación del compuesto en una sección transversal dada.

Por lo tanto, un compuesto unidireccional puede fallar bajo carga de tracción longitudinal de tres modos. Estos modos son (1) falla frágil<sup>4</sup> del compuesto, (2) falla frágil del compuesto con desprendimiento de fibras y (3) falla frágil del compuesto y (a) separación de los componentes o (b) falla de la matriz [5].

El desprendimiento de las fibras de la matriz depende de la fuerza de unión y del mecanismo de transferencia de carga de la matriz a la fibra. Los compuestos que tienen baja fracción de volumen de fibra ( $V_f < 0.4$ ) exhiben, en su mayoría, el modo de falla (1). Los compuestos con fracción de volumen de fibra intermedia ( $0.4 < V_f < 0.65$ ) exhiben el modo de falla (2). Y finalmente, los compuestos con fracción de volumen de fibra alta ( $V_f > 0.65$ ) exhiben el modo de falla (3a).

Cuando los compuestos reforzados con fibras continuas son sujetos a cargas de compresión las fibras actúan como columnas largas y puede colapsar. En compuestos de baja fracción volumétrica de fibra, el colapso de las fibras puede ocurrir aún cuando el esfuerzo en la matriz este en el rango elástico. Sin embargo, para fracción de volumen de fibra en la práctica ( $V_f > 0.4$ ), el colapso de la fibra, generalmente es precedido por la fluencia de la matriz, por la separación de los componentes o por la fractura de la matriz.

La falla de un compuesto unidireccional sujeto a carga de compresión en la dirección de la fibra puede ser iniciada por la fractura transversal de las fibras. En otras palabras, la fuerza de tracción transversal, por el efecto de la relación de Poisson [13], puede exceder la capacidad del último esfuerzo transversal del compuesto resultando en fracturas de la interface.

---

<sup>4</sup> Los materiales frágiles se caracterizan por el hecho de que la rotura se presenta sin cambio apreciable en la razón de alargamiento. Así, para materiales frágiles no hay diferencia entre la resistencia final y la resistencia de rotura [13].

Los modos de falla en compuestos sujetos a carga de compresión longitudinal puede ser de las siguientes maneras: (1) falla de tracción transversal, (2) fibras colapsadas (a) con el esfuerzo de la matriz aún en el rango elástico, (b) precedido por la fluencia de la matriz y (c) precedido por la separación de los componentes, y (3) falla por esfuerzo cortante.

Con base en la teoría anterior, los materiales compuestos se han establecido completamente como materiales ingenieriles y actualmente son bastante comunes en todo el mundo.

Las primeras aplicaciones fueron durante la Segunda Guerra Mundial para aplicaciones comerciales en gran escala, principalmente en la industria marítima. Hoy día, industrias tales como la aérea, automotriz, deportiva y electrónica son bastante dependientes de compuestos reforzados con fibra [11].

Los materiales compuestos fueron utilizados por primera vez en la industria ferroviaria en 1970 [10]. Actualmente son utilizarlos en partes como techos, pisos, puertas y cabinas de conducción en metros y trenes urbanos (figura 1.10).



**Figura 1.10** Aplicación de compuestos en la industria ferroviaria [10].

La fibra de carbono es ampliamente utilizada en equipo deportivo recreativo en aplicaciones estructurales de bicicletas (figura 1.11), raquetas de tenis, cañas

de pescar, esquís, snowboards, palos de hockey y bates de béisbol por nombrar unos cuantos [10].



**Figura 1.11** Materiales compuestos utilizadas en piezas para bicicletas [10].

Debido a sus propiedades, la fibra de carbono es seleccionada para fabricar botes de competencia, automóviles de alto desempeño, herramientas y partes en vehículos de Formula 1 (figura 1.12) como habitáculo, horquillas, suspensiones, caja de cambios, etc. [10].



**Figura 1.12** Materiales compuestos utilizados en piezas para vehículos de Formula 1 [10].

Otras aplicaciones son en la industria energética y en la aeroespacial. En la industria energética se utiliza para fabricar alabes de turbinas eólicas (figura 1.13a) y con respecto a las aplicaciones aeroespaciales, se fabrican piezas para aviones, jets militares (figura 1.13b), helicópteros, satélites y vehículos espaciales [10].

(a)

(b)



**Figura 1.13** Materiales compuestos en (a) alabes de turbinas eólicas (b) jets militares [10].

La fibra de carbono en vehículos espaciales (figura 1.14) se utiliza en el *Sistema de Protección Térmica (TPS)* en el exterior del transbordador espacial. El cual protege el interior de la nave y a sus ocupantes de la alta temperatura (temperatura máxima en la superficie exterior de 1260 °C) durante la fase de reentrada desde el espacio a la atmósfera terrestre [14].



**Figura 1.14** La fibra de carbono utilizada en transbordadores espaciales como *TPS* [15].

En el siguiente capítulo, se mencionarán algunos procesos para fabricar piezas y partes de materiales compuestos.

## **CAPÍTULO 2. FABRICACIÓN DE PIEZAS (MÉTODOS INDUSTRIALES Y TRADICIONALES) DE FIBRA DE CARBONO**

La fase continua en los materiales compuestos, llamada matriz, puede ser de distintos materiales tal como metales, cerámicos, polímeros, etc. Para este trabajo se consideraran las matrices poliméricas, las cuáles pueden ser divididas en dos distintos tipos: termofijos y termoplásticos.

En términos de aplicaciones comerciales, las partes de compuestos con termofijos dominan el mercado y cerca del 75 % de todos los productos utilizan estas resinas como matrices [16]. Las resinas termofijas más utilizadas son epóxicas, fenólicas y poliamidas [10].

La resina epóxica tiene un excelente desempeño mecánico y buena resistencia al medio ambiente. La resina fenólica es resistente al fuego, de curado rápido y proceso económico. La resina de poliamida tiene excelente resistencia en temperaturas altas (>260 °C), resistencia a agentes químicos así como al fuego y a la radiación [10].

Estos materiales pueden ser sistemas de una parte (resina) o dos partes (resina-catalizador) y generalmente están en estado líquido a temperatura ambiente. El material inicial en termoplásticos está en estado sólido y necesita fundirse para obtener el producto final, además de requerir maquinaria específica para sus procesos de manufactura [16].

Las resinas termofijas son curadas<sup>5</sup> a temperaturas elevadas [16]. El curado estándar de estas resinas es de 90 minutos a 125 °C a una presión entre 80 y 500 kPa para sistema de resina sin catalizador [10].

---

<sup>5</sup> El curado es el endurecimiento de la resina por reacción química [17].



Para un sistema de resina-catalizador, por ejemplo el sistema *Epolite* 9935 de la marca *aircraftspruce* (figura 2.1), el curado es de 4 minutos a temperatura ambiente al agregarle el catalizador [18].

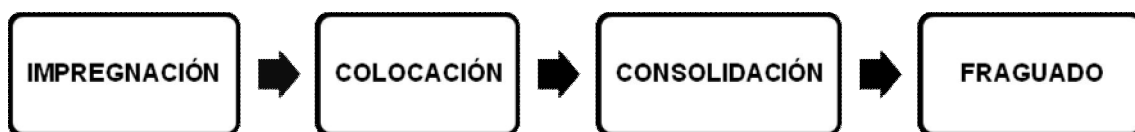


**Figura 2.1** Resina epóxica de dos partes *aircraftspruce* [18].

Los procesos de manufactura pueden ser subdivididos en dos categorías principales:

- 1) Procesos de manufactura para compuestos termofijos.
- 2) Procesos de manufactura para compuestos termoplásticos.

Los pasos básicos en los procesos de manufactura de compuestos [16] se muestran en el siguiente diagrama de flujo.



**Figura 2.2** Pasos básicos en los procesos de manufactura de compuestos [16].

En la impregnación las fibras y la resina son mezcladas para formar una lámina. El propósito de este paso es que la resina fluya completamente alrededor de todas las fibras. En el proceso, las láminas son colocadas hasta obtener el espesor deseado [16].

El paso de consolidación se asegura que todo el aire presente entre las láminas sea removido. Este es un paso importante para obtener una buena calidad en la pieza [16].

El paso final es el fraguado, el cual puede tomar menos de un minuto para termoplásticos hasta más de 120 minutos para termofijos [16]. Los parámetros de presión y tiempo establecidos para el fraguado son mantenidos durante periodos específicos y son proporcionados por el proveedor.

A continuación se describen algunos de los procesos de manufactura para compuestos termofijos reforzados con fibras.

- **Proceso de bolsa de vacío en autoclave.** En este proceso, mostrado en la figura 2.3, las telas de fibra son cortadas y colocadas en un molde en la secuencia deseada. Entonces, el compuesto con el molde se “embolsa” al vacío, para extraer el aire atrapado en el interior [8], y se coloca en un horno o autoclave aplicando presión y temperatura durante un periodo de tiempo para el curado y la consolidación de la pieza [16]. El ciclo típico durante el proceso de autoclave se muestra en la figura 2.4.

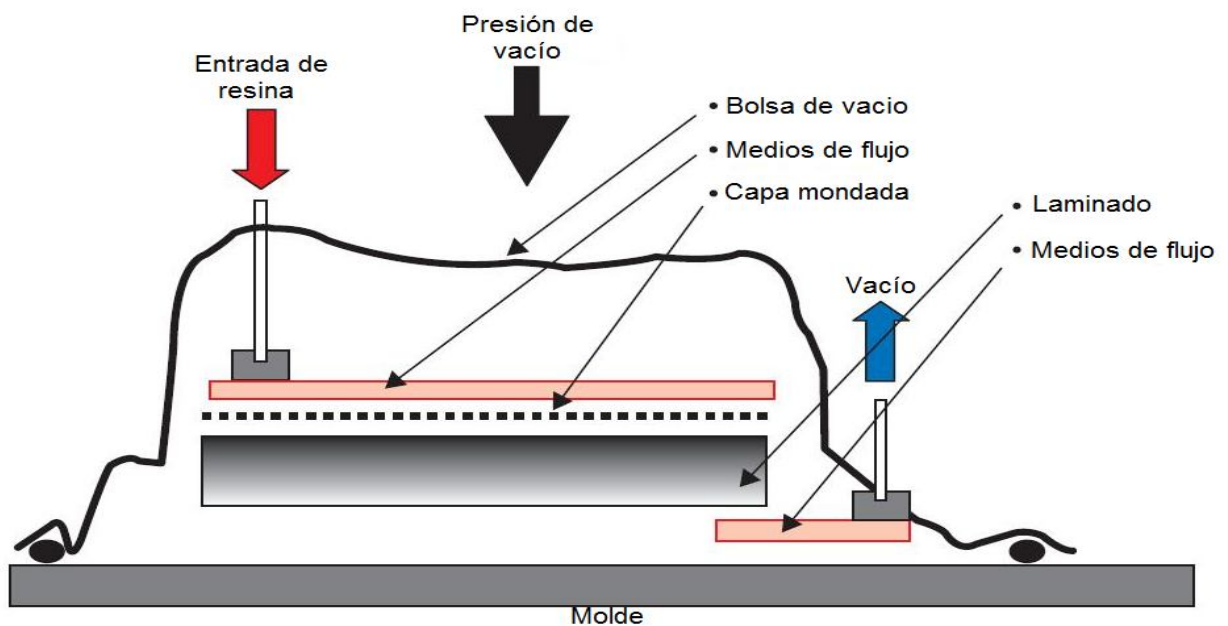
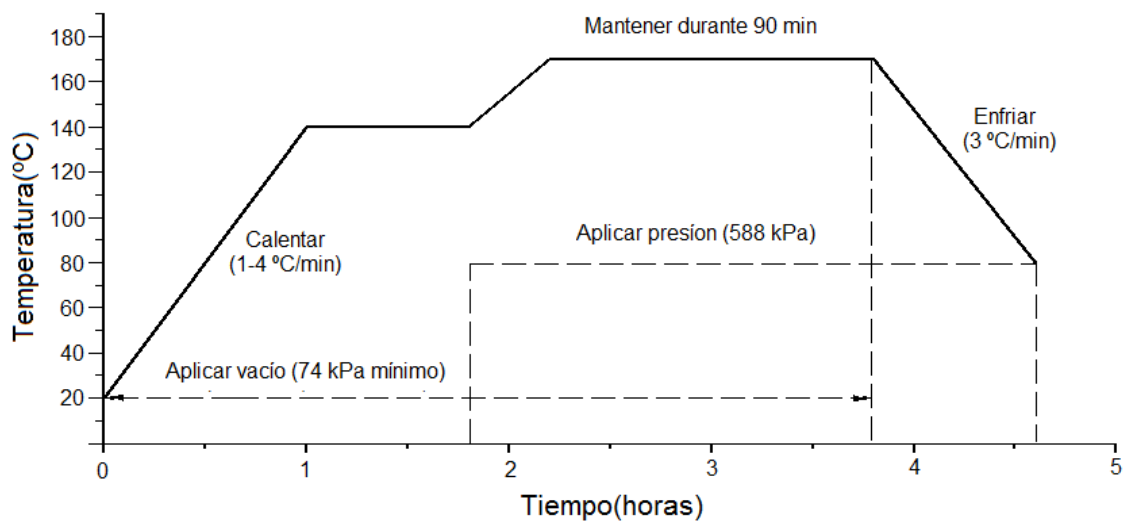
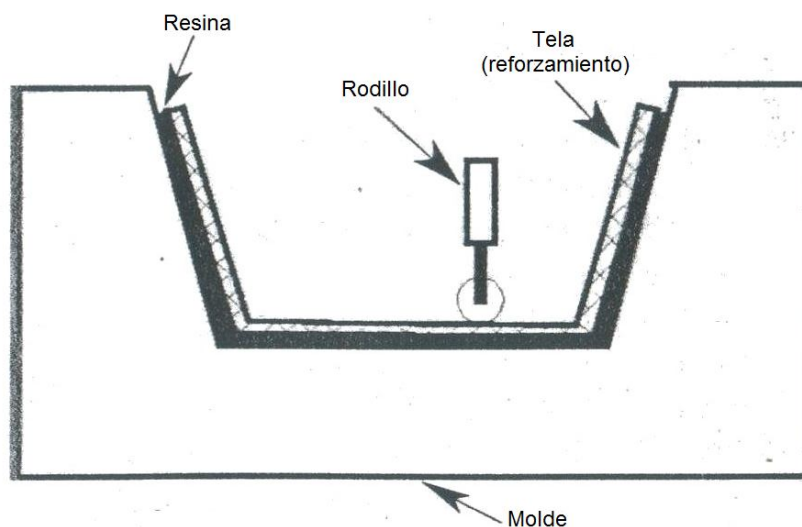


Figura 2.3 Proceso de bolsa de vacío en autoclave [10].



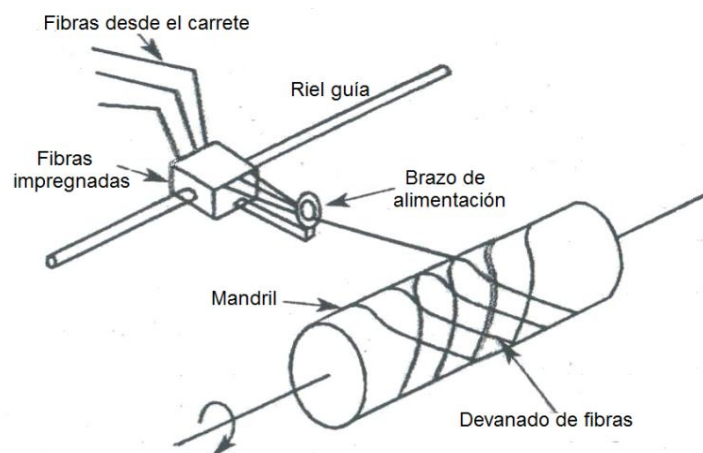
**Figura 2.4** Ciclo típico durante el proceso de autoclave [16].

- Proceso de colocación manual de capas.** En este proceso (figura 2.5), se aplica resina líquida en el molde y el reforzamiento es colocado manualmente encima de éste. Se utiliza un rodillo para impregnar las fibras con la resina y para aplicar presión durante el laminado, posteriormente se aplica la siguiente capa de resina, mezclada con catalizadores o aceleradores [8], y reforzamiento hasta obtener el espesor adecuado. El fraguado del laminado es a temperatura ambiente durante un periodo aproximado de 24 horas [16].



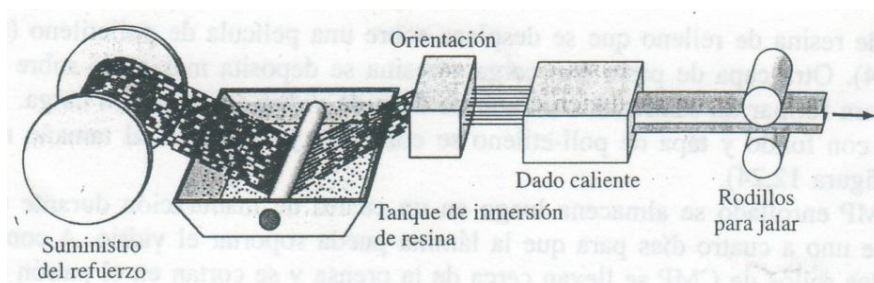
**Figura 2.5** Proceso de colocación manual de capas [16].

- Proceso de embobinado del filamento.** El devanado de filamento (figura 2.6) se realiza con máquinas especialmente diseñadas y controladas automáticamente. En este proceso la fibra continua se impregna mediante un baño de resina *in situ* y se enrolla sobre un mandril [8]. Se sincroniza la velocidad transversal del brazo de alimentación de la fibra con la rotación del mandril para cambiar de dirección, además de controlar el ángulo del devanado [11]. Se aplica fuerza de tracción de 4.5-26.7 N a la fibra durante el devanado y el fraguado se realiza a temperatura ambiente [16].



**Figura 2.6** Proceso devanado de filamentos [16].

- Proceso de pultrusión continua.** La pultrusión (figura 2.7) es un proceso para fabricar componentes de forma alargada y sección transversal constante [14]. El proceso utiliza típicamente fibras unidireccionales impregnadas de resina *in situ* y jaladas a través de un dado calentado<sup>6</sup> a velocidad de producción constante típicamente de 0.1-0.5 m/s [11].

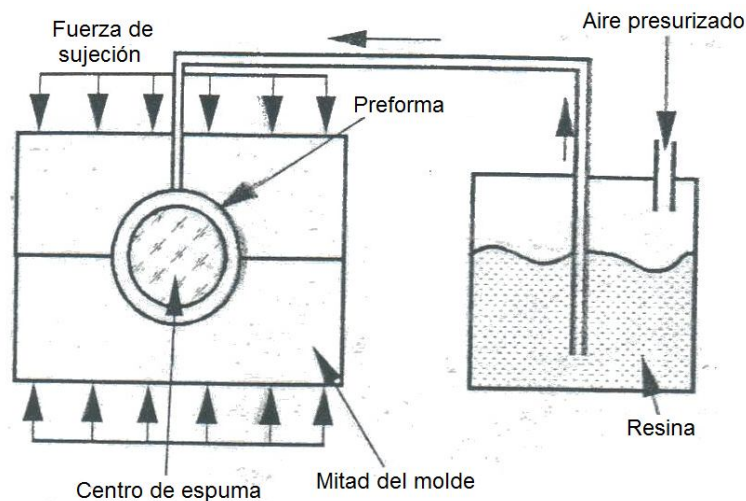


**Figura 2.7** Proceso de pultrusión [8].

<sup>6</sup> La temperatura del dado depende de las condiciones de curado de la resina.

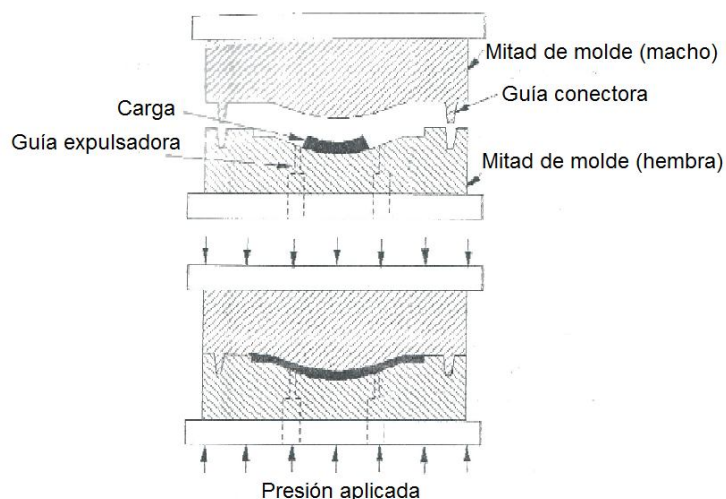
- Proceso de moldeado en resina por transferencia.** En el proceso RTM (*Resin Transfer Molding*) se coloca una preforma dentro de la cavidad del molde. La otra mitad del molde es acoplada a la primera y son aseguradas. Entonces, utilizando equipo de dispersión, una mezcladora de resina, catalizador y color se bombea dentro del molde a través de las terminales en el molde (figura 2.8). El curado va desde 6 hasta 30 minutos, dependiendo de la cinética de la mezcla. Por último la parte es removida del molde [16].

Los equipos para RTM tienen un compresor que inyecta resina a cierta presión. La presión de inyección es típicamente de 69-690 kPa. La presión de inyección determina la proporción de resina y el tiempo de llenado. Después de que el molde es llenado completamente con la resina, la presión en el molde durante el curado es mantenida alrededor de 14 a 69 kPa [16].



**Figura 2.8** Proceso de moldeado en resina por transferencia [16].

- Proceso de moldeado por compresión.** En la operación de moldeado por compresión (figura 2.9) se corta la tela reforzante en forma rectangular y se colocan en la parte profunda de la mitad del molde, previamente calentado a 140 °C aproximadamente y el molde es cerrado a una velocidad de trabajo de 0.04-0.08 m/s [16].

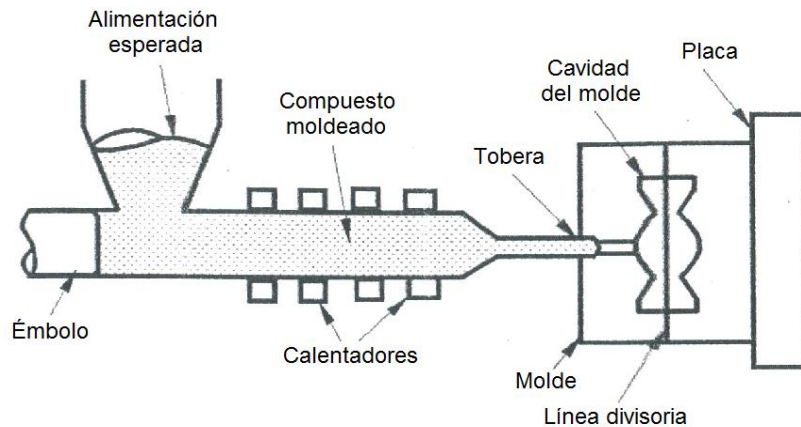


**Figura 2.9** Proceso de moldeo por compresión [16].

- **Compuestos moldeados por inyección.** Es un proceso en el que los *pellets* de resina llenos de fibra se depositan en la tolva y alimentan el husillo, a través del cual son calentados en etapas para ser inyectados en forma líquida por las cavidades del molde. Después de inyectar el material, se mantiene cierta presión en la cavidad de manera que el material inyectado no regrese (figura 2.10). La duración para mantener el calor y la presión depende del tamaño de la parte, de la resina y del espesor. Posteriormente que se llena el molde, se deja enfriar y es abierto para retirar la pieza. La siguiente tabla muestra los parámetros típicos del proceso de moldeo por inyección para la manufactura de *plug fuse* [16].

**Tabla 2.1** Parámetros típicos del proceso de moldeo por inyección para la manufactura de *plug fuse* [16].

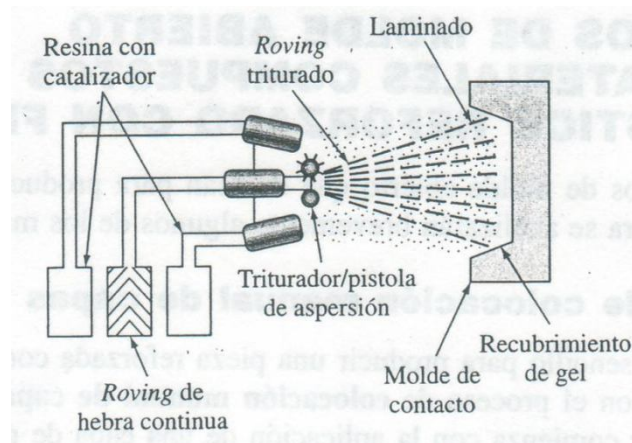
Parámetros del proceso	Valores fijados
Temperatura de la tolva	52 °C
Temperatura del molde	154 °C
Presión de inyección	69 MPa
Presión mantenida	34 MPa
Tiempo de inyección	3 s
Fuerza de sujeción	5,000 kg



**Figura 2.10** Proceso de compuestos moldeado por inyección [16].

- **Proceso de aspersión.** Este proceso es similar al método de colocación manual de placas. Con la diferencia que el *roving* de fibra continua se alimenta a través de una combinación de triturador y pistola de aspersión (figura 2.11) que deposita simultáneamente dentro del molde el *roving* triturado y la resina con catalizador.

El laminado depositado se consolida con un rodillo para expulsar el aire y asegurarse de que la resina impregne las fibras reforzantes [8].



**Figura 2.11** Proceso de aspersión [8].

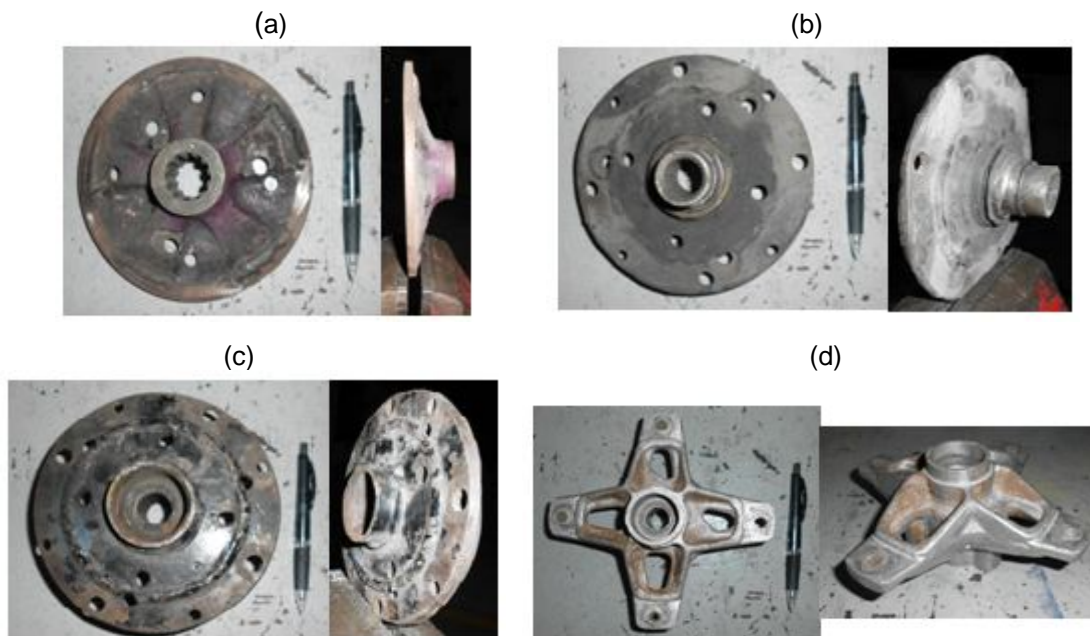
En el siguiente capítulo se propone la elaboración de la masa soporte delantera, para un vehículo Mini-Baja, de fibra de carbono-epóxico y mediante un criterio de falla se predice su comportamiento mecánico.



### CAPÍTULO 3. DISEÑO DE UNA MASA SOPORTE DELANTERA PARA UN VEHÍCULO MINI-BAJA

La masa soporte es un componente mecánico de 152.4 mm (6 in) de diámetro, con 6.35 mm (1/4 in) de espesor en su parte más delgada para la masa de acero y con un espesor de hasta 12.7 mm (1/2 in) para la de aluminio [19]. Este componente es objeto de estudio en este trabajo, de tal forma, se analizarán y compararán los esfuerzos de trabajo de cuatro propuestas: 1) acero al bajo carbono, 2) aluminio, 3) compuesto reforzado con fibras continuas unidireccionales de carbono y 4) compuesto reforzado con fibras continuas de tela entretrejida de carbono. Logrando establecer, de manera teórica, cual tiene mejor comportamiento mecánico, partiendo de que requerimos un componente de las mismas características geométricas pero que sea ligero y resistente.

La figura 3.1 muestra algunas de las geometrías de las masas manufacturadas en acero *AISI* 1015 y aluminio 1150 utilizadas en los vehículos Mini-Baja de la UNAM [19].



**Figura 3.1** Masas delanteras manufacturadas en a), b) y c) acero *AISI* 1015 y d) aluminio 1150 [19].



### 3.1 Identificación de la necesidad

Dentro de la categoría SAE Mini-Baja se cuenta con un vehículo monoplaza de tipo *off-road*, el cual es sometido a pruebas de diseño, costos, pruebas dinámicas de maniobrabilidad, aceleración, ascenso en una pendiente de 45° de inclinación, frenado y una carrera de resistencia con cuatro horas de duración [2]. Durante ésta, los vehículos están bajo condiciones de pruebas físicas severas, ya que irregularidades del camino, brechas, rocas de dimensiones considerables y troncos de árboles caídos que se encuentran cerca de la pista, caminos con lodo y accidentados, son entre otros obstáculos por los que hay que transitar para evaluar la resistencia mecánica del vehículo; aunado a esto, hay que considerar la pericia del conductor. Este tipo de pruebas son capaces de provocar fallas<sup>7</sup> en diferentes componentes del vehículo y posteriormente analizarlas con detenimiento para mejorarlos.

La prueba más severa de la competencia Mini-Baja West es la de resistencia (figura 3.1.1). Donde un total de cien vehículos participantes se disputan el triunfo en una pista accidentada dentro del desierto de Arizona. En ésta prueba se suscitan diversos percances, tanto por lo accidentado de la pista como los provocados por los diferentes competidores. El ganador será el que realice más vueltas en un periodo de cuatro horas de duración. Los competidores tendrán la obligación de recargar dos veces combustible y hacer por lo menos un cambio de piloto. Por lo que la estrategia a seguir es un factor importante y dentro de ésta prevalece el evitar salir lo menos posible a *pits* debido a la falla de componentes mecánicos. Para ello, es vital que todos los componentes del vehículo estén bien diseñados para estar exentos de una avería, aunque por las colisiones contra otros vehículos o contra obstáculos, a veces son inevitables. Esto puede provocar que el vehículo quede fuera de la competencia por unos instantes y por ende afecte en el resultado final.

---

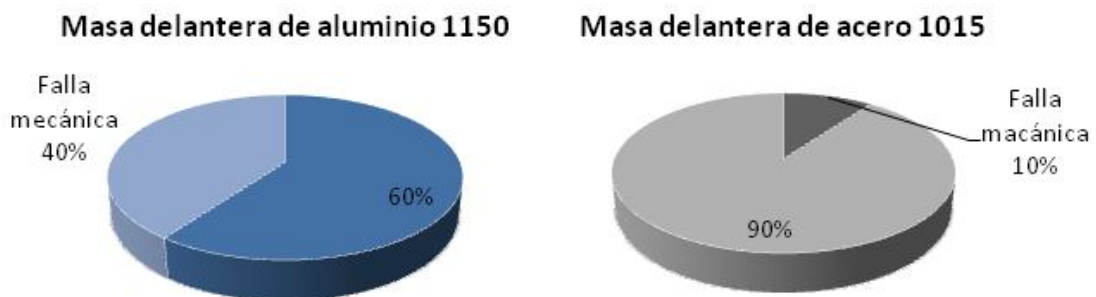
<sup>7</sup> Según Norton [20] una pieza puede fallar si cede y se distorsiona tanto como para ya no funcionar adecuadamente.



**Figura 3.1.1** Prueba de resistencia de la competencia Mini-Baja West [19].

Dentro de algunas competencias y pruebas realizadas por vehículos de la UNAM, se suscitaron fallas en las llantas delanteras debido a lo severo de las pruebas y a las colisiones. Después de analizar los componentes dañados se comprobó que las rótulas y brazos del sistema de suspensión delantera no fallaban. Lo que comúnmente fallaba era la masa soporte, implicando un tiempo de retraso valioso en el remplazo de la pieza durante competencias. Esto ha llevado a realizar un estudio a detalle sobre este componente.

Debido a las condiciones a las cuales es sometido el vehículo, éste se desempeña de manera óptima durante dos años; en los cuales, corre en promedio, diez veces por año en competencias y demostraciones. Durante éste tiempo, las masas manufacturadas en acero y aluminio fallaron una y cuatro veces, respectivamente, debido a impacto como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.1.2** Estadística del comportamiento de la masa delantera durante un año [19].

Las siguientes tablas describen el agente inductor y los modos de falla de las masas de acero y aluminio registrado durante la competencia SAE Mini-Baja.

**Tabla 3.1.1** Agente inductor de falla [21].

Agente	Nivel de aplicación	Tiempo de aplicación
Fuerza	Alto	Transitorio

El agente inductor de falla de la masa soporte delantera, debido a choques, recibe el nombre de “impacto”. El cual es una fuerza aplicada en un nivel alto en un tiempo transitorio.

**Tabla 3.1.2** Modo de falla [21].

Tipo de modo	Duración de la falla	Localización de la falla
Deformación*	Repentino	Superficial
Fractura**	Repentino	Superficial

\* Masas hechas de acero 1015 o aluminio 1150 con dimensiones y geometrías diferentes (figura 3.1).

\*\* Masa hecha de aluminio 1150 dimensiones y geometría igual a la de acero (figura 3.1).

Como consecuencia del impacto, la masa de acero se deforma porque ocurre fluencia<sup>8</sup> en una parte compleja de manera repentina, es decir, el esfuerzo en la sección transversal mínima excede el esfuerzo de fluencia. Por otro lado, la masa de aluminio se fractura, debido a la separación, de manera repentina, en el área de sección transversal normal al esfuerzo aplicado [21].

<sup>8</sup> La fluencia, también conocida como límite elástico, se debe al deslizamiento relativo de los átomos del material dentro de su estructura de red [20].

### 3.2 Definición del problema

Durante la competencia SAE Baja, es común el impacto en las masas de las llantas debido a diferentes factores como choques, derrapes, obstáculos, etc. (figura 3.2.1). Es por ello que la masa delantera es objeto de estudio en este trabajo.



Figura 3.2.1 Competencia SAE Mini-Baja [19].

La fuerza aproximada con la que impacta la masa delantera del vehículo durante competencias se obtuvo mediante las ecuaciones (a) de movimiento para aceleración constante en línea recta de una partícula y (b) de colisiones elásticas de dos partículas.

La siguiente figura describe las condiciones dinámicas iniciales del vehículo representado como una partícula.

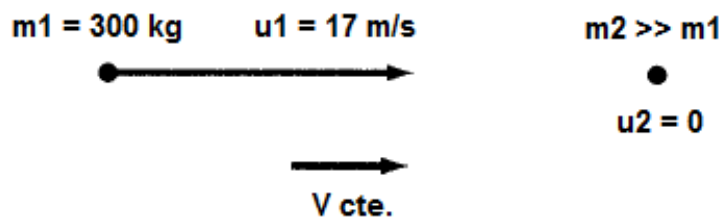


Figura 3.2.2 Condiciones dinámicas iniciales del vehículo Mini-baja.

La partícula uno representa un vehículo Mini-Baja con masa  $m_1$  de 300 kg (masa total del vehículo con piloto) y una velocidad constante  $u_1$  de 17 m/s. La segunda partícula (obstáculo) tiene una masa  $m_2$  mucho mayor que la masa uno y se encuentra en reposo ( $u_2 = 0$ ).

(a) Utilizando la ecuación de movimiento lineal para aceleración constante de una partícula [22] se obtiene la aceleración de la partícula  $a$  en una distancia promedio  $s$  de 3 m.

$$u_1^2 = u_2^2 + 2as: \quad a = (u_1^2 - u_2^2) / 2s \quad (9)$$

$$a = (17 \text{ m/s})^2 / 2(3 \text{ m}) = 48.17 \text{ m/s}^2$$

Con la segunda ley de Newton se obtiene la fuerza  $F$  de la partícula uno.

$$F = m_1 a \quad (10)$$

$$F = (300 \text{ kg}) (48.17 \text{ m/s}^2) = 14,450 \text{ N}$$

(b) Se consideró una *colisión elástica*<sup>9</sup> directa y frontal de dos partículas en la que la rotación no está involucrada; es decir, solamente interviene la energía cinética  $T$  [23].

$$T = \frac{1}{2}m_1u_1^2 - \frac{1}{2}m_2u_2^2 \quad (11)$$

$$T = (0.5)(300 \text{ kg})(17\text{m/s})^2 = 43,350 \text{ J}$$

Donde el trabajo  $W$  es efectuado por el producto de la fuerza  $F$  por la distancia paralela  $s$  que se mueve la partícula mientras la fuerza actúa sobre ella [22].

$$W = F s: \quad F = W/s \quad (12)$$

$$F = 43,350 \text{ J}/3 \text{ m} = 14,450 \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza con la que se impacta una masa soporte delantera durante la competencia es de 14,450 N, aproximadamente. Este tipo de fuerza ha provocado que la masa soporte delantera hecha de acero se deforme, y en el caso de utilizar aluminio llega a fracturarse.

---

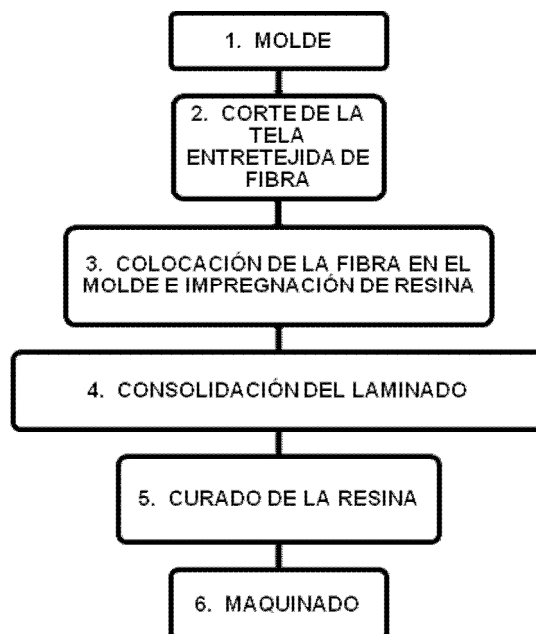
<sup>9</sup> Una colisión es elástica si no cambia la energía interna de las partículas [23].

Se ha propuesto incrementar la geometría de la masa soporte manufacturada de acero para hacerla más resistente y con ello garantizar que la pieza resistirá. Sin embargo, el objetivo en cada uno de los componentes del vehículo es reducir el peso para tener una respuesta de aceleración más rápida, consumo de combustible eficiente y hacerlo resistente en condiciones adversas.

Los materiales compuestos reforzados con fibras pueden incrementar la resistencia de algunos componentes del vehículo Mini-Baja y hacerlos más ligeros. En las siguientes líneas se estudia el caso particular de la masa soporte delantera comenzando por las características de elaboración y posteriormente se realizará su análisis mecánico.

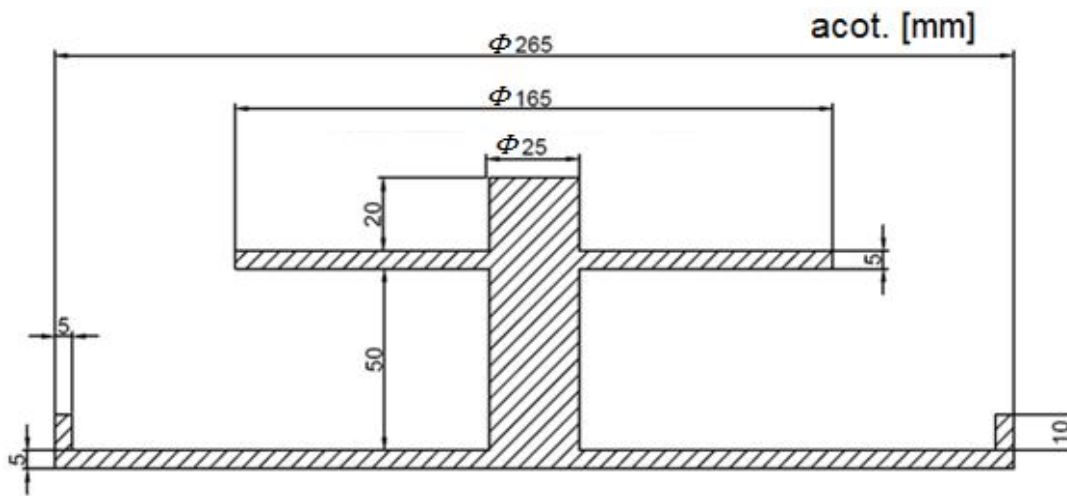
### 3.3 Propuesta de elaboración de una masa soporte hecha de fibra de carbono.

La masa soporte delantera de fibra de carbono para un vehículo Mini-Baja se realiza mediante el *Proceso de Colocación Manual de Capas*, descrito en el capítulo 2, y los pasos de elaboración se muestran en la siguiente figura.



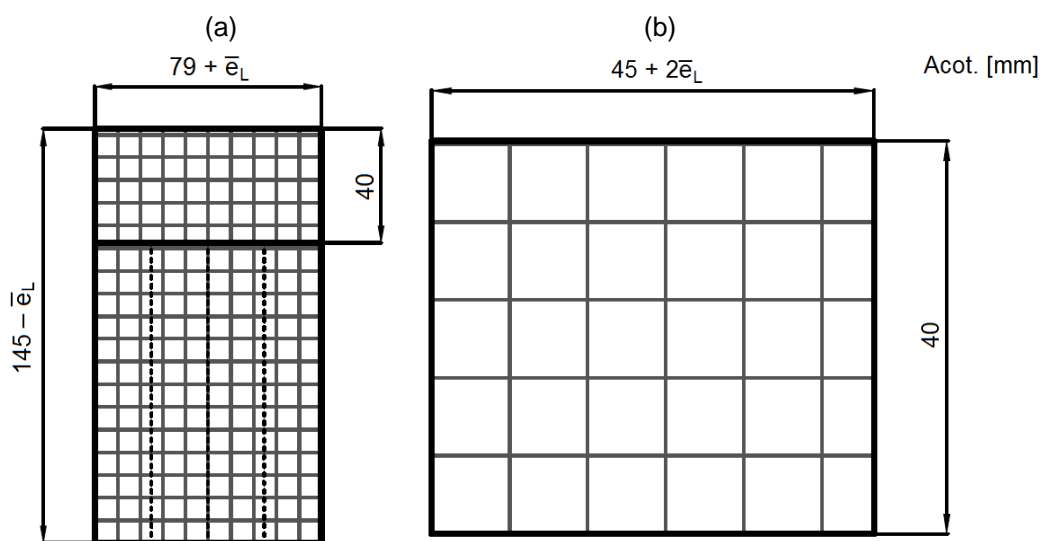
**Figura 3.3.1** Proceso de elaboración de una masa soporte delantera de fibra de carbono mediante el *Proceso de Colocación Manual de Capas*.

1. El proceso comenzará con la elaboración del molde (figura 3.3.2), el cual se recomienda hacerlo de madera debido a la facilidad con que se trabaja éste material.



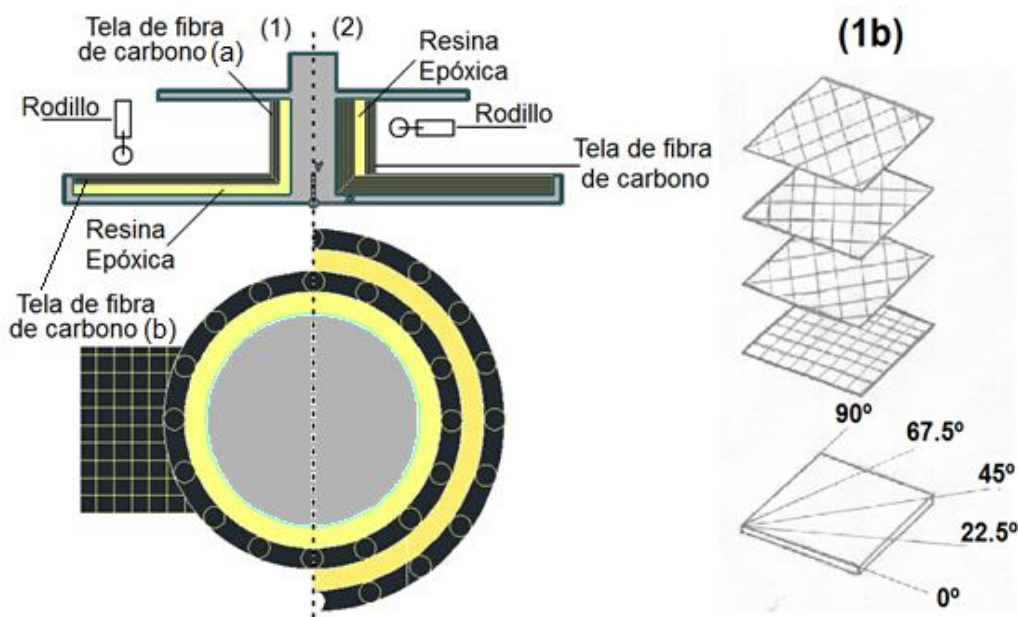
**Figura 3.3.2** Dimensiones del molde.

2. Se cortarán rectángulos de tela entretejida de fibra de carbono para el laminado con tijeras convencionales y sus dimensiones dependen del espesor promedio de éste. Para tal caso se consideró un espesor promedio de cada lámina de 0.1 mm [5]. Los rectángulos para el laminado (a) se cortarán en la parte inferior, perpendicularmente a la longitud constante del doblé, en cuatro partes proporcionales al incremento del espesor del laminado como se muestra en la figura 3.3.3a mediante líneas punteadas. Los cálculos para los valores anteriores se muestran en el Apéndice B.



**Figura 3.3.3** Dimensiones de los rectángulos para los laminados a) uno y b) dos, respectivamente.

3. Para la elaboración de una masa soporte delantera de fibra de carbono-epóxico para un vehículo mini-baja se necesitarán 0.64 L de resina y 3 piezas de tela entretejidas de fibra de carbono con una superficie de 8,353.96 cm<sup>2</sup> (91.4 cm x 91.4 cm). Para los laminados 1 y 2, mostrados en la figura 3.3.4, se necesitarán 100 y 550 rectángulos, respectivamente. Antes de la colocación de las láminas se debe aplicar de 4 a 5 capas de agente desmoldante [17] en forma de cera, el cual permitirá un desprendimiento uniforme y buen acabado del compuesto [24]. La colocación de la fibra en 1 en la superficie horizontal del molde será un laminado cuasi-isotrópico con ángulos de orientación de 0°, 45°, 22.5° y 67.5° para cada cuadrante, como se muestra en 1b. En el laminado 2 solo se coloca la tela hasta obtener cierto espesor. La impregnación de la resina se realizará con un rodillo o brocha.



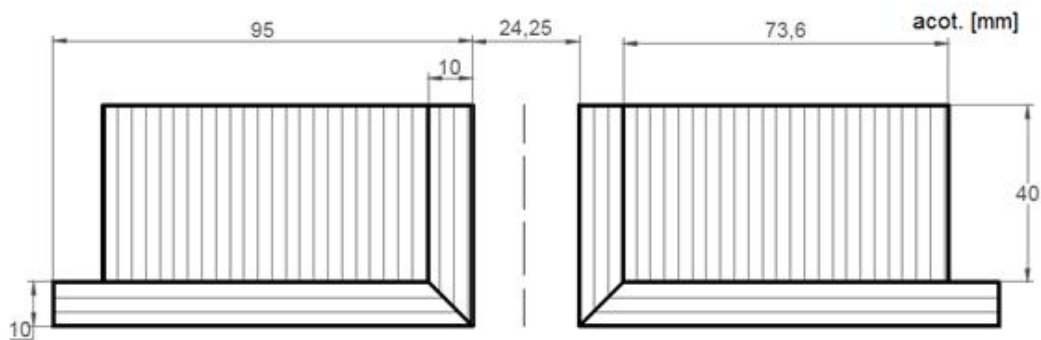
**Figura 3.3.4** Colocación del laminado.

4. El rodillo utilizado en el paso anterior, también se utilizará para la consolidación del laminado.

5. El curado del compuesto depende de la resina utilizada y los parámetros son proporcionados por el fabricante.

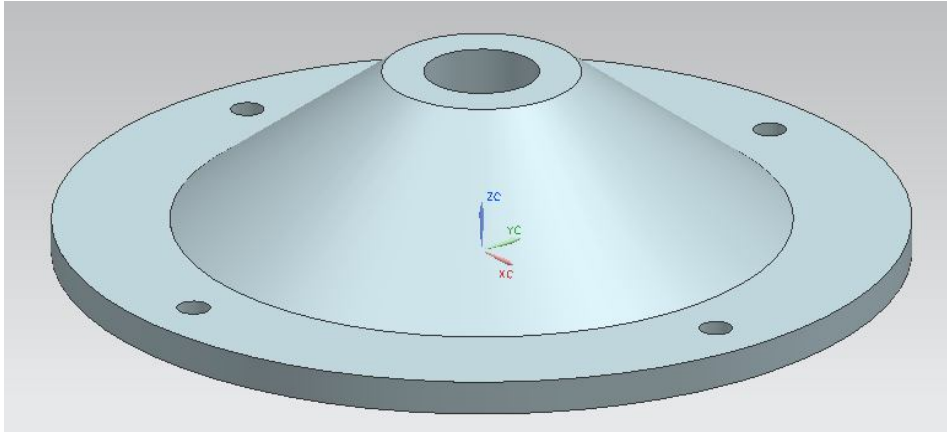


6. Finalmente, se obtendrá un sólido de sección transversal circular (figura 3.3.5) y el perfil cónico se maquinará, de acuerdo a las especificaciones descritas por Schwartz [25], en un torno de velocidad angular de 1,100-2,500 rpm, enfriado con aire y utilizando una herramienta de corte de *PCD* (diamante policristalino). La pieza de material compuesto se maquinará alejado de las esquinas, de manera perpendicular a las fibras, con velocidad constante de 3 m/s y profundidad de corte y 2.5 mm. Con los parámetros anteriores se evitará la separación entre las láminas y el calentamiento por fricción de la matriz. Las dimensiones finales de la masa soporte delantera son mostradas en el Apéndice A. Para el maquinado de los barrenos del plato se utilizarán un taladro con brocas de *PCD* con una velocidad angular de 2,000 rpm [25]. Realizado el maquinado se aplicará una capa de resina epóxica para proteger a las fibras expuestas.



**Figura 3.3.5** Sólido de fibra de carbono-epóxico de sección transversal circular.

El diseño final de la masa, mostrado en la siguiente figura, se basó en dos aspectos: a) evitar cambios abruptos en la geometría que puedan dar lugar a esfuerzos mayores que los esperados [21] y b) los compuestos con fibra continua unidireccional presentan mejores propiedades en su dirección longitudinal [5]. Estas consideraciones en la geometría y en la colocación del laminado permitirán que la fuerza aplicada en la masa de material compuesto sea siempre de manera paralela a la dirección longitudinal de la fibra, en la cual presenta mejores propiedades mecánicas.



**Figura 3.3.6** Diseño final de la masa soporte delantera de fibra de carbono.

### 3.4 Análisis de la propuesta

Los materiales dúctiles<sup>10</sup>, como los aceros con bajo contenido de carbono y aluminio, se comportan de buena manera ante impacto debido a su tenacidad<sup>11</sup>.

La tenacidad es un concepto comúnmente utilizado, pero difícil de medir y definir. Una forma de concretar el concepto es la capacidad de un material para absorber energía y una forma de cuantificar es considerar el área total bajo la curva del diagrama esfuerzo-deformación. Esta superficie indica la energía total por unidad de volumen que puede realizarse sobre el material sin que se produzca la rotura [26].

Los materiales compuestos son utilizados en muchas industrias debido a sus altas relaciones de esfuerzo y rigidez con respecto al peso; sin embargo, éstos son usualmente débiles bajo cargas de impacto [1]. El daño ocasionado por un impacto puede ser indetectable a simple vista, aún cuando las propiedades del material hayan sido severamente afectadas [27].

---

<sup>10</sup> Los materiales dúctiles se caracterizan por su capacidad para fluir a temperatura ambiente [13] teniendo una elongación porcentual mayor del 5% hasta su fractura [20].

<sup>11</sup> La tenacidad de un material es su capacidad para absorber energía en el campo plástico [26].

Como se mencionó en el capítulo uno, los materiales compuestos reforzados con fibras continuas se comportan de manera elástica hasta su rotura [5]. Estos materiales tienen un límite elástico y una resistencia a la tracción más elevados que el acero *AISI* 1015 y el aluminio 1150.

Sin embargo, los metales anteriores son materiales con un alargamiento total y un área bajo la curva de sus diagramas esfuerzo-deformación mayores a los del material compuesto reforzado con fibras continuas de carbono.

A causa de su límite elástico convencional más alto, los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono, tiene mayor resiliencia elástica, aunque su tenacidad sea menor que la del acero y aluminio.

El módulo de resiliencia o energía de deformación por volumen unitario, indica que el material adecuado para resistir cargas de energía en aplicaciones en las que no deba sufrir deformación permanente, es un material con un elevado límite elástico y un módulo de elasticidad bajo [26].

Al no disponer con equipos de medición que nos proporcionen los valores reales del comportamiento mecánico de los materiales propuestos en este trabajo, se utilizarán algunas propiedades mecánicas, registradas en la literatura [10,28-29], obtenidas mediante la teoría fenomenológica de falla para esfuerzos estáticos. Todas las teorías fenomenológicas de falla para esfuerzos estáticos se basan en el uso de una prueba uniaxial de tracción o compresión como prueba simple [21].

La tabla 3.4.a presenta algunas propiedades mecánicas del acero *AISI* 1015 [28], aluminio 1150 [29] y material compuestos *HexPly* 8552 de fibra de carbono continua, unidireccional (UD) y de tela entretejida, con fracción de volumen de fibra de 60% y epóxico [10].

**Tabla 3.4.a** Propiedades mecánicas.

Material	Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Relación de Poisson $\nu$	Módulo Elástico $E$ (GPa)	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_y$ (MPa)	Módulo de Resiliencia (J/mm <sup>3</sup> )
Aluminio 1150	2.7	0.33	70	28	5.6E-3
Acero 1015	7.8	0.25	210	314	234.8E-3
UD	1.5	0.25	170	1,800	9,529.4E-3
Tela entretejida	1.5	0.05	90	675	2,531.3E-3

Estos valores se utilizarán en el software NX7.5 para obtener los esfuerzos involucrados en el rango elástica de los diagrama esfuerzo-deformación por el Método de Elemento Finito (*FEM*).

Además se calculó la energía de deformación por volumen unitario de cada propuesta, siendo las de material compuesto las que tienen un módulo de resiliencia mucho mayor a los otros dos materiales.

### 3.4.1 Comparación de los esfuerzos de trabajo de las masas.

Aunque los materiales compuestos reforzados con fibras continuas presentan comportamiento ortotrópico [12] (mencionado en el capítulo uno), se establecieron ciertas hipótesis para simplificar el problema.

Se consideró a las diferentes propuestas de masas como sólidos continuos, homogéneos e isotrópicos<sup>12</sup> [26]. Además, para los materiales compuestos, se establecieron condiciones de isodeformación [8].

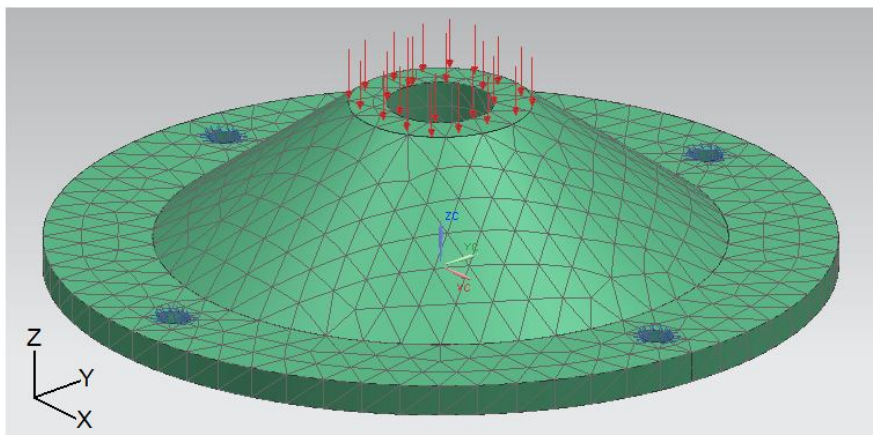
---

<sup>12</sup> Un cuerpo continuo es el que no contiene huecos o espacios vacíos de ninguna clase, es homogéneo cuando tiene propiedades idénticas en todos sus puntos y se considera isotrópico respecto a alguna propiedad siempre que esta no varíe con la dirección u orientación [26].

Se utilizó el software NX7.5 para calcular el esfuerzo efectivo de Von Mises de las masas delanteras por el método de elemento finito (*FEM*). El proceso comenzó con la creación del modelo geométrico de la masa (figura 3.3.6 de la página 42) y mediante un análisis *NASTRAN* fue mallado con 5,000 elementos de tipo tetraédricos<sup>13</sup>.

La masa se empotró en los barrenos, suponiendo que se utilizaron los tornillos adecuados, y se sometió a fuerza estática de compresión aplicada en: 1) la sección transversal mínima con respecto al plano XY del sistema de referencia (figura 3.4.1.a) y 2) en el perfil cónico (3.4.1.c de la página 47). La fuerza inicial fue de 15 kN, incrementándose 10 kN en la sección transversal mínima y 20 kN en la superficie cónica, hasta la falla de la masa de acero.

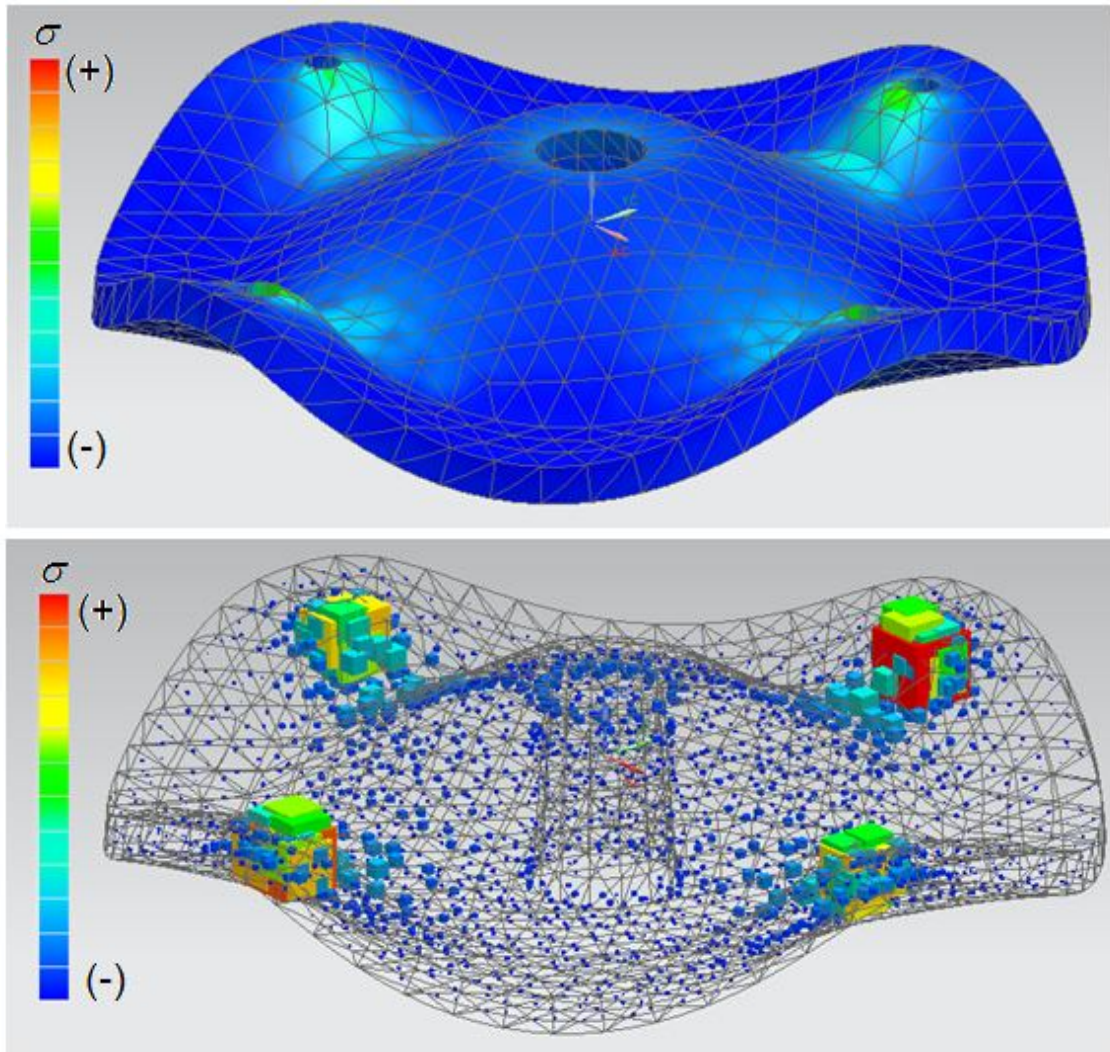
Las figuras 3.4.1.b y 3.4.1.d muestran los esfuerzos relacionados, en cada elemento, con un código de colores, sobre la superficie total y mediante cubos, con una escala de deformación del 10% en la simulación. En estas figuras se observan las partes sobre la superficie total del sólido donde se tienen los esfuerzos mínimos y máximos. De forma más gráfica, las dimensiones de los cubos representan la magnitud de los esfuerzos.



**Fig. 3.4.1.a** Masa sometida a fuerza estática de compresión aplicada en su sección transversal mínima paralela al plano XY.

---

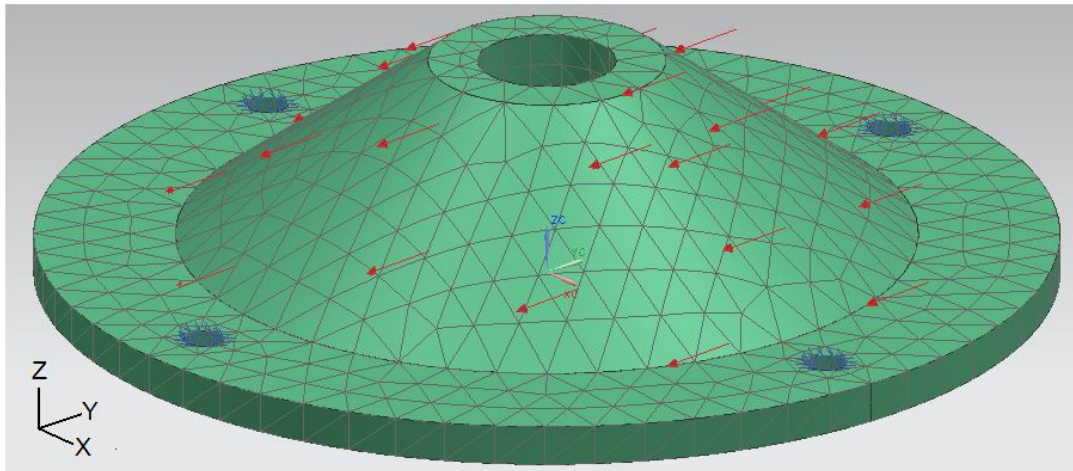
<sup>13</sup> Este tipo de elementos son empleados para el estudio de problemas de elasticidad tridimensional, y tiene en el espacio la adaptabilidad que tiene el elemento triángulo en el plano [30].



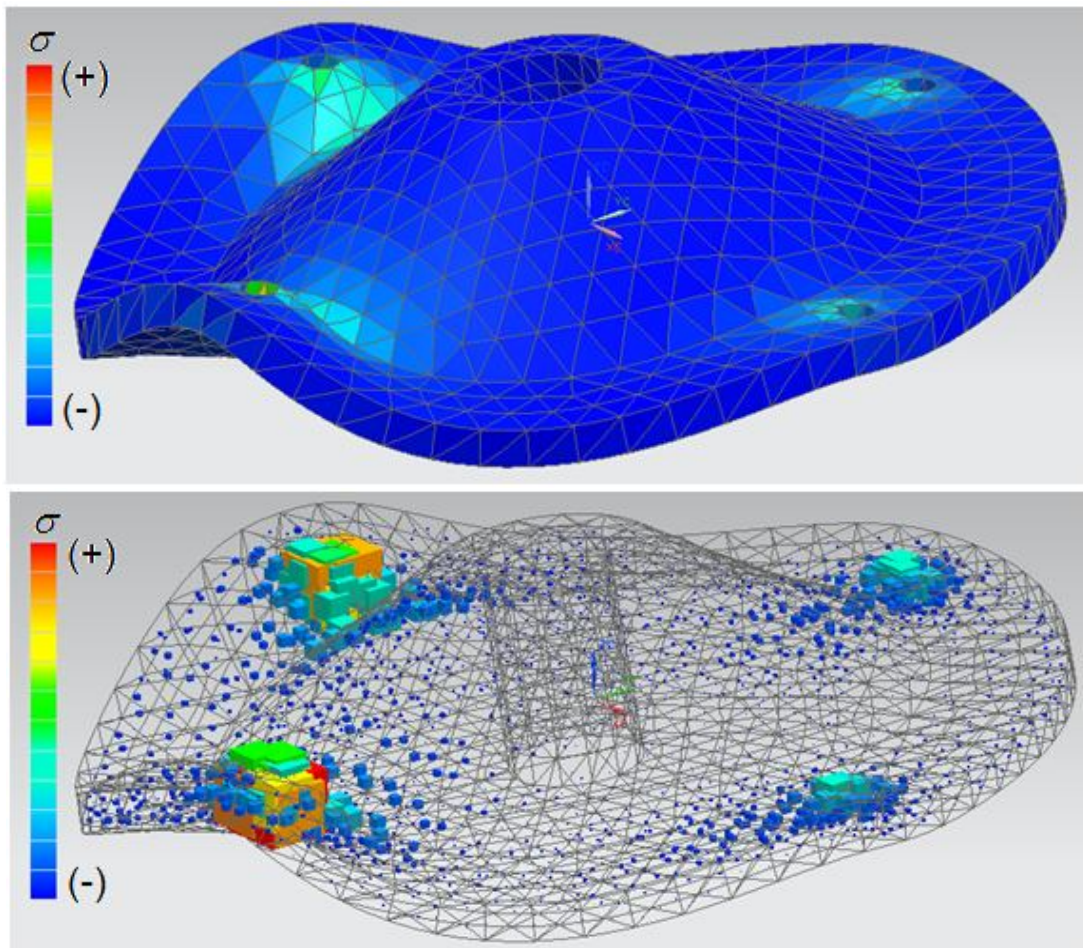
**Fig. 3.4.1.b** Esfuerzos relacionados con los elementos bajo fuerza estática de compresión aplicada en su sección transversal mínima paralela al plano XY.

En la figura anterior, se observa que los esfuerzos máximos se localizan en los cuatro barrenos. Esto nos indica que la masa soporte, bajo fuerza estática de compresión aplicada en su sección transversal mínima paralela al plano XY, fallará en estas zonas.





**Figura 3.4.1.c** Masa sometida a fuerza estática de compresión aplicada en la sección cónica.



**Figura 3.4.1.d** Esfuerzos relacionados con los elementos bajo fuerza estática de compresión aplicada en la sección cónica.

En la figura anterior, se observa algo similar a lo ocurrido en la figura 3.4.1.d; con la diferencia de que los esfuerzos máximos se localizan en los dos barrenos opuestos a la superficie donde se aplica la fuerza.

Las siguientes tablas presentan los esfuerzos de trabajo obtenidos por *FEM* mediante NX7.5 en un estado de fuerza estática de compresión aplicada en la sección transversal mínima paralela al plano XY de la masa.

**Tabla 3.4.1.a** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección transversal mínima** de la masa de **aluminio 1150**.

<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
15,000	143.02

**Tabla 3.4.1.b** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección transversal mínima** de la masa de **acero AISI 1015**.

<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
15,000	144.57
25,000	241.30
35,000	337.82

**Tabla 3.4.1.c** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección transversal mínima** de la masa de **material compuesto de fibra de carbono unidireccional**.

<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
15,000	144.57
25,000	241.11
35,000	337.55

**Tabla 3.4.1.d** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección transversal mínima** de la masa de **material compuesto de fibra de carbono de tela entretejida**.

<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
15,000	149.45
25,000	249.08
35,000	348.71



**Tabla 3.4.1.e** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección transversal mínima** de las masas de **material compuesto HexPly 8552**.

<b>Material</b>	<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
Compuesto fibra de carbono unidireccional	50,000	512.37
Compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono	50,000	531.35
Compuesto fibra de carbono unidireccional	60,000	614.85
Compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono	60,000	637.63
Compuesto fibra de carbono unidireccional	70,000	717.32
Compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono	70,000	743.90

En la tabla 3.4.1.e se muestra que con una fuerza de 70,000 N aplicada en la sección transversal mínima paralela al plano XY de la masa de material compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono supere su resistencia de fluencia.

Las siguientes tablas presentan los esfuerzos obtenidos por *FEM* mediante NX7.5 en un estado de fuerza estática de compresión aplicada en la sección cónica de la masa.

**Tabla 3.4.1.f** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección cónica** de la masa de **aluminio 1150**.

<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
15,000	92.37

**Tabla 3.4.1.g** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección cónica** de la masa de **acero AISI 1015**.

<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
15,000	90.81
35,000	211.89
55,000	332.88

**Tabla 3.4.1.h** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección cónica** de la masa de **material compuesto de fibra de carbono unidireccional**.

<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
15,000	90.81
35,000	211.89
55,000	332.88

**Tabla 3.4.1.i** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección cónica** de la masa de **material compuesto de fibra de carbono de tela entretejida**.

<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
15,000	92.41
35,000	215.83
55,000	338.84

**Tabla 3.4.1.j** Fuerza estática de compresión aplicada en la **sección cónica** de las masas de **material compuesto HexPly 8552**.

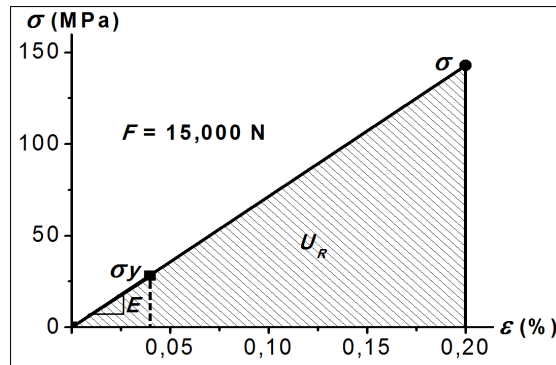
<b>Material</b>	<b>Fuerza aplicada (N)</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma</math> (MPa)</b>
Compuesto fibra de carbono unidireccional	70,000	423.79
Compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono	70,000	431.25
Compuesto fibra de carbono unidireccional	80,000	484.33
Compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono	80,000	492.85
Compuesto fibra de carbono unidireccional	90,000	544.87
Compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono	90,000	554.47
Compuesto fibra de carbono unidireccional	100,000	605.41
Compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono	100,000	616.07
Compuesto fibra de carbono unidireccional	110,000	665.95
Compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono	110,000	677.88

La tabla anterior muestra que con una fuerza de 110,000 N aplicada en la sección cónica de la masa de material compuesto de hilos entretrejidos de fibra de carbono supera su resistencia de fluencia.

### 3.5 Resultados

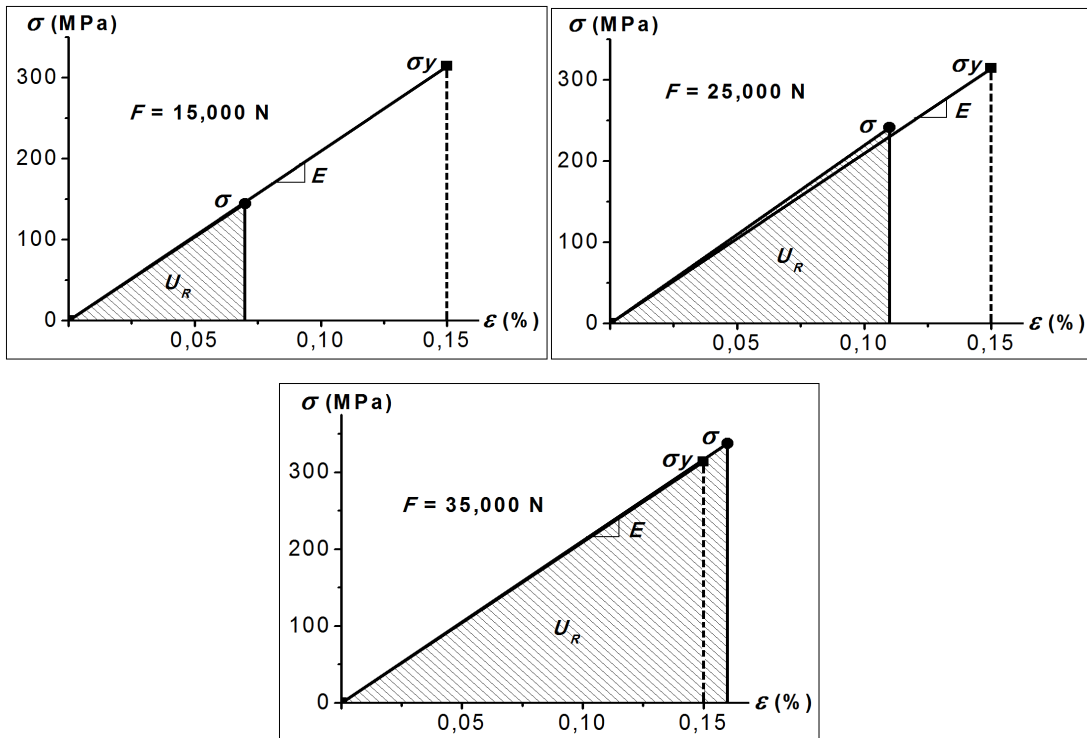
A continuación se presentan las curvas lineales de los diagramas  $\sigma - \epsilon$  en el rango elástico de las diferentes propuestas de masas en un estado de fuerzas estática de compresión aplicada en su sección transversal mínima, donde se identifica su esfuerzos de trabajo ( $\sigma$ ), obtenidos por *FEM*, y su resistencia de fluencia ( $\sigma_y$ ).

**Figura 3.5.1** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  del **aluminio 1150** en un estado de fuerza estática de compresión aplicada en la **sección transversal mínima** de la masa.



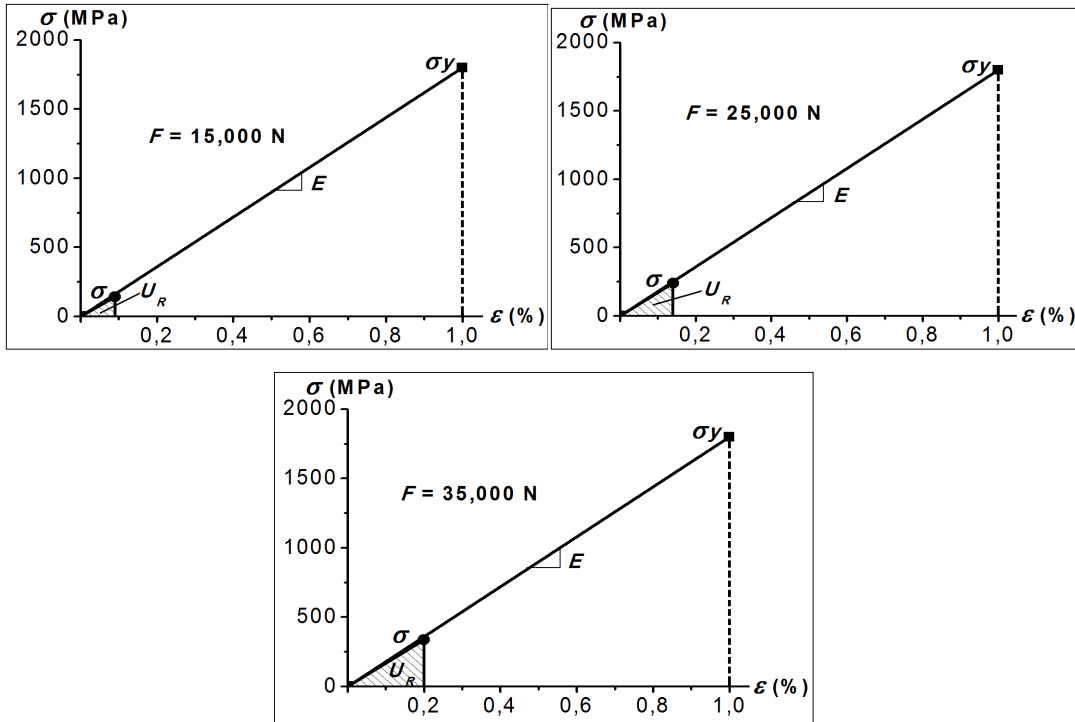
La masa hecha de aluminio 1150 excede su límite de fluencia al aplicarle una fuerza estática de compresión de 15,000 N en su sección transversal mínima.

**Figura 3.5.2** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  del **acero AISI 1015** en un estado de fuerza estática de compresión aplicada en la **sección transversal mínima** de la masa.

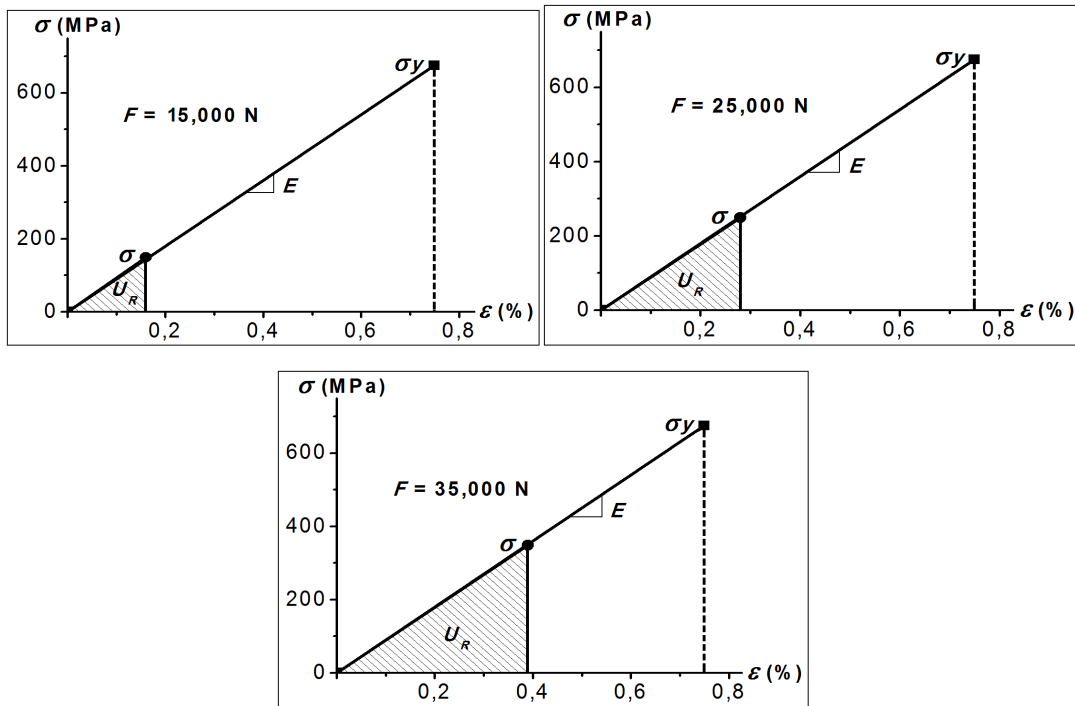


La masa hecha de acero 1015 excede su límite de fluencia al aplicarle una fuerza estática de compresión de 35,000 N en su sección transversal mínima.

**Figura 3.5.3** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  del **compuesto de fibra de carbono unidireccional** en un estado de fuerza estática de compresión aplicada en la **sección transversal mínima** de la masa.



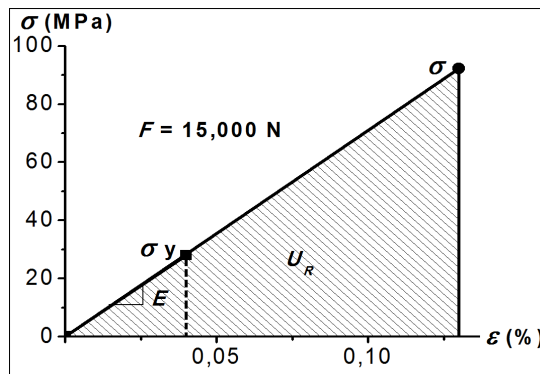
**Figura 3.5.4** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  del **compuesto de fibra de carbono de tela entretejida** en un estado de fuerza estática de compresión aplicada en la **sección transversal mínima** de la masa.



Los esfuerzos en las masas de material compuesto, ya sea UD o tela entretejida, se localizan en la zona elástica al aplicarle una fuerza estática de compresión de 35,000 N en su sección transversal mínima.

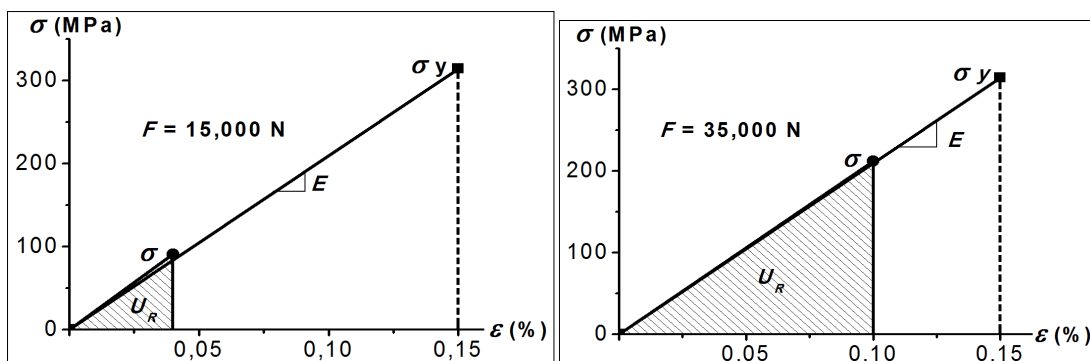
Las siguientes figuras presentan las curvas lineales de los diagramas  $\sigma - \epsilon$  en el rango elástico de las diferentes propuestas de masas en un estado de fuerza estática de compresión aplicada en la sección cónica, donde se identifica su esfuerzo obtenido por *FEM* y su resistencia de fluencia.

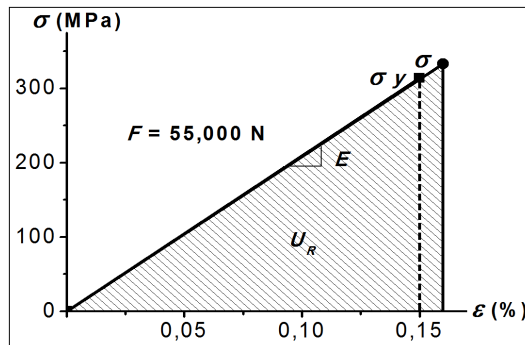
**Figura 3.5.5** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  del **aluminio 1150** en un estado de fuerza estática de compresión aplicada en la **sección cónica** de la masa.



Para el caso de la masa de aluminio 1150 en un estado de fuerza estáticas de compresión de 15,000 N aplicada en la sección cónica excede su límite de fluencia.

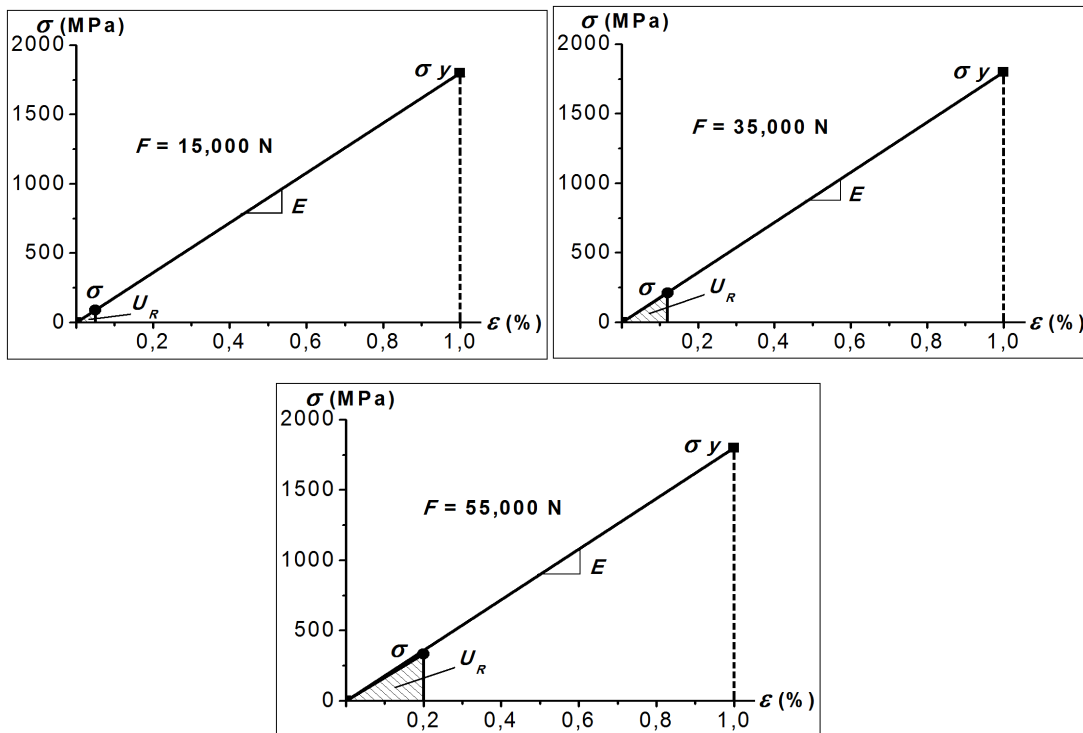
**Figura 3.5.6** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  del **acero A/S/1015** en un estado de fuerzas estáticas de compresión aplicada en la **sección cónica** de la masa.



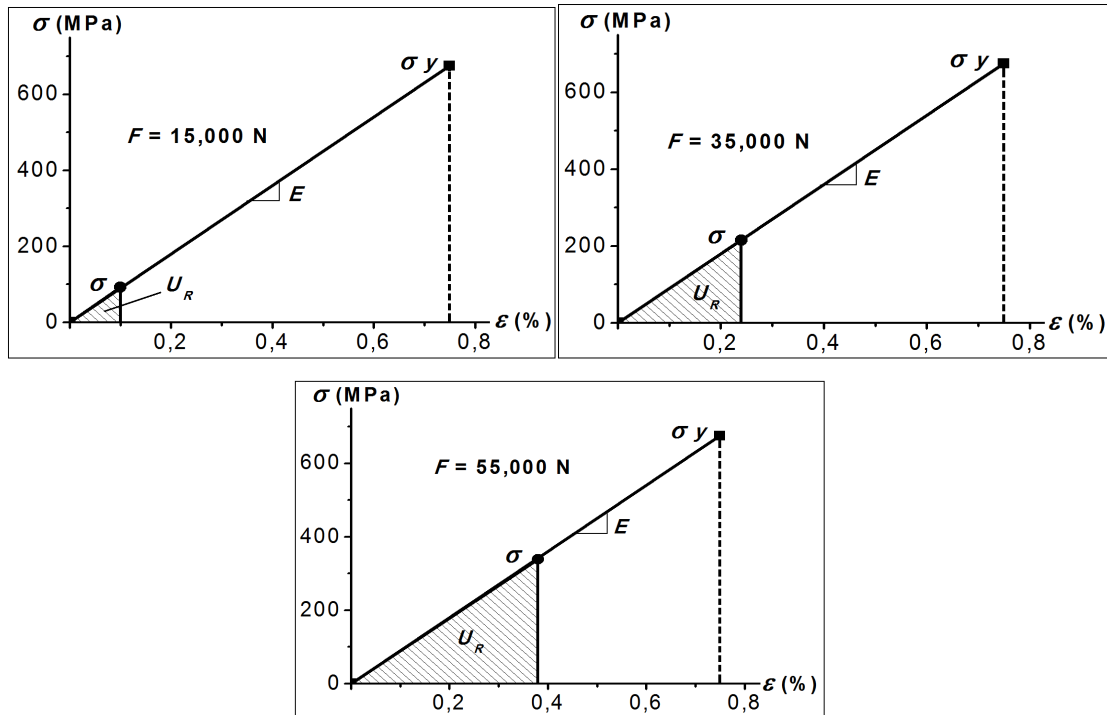


La masa de acero 1015 en un estado de fuerza estáticas de compresión de 55,000 N aplicada en la sección cónica excede su límite de fluencia.

**Figura 3.5.7** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  del **compuesto de fibra de carbono unidireccional** en un estado de fuerzas estáticas de compresión aplicada en la **sección cónica** de la masa.



**Figura 3.5.8** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  del **compuesto de fibra de carbono de tela entretejida** en un estado de fuerzas estáticas de compresión aplicada en la **sección cónica** de la masa.



Los esfuerzos en las masas de material compuesto, UD o tela entretejida, se localizan en la zona elástica al aplicarle una fuerza estática de compresión de 35,000 N en su sección cónica.

### 3.6 Costos

Las siguientes tablas presentan los costos (citado en noviembre de 2011) de telas entretejida de fibra de carbono y de resinas epóxicas de dos proveedores (*aircraft* [6] y *hexcel* [10]) y disponibles en línea.

**Tabla 3.6.1** Tejido tipo *Plain*.

Proveedor	Espesor (mm)	W x F(m)	Tejido	Precio por yarda (dólares US)
<i>Aircraft</i>	0.18	3.2 x 3.2	<i>Plain</i> 282	\$45.50
<i>Aircraft</i>	0.18	3.2 x 3.2	<i>Plain</i> 282	\$31.65
<i>Hexcel</i>	0.21	0.91 x 0.91	<i>Plain</i> 262	\$33.75
<i>Hexcel</i>	0.21	0.91 x 0.91	<i>Plain</i> 48193	\$34.80



**Tabla 3.6.2** Tejido tipo *Twill*.

<b>Proveedor</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>W x F(m)</b>	<b>Tejido</b>	<b>Precio por yarda (dólares US)</b>
<i>Aircraft</i>	0.18	0.304 x 0.304	<i>Twill 284</i>	\$29.85

**Tabla 3.6.3** Tejido tipo *Satin*.

<b>Proveedor</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>W x F (m)</b>	<b>Tejido</b>	<b>Precio por yarda (dólares US)</b>
<i>Aircraft</i>	0.33	6.1 x 6.1	<i>Satin 584</i>	\$66.85
<i>Aircraft</i>	0.33	6.1 x 6.1	<i>Satin 584</i>	\$66.50

**Tabla 3.6.4** Resinas epóxicas comerciales.

<b>Proveedor</b>	<b>Epóxico</b>	<b>Precio (dólares US)</b>
<i>Aircraft</i>	Alpha Poxi 1/4 US gal (0.95 L) kit	\$79.75
<i>Aircraft</i>	Alpha Poxi Hardner 5 US gal (19 L)	\$224.95
<i>Aircraft</i>	Alpha Poxi Hardner 3/8 US gal (1.4 L)	\$27.75
<i>Aircraft</i>	Four Minute Epoxi 1/4 US gal (0.95 L) kit	\$54.75
<i>Hexcel</i>	L285 MGS Epoxi Resin 1 US gal (3.7 L)	\$137.95
<i>Hexcel</i>	L335 MGS Epoxi Resin 1 US gal (3.7 L)	\$93.75

La tabla 3.6.5 presenta los costos directos para la elaboración de una masa soporte delantera de fibra de carbono-epóxico de acuerdo a los cálculos mostrados en el Apéndice B.

**Tabla 3.6.5** Costos de materia prima en la elaboración de una masa soporte delantera de fibra de carbono.

<i>Proveedor</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>	<b>Precio Dólares US (MXN)*</b>
<i>Hexcel</i>	<i>Plain 262</i>	3 telas	\$101.25 <b>(\$1,417.50)</b>
<i>Aircraft</i>	Four Minute Epoxi kit	0.95 L	\$54.75 <b>(\$766.50)</b>
<i>The Home Depot [31]</i>	Bastón de pino	1 bastón	<b>(\$58)</b>
<i>The Home Depot [31]</i>	Placa	1 placa	<b>(\$175)</b>
Poliformas Plásticas [32]	Cera desmoldante CP500	700 g	<b>(\$64)</b>

\* Considerando el precio del dólar US en 14 MXN (Enero 2012).

**PRECIO TOTAL  
(\$2,481)**

Los esfuerzos de trabajo, obtenidos mediante *FEM*, son similares en las diferentes propuestas. Sin embargo, el comportamiento mecánico de cada masa soporte depende de la resistencia de fluencia y del módulo elástico de cada material. Siendo estos valores, los que determinan si la pieza falla o no al aplicarle determinada fuerza, como se observa en las gráficas anteriores.

De acuerdo con los resultados obtenidos se realizaron las conclusiones finales de este trabajo las cuales son descritas en el siguiente punto.

## CONCLUSIONES

Se cumplió el objetivo del trabajo de tesis mediante el proceso de diseño a un problema específico, según Shigley [33], aplicando herramientas *CAE* y *CAD* para resolverlo de manera teórica.

Aunado a lo anterior, se cumplieron los alcances de este trabajo:

- Se especificó la aplicación de la fibra de carbono en aplicaciones ingenieriles y se analizó el comportamiento de los materiales compuestos unidireccionales reforzados con fibras.
- Se calculó la cantidad de componentes que se necesitan para elaborar una masa soporte en fibra de carbono-epóxico mediante la regla de las mezclas.
- Se describió el proceso manual con las características del laminado y los parámetros en el maquinado para obtener las dimensiones finales de la pieza de material compuesto.
- Se comparó los esfuerzos de trabajo de las masas soporte de material compuesto con las de acero y aluminio. Las piezas de fibra de carbono, unidireccional y tela entretejida, presentaron un módulo de resiliencia superior a las hechas de materiales metálicos. Por tal razón suponemos que una masa soporte hecha de fibra de carbono-epóxico con menos del 1% de espacios vacíos, una adecuada interface entre los componentes y las fibras colocadas paralelamente a la fuerza aplicada, resista la fuerza calculada de impacto sin que ésta falle.
- Se estimó el costo de materia prima en la elaboración de una masa soporte delantera de fibra de carbono-epóxico.

La densidad del compuestos utilizado para el análisis de este trabajo es como una cuarta parte de la del acero. Sin embargo, el costo en la elaboración del prototipo resulta ser superior a las masas hechas de materiales metálicos, que tienen un costo total aproximado de mil quinientos pesos mexicanos, y requiere periodos mayores de tiempo para su proceso de manufactura.

## **Trabajo a futuro.**

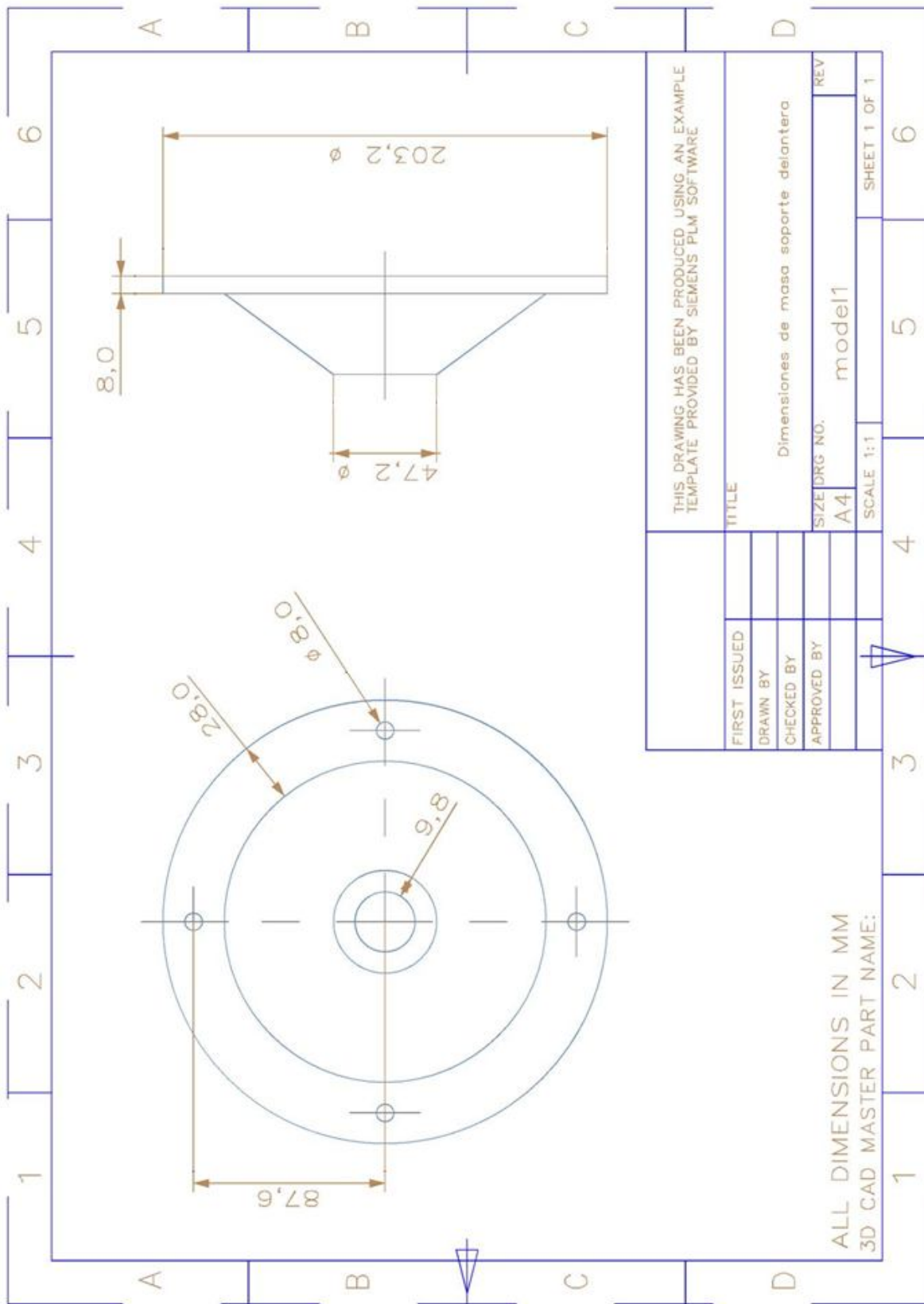
Este trabajo surgió como parte de un proyecto de la Coordinación de la Escudería Puma UNAM, que tiene la finalidad de construir un vehículo eficiente, de menor peso, y sobre todo, diseñado a prueba de pilotos, que incremente su probabilidad para obtener el triunfo en la categoría *SEA* Mini-Baja.

Para llevar a buen término este proyecto hace falta:

- Elaborar la masa soporte propuesta de manera física, realizar pruebas experimentales de impacto y comparar los resultados con los presentados en este trabajo.
- Analizar diferentes geometrías, materiales reforzantes y otros procesos de manufactura de compuestos, tanto de la masa soporte delantera como en otros componentes del vehículo.

## Apéndice A

### Plano de dimensiones de la masa soporte delantera



## Apéndice B

### Cálculos para la cantidad de componentes del material compuesto

Para determinar la cantidad de componentes en la elaboración del sólido para maquinar la masa soporte delantera de fibra de carbono se consideró un material compuesto de 60% de fibra en condiciones ideales [5]. Es decir, un compuesto unidireccional con fibras uniformes en propiedades y diámetros, continuas y paralelas a lo largo del compuesto en una perfecta unión entre las fibras y la matriz en condiciones de isodeformación [8].

A partir de la definición de fracción de volumen (ecuación 1) se calculó el volumen de la fibra y la matriz de un compuesto de volumen  $V_c$  de 1,595.1 cm<sup>3</sup>.

$$V_f = V_f V_c = (0.6)(1595.1 \text{ cm}^3) = 957.1 \text{ cm}^3$$

$$V_m = V_c - V_f = 1595.1 - 957.1 = 638 \text{ cm}^3$$

Realizando la conversión adecuada del resultado anterior se necesita **0.64 L** de resina para un compuesto de 60% de fibra de carbono.

El proceso para elaborar una masa soporte, descrito en el capítulo tres, se compone de dos laminados. Considerando un espesor promedio de laminado  $e_L$  de 0.1 mm se calculó el número de láminas  $n_L$  en cada laminado.

$$n_{L2} = n_{L3} = h_2 / e_L = 10\text{mm} / 0.1\text{mm} = 100 \text{ láminas}$$

$$n_{L1} = r_1 / e_L = 55\text{mm} / 0.1\text{mm} = 550 \text{ láminas}$$

Las dimensiones de la tela de los laminados dependen del espesor de las láminas. Para el laminado 1, se consideró la altura máxima  $H$  y una longitud igual al perímetro del cilindro de la base  $C$ , y para el laminado 2, se consideró una altura constante  $h$  y una longitud  $r_1$ .

$$H = 50\text{mm} + 95\text{mm} = 145\text{mm}$$

$$C = \pi\Phi_i = \pi(25\text{mm}) = 79\text{ mm}$$

Considerando telas entretejidad de 1 yarda por 1 yarda (91.4cm x 91.4cm) se obtuvieron las dimensiones de los rectángulos para los dos laminados, donde  $w$ ,  $z$ ,  $w_1$  y  $z_1$  son las dimensiones de los laminados 1 y 2, respectivamente.

Para (1):

$$y = 91.4\text{cm}/C = 91.4\text{cm}/7.9\text{cm} = 11.6 \approx 11$$

$$z = 91.4\text{cm}/H = 91.4\text{cm}/14.5\text{cm} = 6.3 \approx 6$$

$$R = y * z = 11 * 6 = 66 \text{ rectángulos}$$

Para (2):

$$y_1 = 91.4\text{cm}/r_1 = 91.4\text{cm}/5.5\text{cm} = 16.6 \approx 16$$

$$z_1 = 91.4\text{cm}/h = 91.4\text{cm}/4\text{cm} = 22.8 \approx 22$$

$$R_1 = y_1 * z_1 = 16 * 22 = 352 \text{ rectángulos}$$

Donde  $R$  y  $R_1$  son el número de rectángulos para (1) y (2), respectivamente, con las dimensiones anteriores, que se obtendrán en una tela de 91.4 x 91.4 cm.

$$T = n_{L2}/R = 100/66 = 1.5 \text{ telas}$$

$$T_1 = n_{L1}/R_1 = 550/352 = 1.5 \text{ telas}$$

Por lo tanto, el número total de telas  $T_t$  para los laminados (1) y (2), respectivamente, es de **3 telas** de fibra de carbono.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Larry H. Strait, Mark L. Karasek, “*Effects on Seawater Immersion on the Impact resistance of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites*”, Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 14, (1992).
- [3] Martínez G. L. “*Acero*”, Tercera Edición (La Ciencia para Todos), Fondo de Cultura Económica, S.A. de C.V., México, 2003.
- [4] Avner H. S. “*Introducción a la Metalurgia Física*”, Primera Edición, McGraw-Hill, México, 1988.
- [5] Bhagwan D. A., Lawrence J. B. “*Analysis and Performance of Fiber Composites*”. John Wiley & Sons. New York. 1980.
- [8] Smit W. F., Hasheni J. “*Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*”, McGraw hill, México, 2006.
- [9] Savage G. “*Carbon-Carbon Composites*”. Chapman and Hall. 1993.
- [11] George Lubin. “*Handbook of Composites*”. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 1982.
- [12] Ortiz Prado A. y Ruiz Cervantes O. “*Apuntes de Mecánica del Medio Continuo*”, Unidad de Investigación y Apoyo Técnico en Materiales, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2007.
- [13] Beer, F. P., Jonhston, E. R., Dewolf, J. T., “*Mecánica de materiales*”, McGraw Hill, 2004.
- [14] Callister W. D. “*Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Tomo II*”. Editorial Reverté, S. A. Barcelona. 1996.
- [16] Sanjay K. Mazumdar. “*Composites Manufacturing. Materials, Product and Process Engineering*”. CRC Press. London. 2002.
- [19] Coordinación de la Escudería Puma UNAM.
- [20] Norton, R. L. “*Diseño de Máquinas*”, 1ª Ed. Pearson, México, 1999.
- [21] Spotts, M. F., “*Elementos de Máquinas*”, Séptima Edición, Pearson Educación, México, 1999.
- [22] Semat H. “*Fundamentos de Física*”, 5ª Ed. Interamericana, México, 1976.
- [23] Thornton, S. T., Marion, J. B., “*Classical Dynamics of Particles and Systems*”, 5ª Ed. Thomson.
- [25] Schwartz M. “*Composite Materials Handbook*”. Second Edition. McGraw-Hill, Inc. New York, 1992.



- [26] Dieter G. E. "*Metalurgia Mecánica*", Aguilar, S. A. de Ediciones, Madrid España, 1967.
- [27] K. N. Shivakumar, W. Elber and W. Illg, "*Prediction of Low Impact Damage in Thin Circular Laminates*", AIAA Journal, Vol. 23, No. 3, (1984).
- [28] Bauccio, M. "*ASM Metals Reference Book*". 3ª Ed. ASM International. 1994.
- [30] Fornóns García J. M. "*El Método de los Elementos Finitos en la Ingeniería de Estructuras*", Marcombo Boixarue Editores, Barcelona España, 1982.
- [31] *The Home Depot*, Baston 1-8TFJ pino alistonado, 25 mm de diámetro, 2.43 m de longitud \$58 MXN, Placa MFD 3 mm de espesor, 1.22 x 2.44 m de longitud \$175 MXN.
- [33] Shigley, J. E. "*Diseño de Ingeniería Mecánica*". McGraw-Hill. México, 1979.

## DOCUMENTOS ELECTRÓNICOS

- [2] *Society of Automotive Engineers México* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.saemexico.org/> [citado en diciembre de 2011].
- [6] *Aircraft Spruce* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.aircraftspruce.com/menus/cm/carbonfiber.html> [citado en noviembre de 2011].
- [7] *Fiber Glast Developments Corporation* [en línea]. Disponible <http://www.fibreglast.com/> [citado en noviembre de 2011].
- [10] *Hexcel* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.hexcel.com> [citado en noviembre de 2011].
- [15] *National Aeronautics and Space Administration* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.nasa.gov/> [citado en febrero de 2009].
- [17] *Asociación Española de Materiales Compuestos* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.aemac.org/> [citado en febrero de 2012].
- [18] *Aircraft Spruce* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.aircraftspruce.com/menus/cm/epoxy.html> [citado en noviembre de 2011].
- [24] *Especialidades Químicas para el Poliester S.A. de C.V.* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.especialidadesquimicasparaelpoliester.com> [citado en diciembre de 2011].
- [29] *CARPENTER Aceros Fortuna* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.acerosfortuna.com> [citado en noviembre de 2011].
- [32] *Poliformas Plásticas S.A. de C.V.* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.poliformasplasticas.com.mx/productos.asp> [citado en enero de 2012].