

**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR AERONÁUTICO**

**ESCUELA DE MECÁNICA AERONÁUTICA**

**CONSTRUCCIÓN DE UN AVIÓN DA – 40 DIAMOND STAR A ESCALA A  
PARTIR DE MATERIALES COMPUESTOS PARA FINES DIDÁCTICOS**

**POR:**

**MÉNTOR ALEXIS SÁNCHEZ ZUMBA**

**Proyecto de Grado presentado como requisito parcial para la obtención del  
Título de:**

**TECNÓLOGO EN MECÁNICA AERONÁUTICA**

**2004**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **MÉNTOR ALEXIS SÁNCHEZ ZUMBA**, como requerimiento parcial a la obtención del título de TECNÓLOGO EN MECÁNICA AERONÁUTICA.

-----  
TLGO. IVÁN CORAL  
Director del Proyecto de Grado

02 de Febrero del 2004

## **DEDICATORIA**

A Juan Francisco Toro Galárraga, gran amigo que me enseñó que a pesar de todo la vida es maravillosa. Supo vivir con intensidad y plenitud cada momento de su vida.

**Méntor Alexis Sánchez Zumba**

## **AGRADECIMIENTO**

Los primeros agradecimientos van para las personas que más me han apoyado y que son la parte más importante de mi vida: mis padres y hermanas. Gracias por estar siempre a mi lado y apoyarme de manera incondicional en cada proyecto que emprendo.

Gracias a toda esa gente que de una u otra manera ha colaborado conmigo en cada paso de la elaboración del presente proyecto. Un especial agradecimiento al SGOP. Tlgo. Iván Coral, Director de este Proyecto de Grado, quien con sus consejos, conocimiento, experiencia y amistad, me ayudó a desarrollar y terminar la presente investigación.

Gracias también a todos los amigos que por una u otra razón se han vuelto muy especiales en mi vida. Ustedes saben quiénes son.

Gracias a Dios por la vida y por las cosas buenas y malas que encontramos en el camino y nos ayudan a crecer y a superarnos a diario.

Gracias al Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico por brindarme muchas experiencias y muchos amigos.

Alguien me decía que no debo agradecer por las cosas que alguien hace porque me quiere, yo no estoy de acuerdo. Gracias por enseñarme a vivir y a ser libre.

**Méntor Alexis Sánchez Zumba**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>Pag.</b>
Resumen	1
Introducción	2
Justificación	3
Objetivos	3
Alcance	4

### **CAPÍTULO I**

#### **GENERALIDADES**

1.1 Introducción a materiales compuestos	5
1.1.1 Historia de los materiales compuestos	6
1.2 Ventajas y desventajas de los materiales compuestos frente a los materiales tradicionales	7
1.3 Tipos de materiales compuestos	10
1.3.1 Tipos de fibras	10
1.3.1.1 Fibra de vidrio	11
1.3.1.2 Fibra de Poliaramida (Kevlar)	11
1.3.1.3 Fibra de carbono	12
1.3.1.4 Fibra de Boron	13
1.3.1.5 Cerámica	13
1.3.1.6 Glare	13
1.3.2 Tipos de matriz o resina	14
1.3.2.1 Resinas de poliéster no saturado	15
1.3.2.1.1 Resinas de poliéster isoftalico	15
1.3.2.1.2 Resinas de poliéster bisfenolico	15
1.3.2.2 Resinas de vinilíester	15
1.3.2.3 Resinas de epoxi	16
1.3.3 Tipos de rellenos	17
1.3.4 Materiales pre impregnados	17
1.3.4.1 Ventajas de los materiales pre impregnados	17

1.3.4.2 Desventajas de los pre impregnados	17
1.3.5 Tipos de almas para materiales compuestos	18
1.3.5.1 Panal de abejas (honeycomb)	18
1.3.5.2 Espumas o foam	19
1.3.5.2.1 Styrofoam	19
1.3.5.2.2 Uretano	19
1.3.5.2.3 Poli vinyl clorato (PVC)	20
1.3.5.2.4 Strux	20
1.3.5.3 Madera	20
1.4 Ciencia de las fibras	20
1.5 Tipos estructurales de fibras	21
1.6 Híbridos	22
1.7 Utilización de materiales compuestos en aviación	22
1.8 Utilización de materiales compuestos en otros campos	24
1.9 Procesos para la fabricación de materiales compuestos	25

## **CAPÍTULO II**

### **ESTUDIO DE ALTERNATIVAS**

2.1 Identificación de alternativas	27
2.1.1 Primera alternativa	27
2.1.2 Segunda alternativa	27
2.1.3 Tercera alternativa	27
2.2 Estudio de factibilidad	28
2.2.1 Primera alternativa	28
2.2.2 Segunda alternativa	28
2.2.3 Tercera alternativa	29
2.3 Parámetros de evaluación	30
2.3.1 Factores mecánicos	30
2.3.2 Factor financiero	31
2.4 Matriz de evaluación	31
2.5 Matriz de decisión	31
2.6 Selección de la mejor alternativa	32

## **CAPÍTULO III CONSTRUCCIÓN**

Introducción	<b>32</b>
3.1 Orden de construcción	<b>33</b>
3.2 Tiempo de construcción	<b>34</b>
3.3 Construcción del fuselaje	<b>35</b>
3.4 Construcción de las alas	<b>37</b>
3.5 Construcción del empenaje	<b>39</b>
3.6 Construcción de los trenes de aterrizaje	<b>41</b>
3.7 Construcción de la hélice	<b>49</b>
3.8 Unión de los elementos estructurales	<b>51</b>
3.9 Terminado del prototipo	<b>54</b>

## **CAPÍTULO IV**

### **DATOS TÉCNICOS**

4.1 Descripción general del prototipo	<b>59</b>
4.2 Características del DA – 40 Diamond Star	<b>60</b>
4.3 Manuales	<b>63</b>
4.3.1 Manual de Mantenimiento	<b>64</b>
4.3.2 Manual de Guías Prácticas	<b>66</b>
4.4 Hojas de registro	<b>67</b>

## **CAPÍTULO V**

### **ESTUDIO ECONÓMICO**

5.1 Presupuesto	<b>72</b>
5.2 Análisis económico y financiero	<b>72</b>
5.3 Comparación de costos	<b>75</b>

## **CAPÍTULO VI**

### **OBSERVACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1 Observaciones	<b>77</b>
6.2 Conclusiones	<b>78</b>
6.3 Recomendaciones	<b>78</b>
Bibliografía	<b>79</b>
Anexo A	<b>80</b>
Anexo B	<b>88</b>

## **LISTA DE FIGURAS**

	<b>Pág.</b>
Figura 1.1 Sectores usuarios de materiales compuestos	<b>8</b>
Figura 1.2 Propiedades de los materiales compuestos	<b>8</b>
Figura 1.3 Fabricación de una estructura con materiales compuestos	<b>9</b>
Figura 1.4 Hilo de fibra de carbono	<b>12</b>
Figura 1.5 Resinas de epoxi	<b>16</b>
Figura 1.6 Forma básica de un Honeycomb	<b>19</b>
Figura 1.7 Dirección de las fibras	<b>21</b>
Figura 1.8 Aeronave DA – 40 Diamond Star	<b>23</b>
Figura 3.1 Formación de agujero para inserción de cojinete	<b>36</b>
Figura 3.2 Proceso de construcción del fuselaje	<b>37</b>
Figura 3.3 Proceso de construcción de las alas	<b>39</b>
Figura 3.4 Proceso de construcción del empenaje	<b>40</b>
Figura 3.5 Proceso de cortado de piezas estructurales	<b>42</b>
Figura 3.6 Proceso de construcción del tren de aterrizaje principal	<b>45</b>
Figura 3.7 Proceso de construcción del tren de aterrizaje de nariz	<b>48</b>
Figura 3.8 Hélice del prototipo	<b>50</b>
Figura 3.9 Proceso de construcción de la hélice	<b>51</b>
Figura 3.10 Ensamblaje de los elementos estructurales	<b>53</b>
Figura 3.11 Prototipo completamente ensamblado	<b>53</b>
Figura 3.12 Trazado de líneas de corte sobre el kevlar	<b>55</b>
Figura 3.13 Aplicación de matriz sobre capa de fibra de carbono	<b>56</b>
Figura 3.14 Proceso de terminado del prototipo	<b>57</b>
Figura 3.15 Avión completamente terminado	<b>58</b>
Figura 4.1 DA – 40 Diamond Star con 4 pasajeros	<b>60</b>
Figura 4.2 Hélice de un DA – 40 Diamond Star	<b>62</b>

## LISTA DE CUADROS

	<b>Pág.</b>
Cuadro 1.1 Comparación de propiedades mecánicas	<b>9</b>
Cuadro 3.1. Materiales para construcción del fuselaje	<b>36</b>
Cuadro 3.2. Herramientas para la construcción del fuselaje	<b>37</b>
Cuadro 3.3 Materiales para la construcción de las alas	<b>38</b>
Cuadro 3.4 Herramientas para la construcción de las alas	<b>38</b>
Cuadro 3.5 Materiales para la construcción del empenaje	<b>40</b>
Cuadro 3.6 Herramientas para la construcción del empenaje	<b>40</b>
Cuadro 3.7 Materiales para construir el tren de aterrizaje principal	<b>44</b>
Cuadro 3.8 Herramientas para la construcción del tren de aterrizaje principal	<b>44</b>
Cuadro 3.9 Materiales para el tren de aterrizaje de nariz	<b>46</b>
Cuadro 3.10 Herramientas para la construcción del tren de aterrizaje de nariz	<b>47</b>
Cuadro 3.11 Materiales para la construcción de la hélice	<b>50</b>
Cuadro 3.12 Herramientas para la construcción de la hélice	<b>51</b>
Cuadro 3.13 Materiales para la unión de los elementos estructurales	<b>52</b>
Cuadro 3.14 Herramientas para la unión del prototipo	<b>52</b>
Cuadro 3.15 Materiales para el terminado del prototipo	<b>56</b>
Cuadro 3.16 Herramientas para el terminado del prototipo	<b>57</b>

## **LISTA DE TABLAS**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1 Historia de los materiales compuestos.	<b>6</b>
Tabla 1.2 eficiencia de las fibras respecto a su orientación	<b>21</b>
Tabla 3.1 Máquinas herramientas utilizadas	<b>34</b>
Tabla 3.2 Tiempo de manufactura de los diferentes elementos	<b>34</b>
Tabla 4.1 Principales valores del DA – 40 Diamond Star	<b>62</b>
Tabla 4.2 Codificación de los procedimientos de construcción del DA – 40	<b>63</b>
Tabla 4.3 Codificación de las hojas de registro	<b>67</b>
Tabla 5.1 Lista de costo de materiales	<b>73</b>
Tabla 5.2 Materiales fungibles	<b>74</b>
Tabla 5.3. Valores de otros gastos	<b>75</b>
Tabla 5.4. Costo total del proyecto	<b>75</b>
Tabla 5.5 Costo de un avión a escala importado	<b>75</b>

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. Planos

Anexo B. Fotografías Varias

## RESUMEN

En miras de satisfacer la necesidad de material didáctico para impartir la asignatura de Materiales Compuestos en el I.T.S.A. se presenta el siguiente proyecto que abarca a este documento y a la fabricación de un avión a escala tomando como modelo a la aeronave DA – 40 Diamond Star (constituida en su totalidad por materiales compuestos)

El presente documento contiene toda la información necesaria sobre construcción, análisis financieros y de alternativas, datos técnicos, manuales y planos realizados durante el desarrollo del proyecto.

La construcción del modelo a escala fue llevada a cabo utilizando materiales no convencionales para la construcción de aviones. Dichos materiales son conocidos como materiales compuestos y llevan este nombre debido a que están formados a partir de la combinación de sustancias o elementos con diferentes características.

Dentro de este documento se presentan varios tipos de materiales compuestos para la construcción de piezas estructurales. Evaluando a estos materiales desde diferentes puntos de vista se podrá decidir cual de ellos es el más óptimo para satisfacer las necesidades que se presenten.

## INTRODUCCIÓN

Una de las industrias más desarrolladas y de mayor innovación en la actualidad es la industria Aeronáutica. La necesidad de acortar las distancias y de mejorar los sistemas de defensa de las naciones hace que los constructores de aeronaves compitan a diario por obtener productos que alcancen mayores velocidades y mayores distancias aprovechando al máximo el espacio y los recursos.

En la actualidad una de las desventajas que se presentan tanto en aeronaves civiles como militares es el peso, pues la cantidad de combustible requerido para el vuelo y la misma masa de la aeronave limitan la capacidad de transportar personas, equipaje o armamento dentro de la misma. Por otro lado si un avión despegare con los límites de peso establecidos para su operación esta debería sacrificar cierta cantidad de combustible requiriendo de muchas escalas para recargar el combustible consumido durante la operación empleando demasiado tiempo.

Muchos diseñadores y constructores coincidían en que una forma para reducir el peso de una aeronave notablemente sería el hecho de cambiar el metal del que estaban hechos los aviones por algún material menos pesado. Pero la pregunta era: ¿Qué material no-metálico sería capaz de resistir los esfuerzos producidos sobre una aeronave en vuelo y reducir el peso de la misma sin sacrificar sus límites de seguridad? La respuesta: los **materiales compuestos**.

Utilizados ampliamente en el mundo del automovilismo, la industria espacial, deportiva y de seguridad, los materiales compuestos, cumplían con las expectativas de resistencia y peso que los diseñadores de aeronaves buscaban abriendo de esta manera un campo completamente nuevo e inexplorado en la industria aeronáutica.

Actualmente muchas aeronaves cuentan con componentes tales como el radome y fairings constituidos en su totalidad por materiales compuestos consiguiendo una notable reducción de peso y un mejor performance (desempeño) debido a la facilidad que dichos materiales tienen para recibir formas aerodinámicas.

En nuestro país la utilización de materiales compuestos todavía constituye un campo inexplorado y no explotado que podría contribuir de gran manera al desarrollo en lo que a la industria aeronáutica se refiere.

## **JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación – construcción, pretende satisfacer la falta de material didáctico para impartir la materia de materiales compuestos tanto en lo que se refiere a textos de consulta como en lo referente a materiales propiamente dichos ya que el avión a ser construido constará de un ala sin terminar para que la constitución interna de las capas pueda ser observada y estudiada.

Dado que la utilización y fabricación de materiales compuestos es un campo relativamente nuevo en el ámbito mundial es de vital importancia que la industria aeronáutica de nuestro país introduzca a dichos materiales dentro de su quehacer diario en lo referente a reparaciones estructurales y a la fabricación de partes y por qué no en un futuro cercano a la fabricación de aeronaves.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

Construir un avión a escala con medidas aproximadas 1.5 m de envergadura y 1 m de largo utilizando los diferentes materiales compuestos para que sea utilizado por el instituto con fines didácticos.

### **Objetivos específicos:**

- Analizar alternativas y escoger la correcta
- Construir el avión
- Realizar una investigación sobre los diferentes tipos de materiales compuestos: modo de empleo, construcciones a partir de las fibras, ventajas, desventajas y usos.
- Comprender e investigar sobre aerodinámica, estructuras aeronáuticas y trenes de aterrizaje; temas estos muy tomados en cuenta en la construcción de las aeronaves.
- Realizar la explicación de la construcción de la aeronave.

### **ALCANCE**

Este proyecto de grado incluye la investigación de los temas propuestos anteriormente, la presentación del proyecto escrito que servirá como texto de consulta y además la construcción de un avión a escala hecho a base de híbridos que consisten en fibra de carbono, fibra de vidrio, fibra de kevlar, alma de madera de balsa y relleno o filling de microballoon. La estructura externa del avión estará completamente terminada, excepto por el ala derecha que no llevará pintura ni ningún tipo de recubrimiento, de manera que sea fácil notar las capas y la constitución interna de la nave.

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1- Introducción a materiales compuestos

La utilización de materiales compuestos durante los últimos años ha crecido de forma acelerada debido a las propiedades y facilidades que dichos materiales presentan para la fabricación de una amplia variedad de productos en muchos los ámbitos del día a día del ser humano. Muchas industrias han incorporado los materiales compuestos para la fabricación de una inmensa diversidad de productos encontrando de esta manera un mercado bastante amplio y con grandes proyecciones para el futuro.

La producción de materiales compuestos se desarrolla rápidamente con un crecimiento aproximado del 6% anual, en cantidad. Aunque su costo de fabricación es más elevado que el de los materiales tradicionales, aportan a sus usuarios importantes ventajas gracias a sus propiedades, en particular la ligereza y la resistencia. Tales ventajas han abierto a los materiales compuestos importantes mercados en la construcción de automóviles, la aeronáutica e incluso en la construcción.

Tomando como ejemplo a Francia donde en el año 2000 se produjeron 300000 toneladas se puede decir que el sector de los materiales compuestos todavía es pequeño si se compara su producción con los 18 millones de toneladas de metales elaboradas anualmente. (1)

**Pero que son los materiales compuestos?** La definición más comprensible y completa dice lo siguiente: dos o más sustancias al ser combinadas producen un material con propiedades diferentes y mejoradas las cuales no tendrían si dichas sustancias se utilizaren por separado. El producto final obtenido es llamado material compuesto o composite.

---

(1) Tomado de <http://callisto.my.mtu.edu/my4150/index.html>

Son materiales heterogéneos, integrados por una matriz orgánica (polímero termoendurecible o termoplástico) y una estructura de refuerzo que puede presentarse en forma de partículas, fibras cortas, largas o continuas. Los refuerzos que más corrientemente se utilizan son las fibras, generalmente de vidrio, de carbono o de arámida.

Según las características de la matriz y de los refuerzos, se distinguen generalmente dos grandes familias: los materiales compuestos de gran difusión, poco onerosos, que ocupan una cuota importante del mercado, y los materiales compuestos de altas prestaciones. Estos últimos, generalmente reforzados con fibras continuas de carbono o de arámida, están reservados a sectores de alto valor agregado como son la aeronáutica, medicina, deportes y recreación.

### 1.1.1- Historia de los Materiales compuestos

Los primeros materiales compuestos propiamente dichos aparecieron durante la Segunda Guerra Mundial, sin embargo la utilización de las fibras se remonta a muchos años atrás, pues en 1893 se fabricaron los primeros vestidos para mujeres con fibra de vidrio.

Tabla 1.1 Historia de los materiales compuestos.

<b>Historia de los materiales compuestos</b>	
<b>1713</b>	La Real Academia de Ciencia Francesa plantea la idea de fabricar fibra de vidrio.
<b>1839</b>	Las cenizas de Napoleón fueron revestidas con un tipo de tela nunca antes visto que contenía una combinación de fibra de vidrio y seda.
<b>1893</b>	Se fabrican los primeros vestidos para mujeres a partir de fibra de vidrio.
<b>1943</b>	La parte posterior del fuselaje del BT-15 (avión de entrenamiento) fue diseñado con alma de madera de balsa y piel de fibra de vidrio.
<b>1961</b>	Se produce el filamento de carbono.
<b>1965</b>	Se produce el Borón. Grumman/General Dynamics desarrollo el F-111 para alta temperatura (600 F).

<b>1971</b>	Dupont empieza a fabricar la fibra de poliaramida y la bautiza como Kevlar.
<b>1975</b>	El S-76, un helicóptero comercial cuyo estabilizador es constituido completamente de Kevlar y panal de abejas de Nomex, se convierte en la primera aeronave con materiales compuestos, certificada por la FAA

## **1.2- Ventajas y desventajas de los materiales compuestos frente a los materiales tradicionales**

Los materiales compuestos disponen de varias ventajas con relación a los productos tradicionales, aportando numerosas cualidades funcionales tales como: ligereza, resistencia mecánica y química, mantenimiento reducido y libertad de formas. Su uso permite aumentar la vida útil de ciertos equipos gracias a sus propiedades mecánicas (rigidez, resistencia a la fatiga) y también a sus propiedades químicas (resistencia a la corrosión). También refuerzan la seguridad ya que presentan una mejor resistencia a los impactos y al fuego, ofreciendo un mejor aislamiento térmico o fónico y, para algunos de ellos, eléctrico. También enriquecen las posibilidades de diseño, permitiendo aligerar estructuras y realizar formas complejas, aptas para cumplir varias funciones.

Para muchas fibras reforzantes de materiales compuestos, se ha comprobado, que aguantan sin romperse hasta la tensión de rotura, cuando la relación entre su longitud y su diámetro es de 100:1.

Entre las desventajas que presentan los materiales compuestos es que estos sufren de una mayor degradación debido a los rayos Ultravioleta (UV) y al calor que los materiales convencionales, este caso se presenta mayoritariamente en aquellos materiales que son fabricados con espumas y fibra de vidrio.

Sin embargo la mayor desventaja que afrontan las industrias consumidoras es el costo de los materiales compuestos o composites pues es muy superior al de los materiales tradicionales como el acero, la madera o el aluminio debido a su

baja demanda en el mercado y a que los costes de materia prima y fabricación son muy elevados.

Ahorrando piezas de enlace y mecanización, reduciendo de manera importante los gastos de mantenimiento y aumentando la vida útil y la seguridad, las ventajas de los materiales compuestos pueden valorizarse en términos de beneficios con el uso.

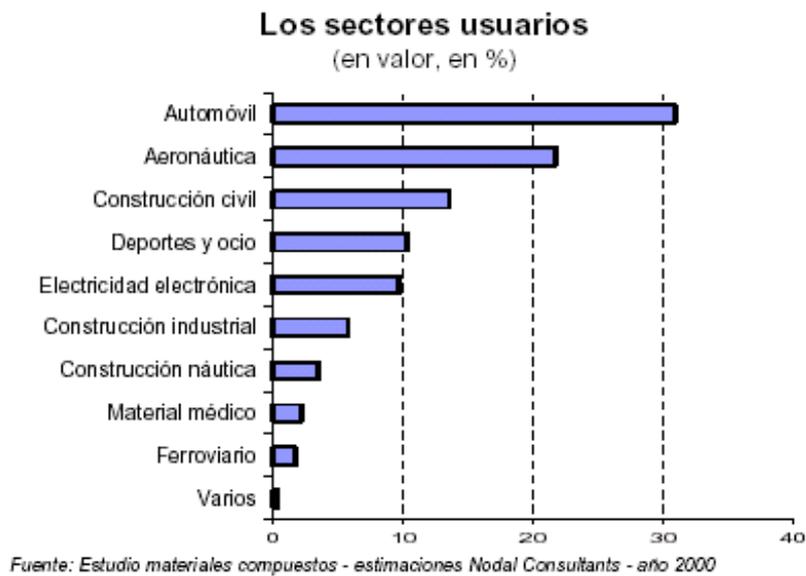


Figura 1.1 Sectores usuarios de materiales compuestos

Propiedades de los materiales «composites» por sector	
	Aeronáutica Automóvil Ferroviario Construcción Construcción Industrial Industria náutica Medicina Electricidad Deportes & Recreo
<b>Vida útil</b>	
Rigidez	x
Resistencia mecánica	x x
Resistencia a la fatiga	x x
Resistencia a la corrosión	x x x
Impermeabilidad	x x
<b>Seguridad</b>	
Resistencia a los choques	x
Resistencia al fuego	x x x
Aislamiento térmico	x x
Aislamiento eléctrico	x
Amortiguamiento, vibraciones	x
<b>Diseño</b>	
Integración de funciones	x x
Formas complejas	x x x x
Transparencia ondas electromagnéticas	
Disminución del peso de las estructuras	x x

Figura 1.2 Propiedades de los materiales compuestos

En el cuadro a continuación se presenta una comparación de las propiedades mecánicas entre diferentes materiales compuestos respecto al acero en condiciones de igualdad de peso.

Cuadro 1.1 Comparación de propiedades mecánicas

Material	Resistencia a la tracción (GPa)	Densidad (g/ccm)	Fortaleza Específica (GPa)
Fibra de Carbono	3.5	1.75	2.00
Fibra de Kevlar	3.6	1.44	2.50
Fibra de Vidrio	3.4	2.60	1.31
Acero	1.3	7.87	0.17

En la aeronáutica, los materiales compuestos aportan cinco propiedades que permiten distinguirlos de manera positiva de los materiales tradicionales:

- Aumentan la vida útil gracias a su buena resistencia a la fatiga
- Presentan alta resistencia a la corrosión.
- Aumentan la resistencia al fuego.
- Simplifican el diseño gracias a la posibilidad de la integración de función y de la obtención de formas complejas.
- Son muy livianos.



Figura 1.3 Fabricación de una estructura con materiales compuestos

Las diferentes fuerzas que se presentan en una aeronave durante el vuelo producen fatiga en los materiales; sin embargo gracias a la multiorientación de las fibras de los materiales compuestos, los puntos de presión se distribuyen a través de toda la estructura evitando el excesivo desgaste de los componentes estructurales principales logrando costos de mantenimiento inferiores y brindando mayor seguridad en la operación. Puesto que no son de naturaleza metálica la corrosión no se presenta con frecuencia en este tipo de materiales.

Con relación al peso la fortaleza obtenida al usar materiales compuestos es mayor que si se utilizaren materiales metálicos alcanzando así un mejor desempeño de la aeronave. Debido a sus propiedades los materiales compuestos aminoran el peso de cualquier parte estructural de la aeronave sin afectar de esta manera su fortaleza.

Las superficies fabricadas con materiales compuestos son más fáciles de moldear que las que son fabricadas con metales y pueden recibir formas más aerodinámicas lo cual reduce la resistencia al avance o drag de una aeronave.

Todas las propiedades alcanzadas por los materiales compuestos dependen básicamente de tres factores:

- Resina o matriz utilizada
- Tipo de fibra reforzante utilizada
- Dirección de las fibras

### **1.3- Tipos de materiales compuestos**

Los materiales compuestos se clasifican dependiendo del tipo de fibra, tipo de matriz y tipo de alma que los formen.

#### **1.3.1- Tipos de fibras**

Una fibra se define como una hebra de material que se utiliza como refuerzo debido a su alta fortaleza y rigidez. Estas hebras se utilizan para tejer telas que son las constituyentes principales de los materiales compuestos.

### **1.3.1.1- Fibra de vidrio**

La fibra de vidrio es un material sintético formado por delgadísimos hilos de vidrio de silicio que ha sido utilizado por el hombre desde hace mucho tiempo con una amplia gama de aplicaciones. Entre algunas de ellas podemos citar las siguientes: implementos deportivos, tarjetas para circuitos electrónicos, filtros de aire, tanques de agua, tuberías, veleros, etc.

En lo que al campo aeronáutico se refiere las aplicaciones de la Fibra de vidrio son muy variadas. Debido a su bajo costo y su demostrada resistencia es muy utilizado en la fabricación de superficies aerodinámicas menores, tapas de inspección, componentes de cabina de pasajeros y sobre todo para cascos de tripulación de aviones militares (debido al color blanco que lo caracteriza desvía los rayos de sol hacia fuera de la cabeza del piloto).

### **1.3.1.2- Fibra de Poliaramida (Kevlar)**

La fibra de poliaramida, más comúnmente conocido por su nombre de fábrica KEVLAR, es una fibra de tecnología avanzada que combina propiedades de gran fortaleza, elasticidad, resistencia a las vibraciones y resistencia a altas temperaturas.

El Kevlar es una fibra orgánica de la familia de las poliamidas (aramidas) aromáticas, que compagina la resistencia y el escaso peso, con la comodidad y la protección. El Kevlar es cinco veces más resistente que el acero en condiciones de igualdad de peso.

Es una fibra que tiene una estabilidad térmica y una resistencia térmica a la llama muy altas. Sus propiedades de tracción son superiores a las de las fibras textiles normales debido a un alto grado de orientación molecular resultante de sus moléculas lineales rígidas. Se utiliza ampliamente en los materiales compuestos más ligeros que los que se basan en fibra de carbono.

Su coeficiente específico de tracción es alto sin embargo su resistencia a la compresión es bastante débil.

Además de los composites para aeronaves, sus aplicaciones incluyen ropa de protección, chalecos antibalas, productos sometidos a fricción, cables, cuerdas y telas para velas de barcos.

### 1.3.1.3- Fibra de Carbono

Es un material de color negro que presenta alta fortaleza de tensión. Es muy rígido y sin embargo pesa poco. Al igual que la fibra de poliaramida es muy utilizado en estructuras que son sometidas a grandes tensiones y esfuerzos cortantes.



Figura 1.4 Hilo de fibra de carbono

Entre sus muchos usos tenemos: sellos y componentes para altas presiones, productos automotores para sistemas de combustible, bombas, alternadores, anillos de pistón, etc.

La fibra de carbono puede ser fabricada en base a dos componentes químicos diferentes conocidos como:

- PITCH (brea)
- PAN (fibras de Poliacrilonitrilo)

Las fibras basadas en PITCH poseen propiedades mecánicas inferiores y por esto son muy poco utilizadas en aplicaciones estructurales críticas.

Las fibras basadas en PAN (poliacrilonitrilo) se encuentran en continuo desarrollo y son usadas en materiales compuestos para construir piezas livianas pero de gran resistencia.

#### **1.3.1.4- Fibra de Borón**

Es un material altamente resistente a las tensiones y a las vibraciones sin embargo la principal característica de este es su rigidez. Por esta razón se utiliza en la fabricación de superficies de control de aviones supersónicos como el F-16 o el Hornet.

Las fibras de borón son obtenidas mediante un proceso químico de deposición por vapor en el cual el Boro es depositado en fibras de tungsteno para de esta forma reforzar las telas.

Pese a sus demostradas ventajas el uso de este material es reducido pues los materiales químicos que lo forman (tungsteno y boro) al romperse o lijarse emanan un polvo muy fino que al entrar en el organismo del usuario pueden causar irritación de la piel y de las vías respiratorias o incluso cáncer.

#### **1.3.1.5- Cerámica**

Es un material utilizado en componentes estructurales de los motores y escapes de las aeronaves, pues mantiene su fortaleza y flexibilidad a muy altas temperaturas. Sus características moleculares le permiten resistir, sin deformarse, hasta 1200 grados C.

#### **1.3.1.6- Glare**

Este material consiste en una combinación de Aluminio con centro de fibra de vidrio. Presenta características muy similares a las de la fibra de vidrio excepto que el aluminio lo vuelve menos moldeable; por esta razón se evita su utilización en estructuras aerodinámicas con formas complicadas.

El glare es un tipo específico de lámina de fibra y metal (FML por sus siglas en inglés). El nuevo A380 jumbo jet de Airbus tendrá un uso extensivo de Glare en el fuselaje.

La historia del Glare se remonta a 1970 cuando la Delft University of Technology produjo el Arall, un FML constituido por arámida y aluminio. Fue usado en muchos componentes de aeronaves, pero debido a sus limitaciones estructurales y a la invención del Glare su utilización fue descontinuada.

### **1.3.2- Tipos de matriz o resina**

Las principales resinas termo rígidas son las de poliéster. Los poliésteres, pasan del estado líquido al sólido por copolimerización de la resina y de un monómero que han sido mezclados. Esta polimerización que provoca el endurecimiento se efectúa por un iniciador activo (catalizador) en combinación con otro producto químico (acelerador) y/o por aporte del calor. Esta reacción de polimerización provoca una elevación de la temperatura en el material.

Las resinas mayormente empleadas en la construcción de equipos resistentes a la corrosión son de poliéster no saturado, pudiendo elegirse un poliéster Isoftálico o bisfenólico. También existen otras resinas como son las viniliéster y las epoxies.

Es fundamental para un seguro y económico funcionamiento del material la adecuada elección de la resina. Esto requiere un conocimiento del comportamiento de las mismas frente a los productos químicos y de las características físico mecánicas del material. La mayoría de fabricantes de resinas advierten en los envases de las mismas los productos con los cuales pueden ser combinados y con cuales no.

La función de las resinas es la de unir las fibras y proteger el material del contacto con el agua, combustible y demás sustancias que pudieran ser perjudiciales para el material.

La cantidad de resina a ser utilizada en cada material compuesto dependerá de las propiedades requeridas y de las recomendaciones del fabricante. Usualmente se debe pesar y calcular la cantidad de resina a ser utilizada respecto al tipo y cantidad de fibra que será impregnada con la misma. Es recomendado no utilizar demasiada resina pues debido a sus características el exceso de esta puede volver frágil al material.

### **1.3.2.1- Resinas de poliéster no saturado**

Se clasifican en resinas de poliéster Isoftálico y poliéster bisfenólico.

Son fáciles de impregnar sobre todo en la fibra de vidrio. Poseen alta resistencia a la compresión, térmica, mecánica y química.

#### **1.3.2.1.1- Resinas de poliéster Isoftálico**

Son resinas de poliéster insaturado de altas cualidades formuladas especialmente para estructuras marinas con excelentes propiedades de curado a temperatura ambiente y conservación de las propiedades mecánicas incluso a temperatura elevada. Posee alta resistencia mecánica y química. Provee excepcional adherencia y excelente resistencia al impacto, la corrosión y el agua.

#### **1.3.2.1.2- Resinas de poliéster bisfenólico**

Son resinas termoestables producidas por la condensación de un alcohol aromático con un aldehído, particularmente fenol con formaldehído. Tienen mayor resistencia mecánica y química que las de poliéster Isoftálico.

### **1.3.2.2- Resinas de Viniliéster**

Poseen buenas cualidades mecánicas y excelente resistencia a la fatiga. Buena adhesión sobre las fibras de refuerzo, resistencia a la corrosión y a la temperatura.

### 1.3.2.3- Resinas de epoxi

La resina de epoxi es un material termo estático comúnmente usado en la construcción de aeronaves. Es utilizada para distribuir los esfuerzos sobre las fibras y mantenerlas juntas. Presenta características muy parecidas a las del plástico. Está conformada por dos partes: la resina en sí misma y el acelerante; estos al mezclarse, reaccionan entre sí emanando calor y produciendo una sustancia pegajosa conocida como matriz.

El primer componente del epoxi es un polímero de bajo peso molecular. La segunda parte es una diamina.

Al mezclar ambas partes, el diepoxi y la diamina, éstos reaccionan y se unen entre sí, de manera tal que se enlazan todas las moléculas del diepoxi y de la diamina.



Figura 1.5 Resinas de epoxi

Es decir que todas las moléculas de diamina y de epoxi se han convertido en una molécula gigantesca. Cuando esto sucede, el resultado es una sustancia rígida que puede ser muy resistente, pero no procesable. No puede ser moldeada ni fundida.

Las resinas epoxi han producido excelentes pegamentos, siendo éstos unos de los pocos que se pueden utilizar en los metales. Pero también se los utiliza como recubrimientos protectores para composites.

### **1.3.3- Tipos de Rellenos**

Los rellenos son parte importante en la creación de materiales compuestos pues le otorgan a la pieza estructural una superficie mucho mas uniforme y lisa al ser mezclados con la matriz.

Se aplican también para incrementar la viscosidad de la resina reduciendo la densidad y el costo de la misma.

Entre los rellenos mas importantes utilizados se encuentra el microballoon que son esferas microscópicas de vidrio y fenólicas que tienen la apariencia de polvo.

### **1.3.4- Materiales pre impregnados**

Son materiales que vienen con la matriz impregnada desde fabrica, lo cual hace más fácil su utilización debido a que el usuario no necesita pesar la cantidad de resina a ser empleada. Sin embargo existen también varias desventajas. A continuación una breve explicación de las ventajas y desventajas sobre la utilización de materiales pre-impregnados.

#### **1.3.4.1- Ventajas de los pre-impregnados**

- Contienen la cantidad apropiada de matriz
- No hay distorsión del material
- Eliminación del pesaje manual y el requerimiento de mezclado
- Produce un componente mas fuerte de reparación
- Reduce el tiempo de reparación o fabricación

#### **1.3.4.2- Desventajas de los pre-impregnados**

- Deben ser conservados en refrigeración
- Deben ser transportados en refrigeración

- Tienen una reducida vida útil
- Son más costosos que los materiales crudos
- No existe estandarización
- Debe ser comprado en rollos completos

### **1.3.5- Tipos de Almas para materiales compuestos**

El alma de un material compuesto es el miembro central del mismo. Produce componentes de bajo peso y alta fortaleza. Puede aumentar significativamente el volumen de una pieza estructural con un aumento mínimo de peso.

Existen tres tipos básicos de almas:

- Panal de abejas (honeycomb)
- Espumas o foams
- Madera

#### **1.3.5.1- Panal de abejas (honeycomb)**

Es conocido como panal de abejas debido a la forma estructural que posee. Debe su apariencia a la unión de un número infinito de hexágonos. Cada hexágono es una estructura es muy firme, resistente y que no puede ser aplastada fácilmente.

Las estructuras de honeycomb se pueden construir en una variedad de materiales como el caucho, Kevlar, aluminio, papel, etc.

Un balance conveniente entre fuerza, resistencia y peso alcanzado con este tipo de materiales celulares, los hace muy atractivos para diferentes tipos de aplicaciones en la industria aeronáutica y aeroespacial.

La industria aeronáutica utiliza los honeycomb para obtener productos más livianos con mejores propiedades mecánicas y menor peso.

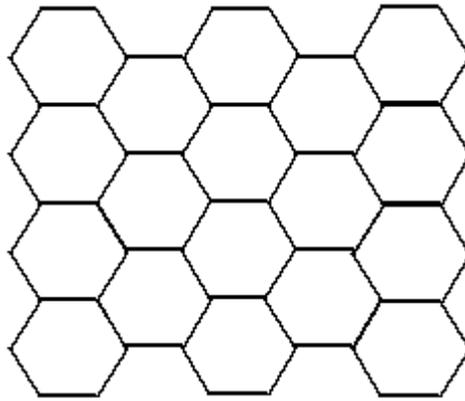


Figura 1.6 Forma básica de un Honeycomb

### **1.3.5.2- Espumas o Foams**

Al igual que los honeycomb las espumas sirven de relleno o alma del material y se clasifican de la siguiente manera:

#### **1.3.5.2.1- Styrofoam**

Es una espuma de poli estireno moldeada al calor. Es resistente al agua, tiene altos valores de aislamiento y es muy resistente a la compresión.

#### **1.3.5.2.2- Uretano**

Es un material formado a base de una serie de POLÍMEROS (cadenas entrelazadas de moléculas) cuyo componente básico es el grupo URETANO (formado por Carbono, Nitrógeno, Oxígeno e Hidrógeno). Se caracteriza por poseer muy buena elasticidad lo que permite lograr una gran variedad de productos con los que se fabrican componentes de aeronaves con óptimas propiedades mecánicas, según lo requiera cada aplicación específica.

Posee altísima resistencia a la abrasión, excepcional absorción de impactos, excelente resistencia al corte y desgarre, liviano y flexible, resistente a la corrosión y peso muy reducido.

#### **1.3.5.2.3- Poli vinyl Clorato (PVC)**

Es un material termoplástico compuesto de polímeros de vinyl clorato. Es ampliamente utilizado para coberturas de cables y para equipo de protección personal.

#### **1.3.5.2.4- Strux**

El strux es un sellante muy utilizado en la construcción y reparación de materiales compuestos que son curados a temperaturas de 400 grados F.

Es de color gris claro y se cura después de 23 horas de haber sido aplicado. Provee buena resistencia a los esfuerzos. Se adhiere con mucha fuerza. Tiene la propiedad de expandirse dentro de los poros del material.

#### **1.3.5.3- Madera**

La Madera de Balsa es ampliamente usada en combinación con fibras para producir materiales compuestos debido a que presenta alta resistencia al esfuerzo de tensión y gran elasticidad además de peso reducido.

### **1.4- Ciencia de las fibras**

Se conoce como ciencia de las fibras a la posición en que las mismas son colocadas para producir la mayor fortaleza frente a un esfuerzo específico. La fuerza obtenida por un material compuesto siempre tendrá la misma dirección que la de la fibra utilizada.

Es de vital importancia colocar las fibras en la dirección del esfuerzo producido pues de lo contrario los efectos sobre la estructura de la aeronave pueden ser devastadores.

Al colocar la fibra en dirección paralela al esfuerzo producido su eficiencia o resistencia a dicho esfuerzo tendrá una relación óptima de 1 a 1. Sin embargo si

la fibra fuese colocada a 90 grados de la dirección del esfuerzo, dicha fibra tan solo tendría 1/5 de su eficiencia o resistencia.

En la tabla a continuación se ejemplifican la posición de las fibras respecto a la dirección del esfuerzo y su eficiencia frente a los mismos.

Tabla 1.2 eficiencia de las fibras respecto a su orientación

Orientación de las fibras	Dirección del esfuerzo	Eficiencia de las fibras
Paralelo	Paralelo	1
Aleatoria	Otra dirección	3/8
Aleatoria	Perpendicular	1/5

Existen varios componentes que definen la dirección de la fibra utilizada. Estos son:

- **Warp:** son los hilos que corren a lo largo de la tela. Se designa como 0 grados
- **Weft (fill):** son los hilos que corren perpendicularmente al warp (90 grados)
- **Bias:** se encuentran a 45 grados del warp
- **Selvage edge:** paralelo al warp

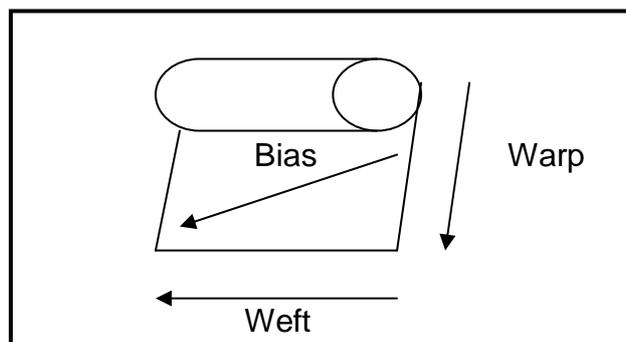


Figura 1.7 Dirección de las fibras

### 1.5- Tipos estructurales de fibras

Existen tres tipos de fibras clasificados de acuerdo a su estructura.

- **Unidireccional:** fibra orientada de manera que todas las fibras mayores corren en una misma dirección.
- **Bidireccional o multidireccional:** corre en dos o más direcciones.
- **Mats:** son tejidos que corren en todas las direcciones.

## 1.6- Híbridos

Los híbridos son mezclas de dos o más fibras creados para recibir los beneficios de cada uno de los materiales que los conforman. Por ejemplo pueden construirse híbridos de fibra de carbono y kevlar o de fibra de vidrio y carbono.

Los híbridos pueden ser formados por fibras que se encuentren tejidas unas con otras o pueden ser construidos colocando una capa o sobre otra.

Las ventajas conseguidas con un híbrido dependerán de los materiales utilizados para crear el mismo.

## 1.7- Utilización de materiales compuestos en aviación

La aeronáutica y el ámbito espacial utilizan materiales compuestos de alto rendimiento. Los costos son altos: pueden alcanzar 38 Euros por kilo en caso de utilizar masivamente refuerzos con fibra de carbono. El sector aeronáutico constituye una importante parte del mercado en valor de los compuestos (22%), mucho menor en volumen (aproximadamente el 4%).(2)

En la aeronáutica, los materiales compuestos se han impuesto mayoritariamente para fabricar piezas de estructura primarias, gracias a sus facilidades, sus cualidades de ligereza y su flexibilidad de forma.

Tramos centrales de aviones, vigas centrales que otorgan rigidez al fuselaje del A 340 - 600, los extremos de alas del ATR 72 son solo unos pocos ejemplos de ello.

Al utilizar materiales compuestos en varias estructuras primarias se puede lograr una disminución total en el peso de la aeronave. En un Airbus la reducción de peso producida es de 450 kilos, lo cual permite acoger seis pasajeros adicionales. Una disminución de 100 kilos en la estructura de un cohete alarga su trayectoria en 100 kilómetros. Los materiales compuestos también tienen muy buena resistencia a la corrosión, lo cual reduce en consecuencia los gastos de mantenimiento: las palas de helicóptero de materiales compuestos hay que cambiarlas al cabo de varios meses de utilización y las de metal cada 50 horas.

Entre los muchísimos ejemplos de aeronaves que utilizan materiales compuestos para sus elementos estructurales se encuentran los siguientes:

Boeing 777, Airbus A-340, F-20, X-29 (contiene 150 laminas de fibra de carbono unidireccional), Harrier (hecho con Borón y fibra de carbono), Embraer 120, Bell 444 (con alma de Nomex), Starship (completamente de material compuesto), Cirrus SR-20 y el DA-40 Diamond Star (modelo escogido para la realización del presente proyecto).



Figura 1.8 Aeronave DA – 40 Diamond Star

---

(2) Tomado de <http://callisto.my.mtu.edu/my4150/index.html>

## **1.8- Utilización de materiales compuestos en otros campos**

A pesar de que la utilización de materiales compuestos en aviación es un campo relativamente nuevo, las bondades de los mismos han sido utilizadas y desarrolladas en otros ámbitos desde hace mucho tiempo atrás. Tal es el caso de los implementos deportivos como son las raquetas de tenis, palos de golf, arcos y flechas, bicicletas, tablas de surf y snowboarding y muchos otros que por su bajo peso y gran durabilidad se han convertido en los favoritos de los deportistas profesionales.

El sector del automóvil es uno de los campos mas avanzados en lo que a compuestos se refiere. La Fórmula 1, donde los materiales son sometidos a rigurosas pruebas antes de formar parte de un auto para el público en general, utiliza los materiales compuestos en casi un 80% de la constitución total de los prototipos. Estos materiales se utilizan para reforzar paneles de revestimiento, crear deflectores, elementos de carrocería, elementos de defensa y hasta frenos.

Ofrecen gran libertad a los diseñadores y la disminución de peso total en un vehículo permite gran ahorro de carburante y mayor velocidad.

Una mención especial se merecen los nuevos frenos de cerámica presentados por Porsche como una de las novedades en el concept car Carrera GT. Los frenos cerámicos se denominan Porsche Ceramic Composite Brake (PCCB), que básicamente consisten en unos discos cerámicos dotados de conductos de autoventilación. El uso de este material ofrece una capacidad y una eficacia mayores, marcando un importante avance en la tecnología de los frenos.

Las ventajas de este nuevo sistema se concentran en su capacidad de repuesta sobre pavimentos húmedos o secos, sus propiedades antifading, la estabilidad en la frenada, el menor peso del conjunto y la larga vida de los discos debido a su altísima resistencia a la temperatura.

El sector de la construcción eléctrica y electrónica utiliza en gran cantidad materiales compuestos de gran difusión que corresponden a necesidades de

seguridad: aislamiento eléctrico y transparencia a las ondas electromagnéticas. Estos composites sirven para realizar equipos fiables y de mayor vida útil: armarios, disyuntores, cajas de contadores, torres, antenas parabólicas, etc.

La construcción a gran escala también le debe mucho a los materiales compuestos. Los puentes y edificios modernos son construidos utilizando fibra de carbono la cual es insertada dentro de los metales para otorgar mayor resistencia a los esfuerzos presentados por la naturaleza.

En la actualidad se construyen varias estructuras utilizando también fibras biodegradables como son las fibras de plátano y de piña que otorgan a las construcciones bastante flexibilidad y evitan eventuales fracturas en caso de movimientos telúricos.

### **1.9- Procesos de fabricación de materiales compuestos**

Existen diferentes tipos de procesos para fabricar materiales compuestos:

**Wet lay-up (amontonamiento):** Este método para construir materiales compuestos se refiere a colocar varias capas de fibra reforzante (impregnadas en resina) una sobre otra y formar de esta manera una estructura sólida.

**Vacío:** Es un método que aplica presión atmosférica sobre un material compuesto durante su curación para de esta manera obtener una mejor unión de las capas.

**Moldeado por compresión:** Proceso mediante el cual se aplican fibras y resina sobre un molde macho y luego se cierra con un molde hembra presionando ambos para obtener diferentes formas. Se utiliza sobre todo para piezas muy detalladas.

**Moldeado por expansión térmica:** Dentro de los moldes se coloca una espuma y luego se aplica calor el cual hace que la espuma se expanda dando forma a la pieza deseada.

**Pultrusion:** Es un método de aplicar presión y calor para conseguir una pieza determinada. Muy utilizado con el glare.

**Filament winding:** proceso de tejer hilos de fibra alrededor de un molde para producir una estructura.

## **CAPÍTULO II**

### **ESTUDIO DE ALTERNATIVAS**

#### **2.1- Identificación de alternativas**

Con el fin de otorgar la resistencia y forma que el híbrido requiere y para fines didácticos, las alternativas propuestas, evaluadas bajo el parámetro que se refiere al tipo de alma a ser utilizado, son las siguientes:

- Construir un prototipo con alma de honeycomb.
- Construir un prototipo con alma de espuma.
- Construir un prototipo con alma de madera de balsa.

#### **2.1.1- Primera alternativa: Construir un prototipo con alma de honeycomb**

El honeycomb puede estar formado en cualquiera de los siguientes materiales:

- Papel
- Aluminio
- Nomex

#### **2.1.2- Segunda alternativa: Construir un prototipo con alma de espuma**

El tipo de espuma a ser utilizado puede ser cualquiera de los que se citan a continuación:

- Foam
- Urethano
- PVC (poli vinyl clorato)

#### **2.1.3- Tercera alternativa: Construir un prototipo con alma de madera de balsa**

## **2.2- Estudio de factibilidad**

El presente estudio pretende definir cual será la mejor opción de construcción evaluando las ventajas y desventajas que cada una de las alternativas presenta respecto a varios factores:

### **2.2.1 Primera alternativa: Construir un prototipo con alma de honeycomb**

Ventajas en la utilización de honeycomb:

- Resistente
- Viene en cualquier tamaño
- Se le puede dar el tamaño deseado
- Compatible con cualquier material
- Bastante moldeable (papel y Nomex)
- Durable
- Fácil de manejar

Desventajas en la utilización de honeycomb:

- Demora mucho tiempo para unirse con las fibras.
- Si existe exceso de resina puede deformarse
- Si se moja se produce delaminación (papel)
- Difícil de darle forma (Aluminio)
- Produce corrosión al estar en contacto directo con la fibra de carbono (Aluminio)
- Costoso (Aluminio)
- Muy costoso (Nomex)
- Difícil de trabajar
- Difícil de maquinar
- Delicado (puede ser dañado por las herramientas)

### **2.2.2 Segunda alternativa: Construir un prototipo con alma de espuma**

Ventajas en la utilización de espumas:

- Muy moldeable
- Fácil de utilizar
- Fácil de cortar utilizando alambre de resistencia(calor)
- Adquiere cualquier forma
- Peso reducido
- El PVC puede regresar a su forma original después de haber recibido un golpe (elasticidad).

Desventajas en la utilización de espumas:

- Se necesita de máquinas especiales para adherirlo.
- Muy costosos
- No son compatibles con todas las resinas, el calor producido entre la fibra y la resina puede deformarlo.
- No forma un solo cuerpo entre la fibra y la resina (mala adherencia)
- Se desperdicia demasiado material debido a que las resinas utilizadas vienen en presentaciones demasiado grandes.

### **2.2.3- Tercera alternativa: Construir un prototipo con alma de Madera (balsa)**

Ventajas en la utilización de madera de balsa:

- Bajo costo con relación a los anteriores.
- Fácil de conseguir.
- Fácil de moldear
- Liviano
- Se le puede otorgar cualquier forma
- Viene en cualquier tamaño
- Resistente

Desventajas en la utilización de madera de balsa:

- Delicada en el manejo.
- Necesita de tratamientos especiales para que dure respecto a agentes orgánicos.

- Nunca dos piezas de madera balsa presentaran las mismas propiedades mecánicas debido a su constitución.

### 2.3- Parámetros de evaluación

Para proceder a la evaluación de cada una de las alternativas propuestas se toma en cuenta las ventajas y desventajas que cada una presenta y se procede a darle una puntuación desde 0.1 a 1. La opción que obtenga el puntaje más alto será seleccionada para ser utilizada en la construcción.

Los parámetros de evaluación propuestos son los siguientes:

#### **Factores mecánicos:**

- Resistencia
- Durabilidad
- Moldeabilidad
- Maquinado
- Peso

#### **Factores financieros:**

- Costo del material
- Costo de fabricación

#### 2.3.1 Factores mecánicos

- **Resistencia del material:** Se refiere a la capacidad del material de absorber las fuerzas y cargas a las que será sometido el prototipo durante la construcción.
- **Durabilidad:** Se define como el tiempo de vida límite de un material.
- **Moldeabilidad:** Es la capacidad que tiene el material para recibir una forma determinada.

- **Maquinado:** La facilidad para ser trabajado con máquinas y procesos de formación: cortado, doblado, taladrado, etc se define como maquinado.
- **Peso:** Como se vio en el Capítulo I el peso es uno de los factores más importantes en la construcción de materiales compuestos.

### 2.3.2- Factor financiero

- **Costo del material:** El costo del material dependerá básicamente de la cantidad de material a ser utilizado y de la factibilidad para conseguir el mismo.
- **Costo de fabricación:** Dentro de este aspecto se encuentran contemplados los costos de utilización de herramientas, maquinas, electricidad y horas hombre.

### 2.4- Matriz de evaluación

Parámetros de evaluación	f. pond. X %	Alternativas		
		1	2	3
<b>Factores mecánicos</b>				
Resistencia	0.6	0.7	0.8	0.8
Durabilidad	0.6	0.7	0.7	0.6
Moldeabilidad	0.8	0.6	0.8	0.8
Maquinado	0.7	0.4	0.7	0.8
Peso	0.9	0.8	0.7	0.6
<b>Factores financieros</b>				
Costo material	0.8	0.4	0.3	0.8
Costo fabricación	0.7	0.5	0.5	0.7

### 2.5- Matriz de decisión

Parámetros de evaluación	f. pond. X %	Alternativas		
		1 x X	2 x X	3 x X
<b>Factores mecánicos</b>				
Resistencia	0.6	0.42	0.48	0.48
Durabilidad	0.6	0.42	0.42	0.36
Moldeabilidad	0.8	0.48	0.64	0.64
Maquinado	0.7	0.28	0.49	0.56
Peso	0.9	0.72	0.63	0.54
<b>Factores financieros</b>				
Costo material	0.8	0.32	0.24	0.64
Costo fabricación	0.7	0.35	0.35	0.49
<b>Total</b>		2.99	3.25	3.71

## **2.6- Selección de la mejor alternativa**

Una vez finalizados los estudios de factibilidad y habiendo comparado las alternativas mediante las matrices de decisión y evaluación se concluye que la mejor decisión sería fabricar un prototipo que contenga un centro o alma formado completamente por madera (balsa).

La elección se basa sobre todo en la factibilidad de conseguir el producto, su bajo costo y la facilidad de construcción usando procedimientos y herramientas tradicionales.

Debido a que es un elemento de instrucción el prototipo será construido tomando en cuenta la factibilidad para ser transportado, el peso y la posibilidad de apreciar las diferentes estructuras que lo forman.

## **CAPÍTULO III**

### **CONSTRUCCIÓN**

#### **Introducción**

En el presente capítulo se resume las principales características de los procesos de construcción, ensamblaje y terminado llevados a cabo durante la construcción del prototipo a escala.

La construcción del DA-40 Diamond Star está constituida de varios procesos que incluyen: cálculo de las medidas para construir el avión a escala, formación del alma de madera, terminado de la misma, construcción del tren de aterrizaje, unión de las piezas estructurales, aplicación de las fibras con resina mediante el método de symetrical Lay-up, aplicación del microballoon, terminados finales, pintura, etc.

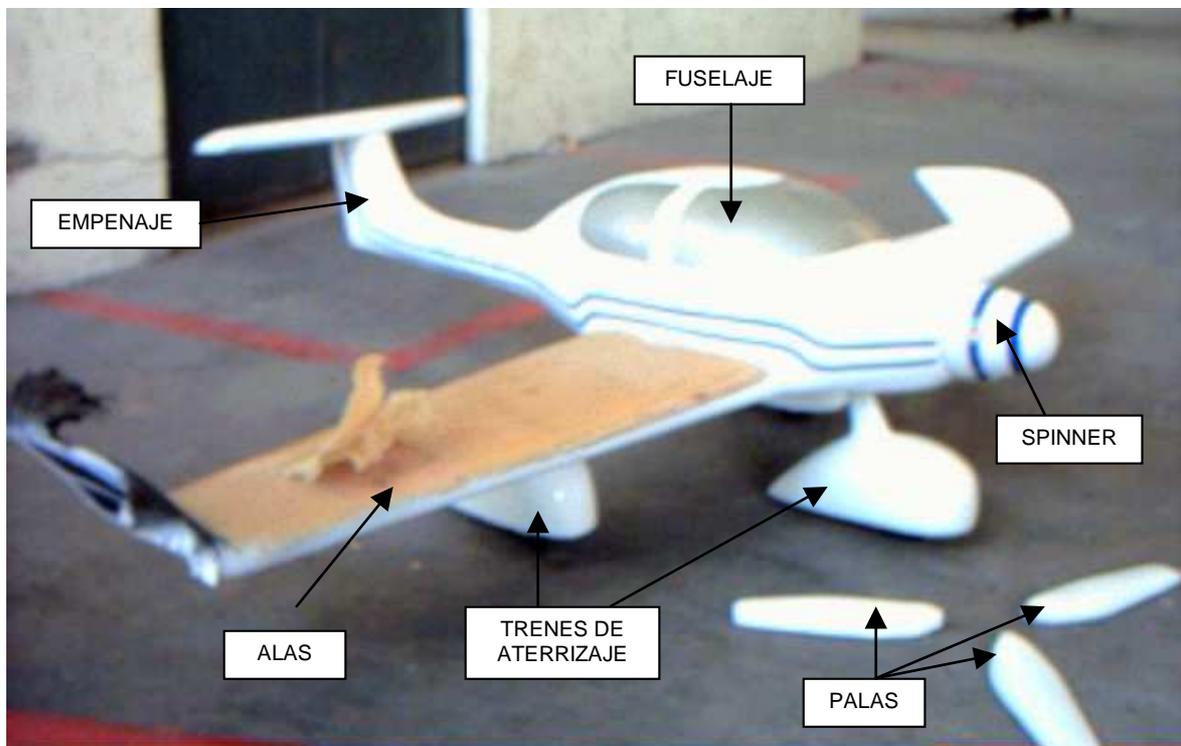
Se ha tomado como modelo la aeronave DA-40 Diamond Star debido a que la misma es un ejemplo tangible de que la construcción de un avión puede ser completamente realizada en base a materiales compuestos.

Para la construcción del prototipo a escala del avión DA – 40 Diamond Star se han considerado todas las alternativas aplicables y después de realizar un estudio de factibilidad (tanto económico como constructivo) se decidió utilizar los materiales detallados a continuación:

- Madera de balsa
- Fibra de vidrio
- Fibra de carbono
- Fibra de kevlar
- Resinas
- Aluminio

Como se observó en capítulos anteriores los materiales mencionados son los más idóneos para conformar la estructura completa del prototipo en cuestión, debido a que presentan características de alta resistencia a los esfuerzos, facilidad de recibir formas aerodinámicas y sobretodo peso reducido. Adicionalmente la facilidad de conseguir el material y su bajo costo se presentan como un factor determinante en la construcción del proyecto.

En el presente capítulo se detalla el proceso de construcción de cada una de las piezas estructurales del prototipo y los materiales empleados en cada una de ellas.



### 3.1- Orden de Construcción

El orden para la construcción del prototipo es el siguiente:

1. Estructuras individuales (fuselaje, alas, empenaje, trenes de aterrizaje y hélice).
2. Ensamble de todos los elementos.
3. Aplicación de fibras.

#### 4. Terminados.

Para obtener las diferentes partes del avión se utilizaron varias máquinas herramientas existentes en el taller de estructuras de Aviones Militares del Ala No. 12 de la FAE.

Tabla 3.1 Máquinas herramientas utilizadas

<b>MÁQUINA HERRAMIENTA</b>	<b>MARCA</b>
Sierra circular	PEERLESS
Guillotina mecánica	TENNSMITH
Dobladora de cornisa	CONNECTICUT
Remachadora manual	BLUEPOINT
Taladro mecánico	CHAMPION
Lijadora neumática de alta velocidad	CHAMPION

#### 3.2- Tiempo de construcción

Para la construcción y exitosa culminación del presente proyecto se ha invertido el siguiente número de horas de máquinas herramientas y horas hombre:

Tabla 3.2 Tiempo de manufactura de los diferentes elementos

<b>ELEMENTO</b>	<b>OPERACIÓN (h)</b>								
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>Total</b>
<b>Fuselaje</b>	0.1	0.25	0.1	N/A	0.1	N/A	N/A	N/A	0.55
<b>Alas</b>	0.1	0.25	0.1	N/A	0.1	N/A	N/A	N/A	0.55
<b>Empenaje</b>	0.1	0.25	0.1	N/A	0.1	N/A	N/A	N/A	0.55
<b>Trenes de aterrizaje</b>	0.1	0.25	0.1	0.3	0.1	N/A	4	N/A	4.85
<b>Hélice</b>	0.1	0.25	0.1	N/A	0.1	N/A	N/A	N/A	0.55
<b>Prototipo</b>	N/A	N/A	N/A	N/A	0.5	0.70	7	2	10.2
<b>Total</b>	0.5	1.25	0.5	0.3	1	0.70	11	2	17.25

- A. Medición y rayado.
- B. Corte.
- C. Tallado.
- D. Doblado.
- E. Lijado.
- F. Ensamblado.
- G. Aplicación de fibras
- H. Pintura.

Existen algunas acciones realizadas, donde no se pueden determinar un número de horas de operación tales como la adquisición de la materia prima y transporte de la misma hacia el lugar de trabajo.

### **3.3- Construcción del fuselaje**

El fuselaje es la unidad estructural principal del avión, las demás unidades están directa o indirectamente unidas a este, mediante herrajes o empotramientos.

La construcción del fuselaje del modelo a escala fue realizada basándose en el plano 3.1, utilizando dos bloques de madera de balsa unidos con cola de carpintero con un volumen total de 0.025 m<sup>3</sup> (25992 cm<sup>3</sup>).

En el bloque de madera se midieron y se trazaron las líneas necesarias para proceder a cortar la madera y darle la forma deseada. El corte y la formación de la pieza fueron llevados a cabo en la sierra circular.

En la parte inferior de la pieza se realizó un destaje para asegurar la unión con las alas. Además en la parte posterior se hizo otro destaje para poder unir el fuselaje con el empenaje.

Un agujero fue realizado en la parte delantera del elemento estructural con el fin de albergar un rodamiento donde se instalará la hélice. Este trabajo se realiza con el propósito de darle movilidad al spinner de la hélice.

El siguiente paso es tallar la madera con un cepillo para otorgarle los detalles y mejorar el aspecto exterior de la pieza.



Figura 3.1 Formación de agujero para inserción de cojinete

A continuación se lija la madera para suavizar la superficie y conseguir las líneas aerodinámicas y formas complicadas.

Finalmente se inspeccionó la pieza en busca de defectos con la finalidad de corregirlos. Ahora la pieza se encuentra lista para ser ensamblada con las demás.

Cuadro 3.1. Materiales para construcción del fuselaje

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Bloque de madera de balsa.	0.025 m3
Cola de carpintero	1/8 Gl
Rodamiento ¼	1

Cuadro 3.2. Herramientas para la construcción del fuselaje

Herramientas	Cantidad
Lápiz	1
Cepillo para madera	1
Lijas No. 180	5
Sierra	1

Materia prima:

Madera de  
balsa 0.025 m<sup>3</sup>



Figura 3.2 Proceso de construcción del fuselaje

### 3.4- Construcción de las Alas

Las alas para el modelo a escala construido fueron diseñadas en base al perfil NACA 4214. Debido a que el avión construido no volará no se consideraron necesarias las pruebas en túnel de viento para las mismas.

La base para la construcción de las alas fueron dos bloques de madera de balsa de 0.0105 m<sup>3</sup> (10500 cm<sup>3</sup>) cada uno.

Al igual que en la construcción del fuselaje el primer paso fue medir y trazar las líneas de corte sobre la madera según el plano 3.2 que se encuentra en los anexos del presente proyecto de grado.

Una vez completado el trazado se procedió a cortar con la sierra circular las dos piezas de madera para otorgarles la forma deseada. Se realizó un destaje en cada pieza para poder unirlos al fuselaje otorgándoles la seguridad necesaria.

Para suavizar la superficie de la madera y darle un terminado aerodinámico se procedieron a utilizar un cepillo para madera y, posteriormente, lijas.

Una vez concluidos los procesos anteriores se llevó a cabo una inspección final de ambas piezas y se corrigió defectos.

Cuadro 3.3 Materiales para la construcción de las alas

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Bloque de madera de balsa.	0.0105 m <sup>3</sup>

Cuadro 3.4 Herramientas para la construcción de las alas

<b>Herramientas</b>	<b>Cantidad</b>
Lápiz	1
Cepillo para madera	1
Lijas	3
Sierra	1

Materia prima:

Madera de balsa  
0.0105 m<sup>3</sup>

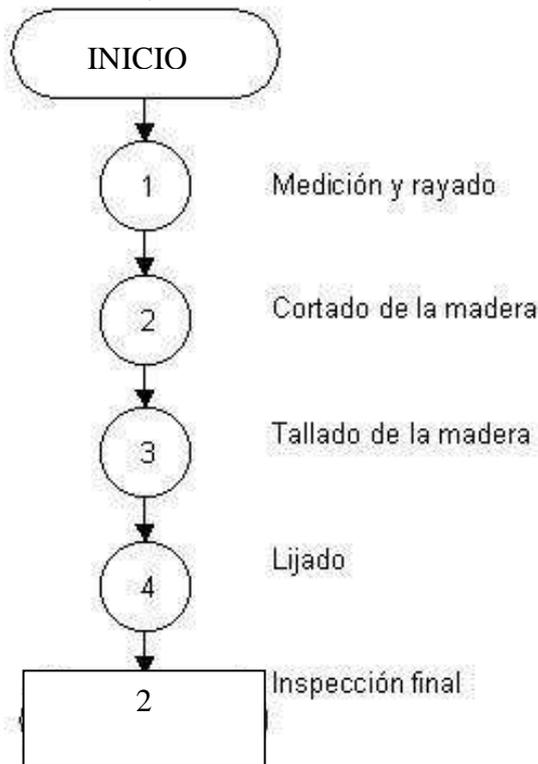


Figura 3.3 Proceso de construcción de las alas

### 3.5- Construcción del Empenaje

El empenaje o conjunto de cola en T, está constituido por el estabilizador vertical y el estabilizador horizontal que se encuentra en la parte superior.

Para la construcción del empenaje se utilizó un bloque de madera de balsa de 0.0229 m<sup>3</sup> (22960 cm<sup>3</sup>) y se procedió a trazar las líneas de corte sobre el material de acuerdo al plano 3.3.

Utilizando la sierra circular se realizaron los cortes necesarios para crear los estabilizadores vertical y horizontal dejando un destaje en la parte delantera del conjunto de cola para asegurar la unión con el fuselaje.

Con el fin de mejorar el aspecto exterior de la pieza se cepilló y lijó la misma y luego se procedió a la inspección final.

Debido a que la construcción del prototipo esta orientada a mostrar las bondades y propiedades otorgadas por los materiales compuestos en lo que se refiere al campo estructural, las superficies de control no tendrán movilidad ya que el prototipo no podrá volar.

Cuadro 3.5 Materiales para la construcción del empenaje

Materiales	Cantidad
Bloque de madera de balsa.	0.0229 m3

Cuadro 3.6 Herramientas para la construcción del empenaje

Herramientas	Cantidad
Lápiz	1
Cepillo para madera	1
Lijas	5
Sierra	1

Materia prima:

Madera de balsa  
0.0105 m3

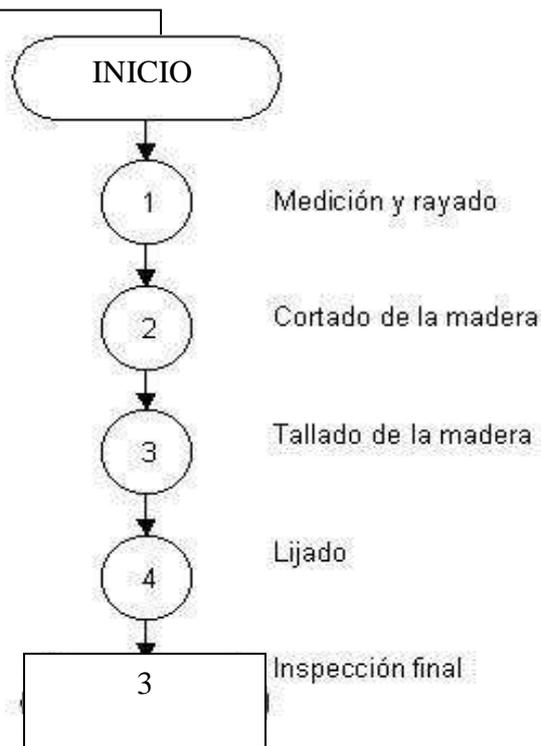


Figura 3.4 Proceso de construcción del empenaje

### **3.6- Construcción de los trenes de aterrizaje**

Los trenes de aterrizaje son los conjuntos estructurales que se encargan de la amortiguación, rodaje y apoyo de toda la aeronave.

El tipo de tren de aterrizaje construido para el modelo a escala es de tipo triciclo con el tren principal ubicado en la parte posterior.

La construcción del tren de aterrizaje se realizó en dos partes: primero el tren principal y luego el tren delantero.

La construcción del tren de aterrizaje principal fue realizada basándose en el plano 3.4 que se encuentra en el anexo A del presente proyecto de grado siguiendo el proceso detallado a continuación:

Se realizó el rayado sobre una pieza de Aluminio de 1.8 mm de espesor y utilizando una cizalla mecánica se realizaron los cortes necesarios para la formación del tren principal.

El siguiente paso fue doblar la pieza según los planos para conseguir la forma deseada y luego, utilizando un taladro de banco, se perforó la pieza en varias posiciones para poder unir el tren de aterrizaje con el fuselaje y con sus respectivas ruedas.

Los carenajes que cubren a las ruedas fueron realizados en base a dos bloques de madera de balsa que fueron cortados en la sierra circular y luego cepillados y lijados. Estos carenajes fueron perforados para permitir que la pieza metálica fuera introducida en ellos.

A continuación las ruedas fueron instaladas dentro cada carenaje y aseguradas al aluminio mediante pernos y tuercas.



Figura 3.5 Proceso de cortado de piezas estructurales

Después, cada carenaje y su extensión de aluminio fueron cubiertos con una capa de lana de fibra de vidrio impregnada en resina. La lana de fibra de vidrio es la base para el resto de fibras a ser colocadas. Después de esperar 30 minutos para que la fibra termine de curarse y endurecerse, se procedió a lijar la superficie exterior del carenaje para obtener nuevamente un aspecto liso.

Cabe indicar que para realizar el proceso de lijado se utilizó protección personal para ojos y vías respiratorias evitando que las partículas de fibra ingresen al organismo.

Con el fin de eliminar cualquier imperfección sobre la superficie se aplicó una capa de microballoon el mismo que fue previamente mezclado con resina y acelerante obteniendo una pasta de color marrón la cual es aplicada sobre la pieza construida. Después de esperar un tiempo prudente para que el

microballoon se endurezca se procedió a lijar nuevamente el carenaje y la extensión de aluminio mejorando una vez más el aspecto exterior del mismo.

Tomando la tela de fibra de vidrio y conforme a los planos se trazó (utilizando una tiza) las líneas de corte sobre la misma. La orientación de esta primera capa será de 0 grados, por lo tanto se cortó la tela con esta misma orientación.

Utilizando una balanza se pesaron los trozos de fibra y mediante el cálculo respectivo se obtuvo el valor en peso de resina a ser utilizada. La cantidad de resina que se debe emplear siempre será el  $55 \pm 5$  % del peso de la tela.

La resina (EPON 828) fue pesada y mezclada con su respectivo catalizador (DTA) en una relación de 100 partes de resina por 10 partes de catalizador. El tiempo de vida de esta mezcla es aproximadamente de 15 a 30 minutos. A continuación se aplicó la mezcla sobre la tela de fibra de vidrio. Cada trozo de tela que fue impregnado en resina es ahora colocado sobre la superficie del carenaje cuidando siempre la orientación de 0 grados.

Luego se procedió a curar la pieza utilizando luces que emanan calor exponiendo el carenaje durante 1 hora a este proceso. La temperatura de curado alcanzada fue aproximadamente de 65 grados C.

Una vez terminado el proceso se procedió nuevamente a trazar las líneas de corte sobre la tela de fibra de vidrio, pero esta vez la orientación aplicada es de 90 grados.

El proceso se repitió en su totalidad y utilizando de nuevo las luces se sometió la pieza al proceso de curado durante otra hora.

La siguiente fibra en ser cortada y colocada fue la fibra de kevlar esta vez con una orientación de 45 grados utilizando tijeras especiales específicamente diseñadas para este tipo de material. El proceso fue el mismo que el utilizado para la fibra de vidrio.

Se aplicó a continuación una segunda capa de fibra de kevlar, esta vez con orientación de – 45 grados concluyendo de esta manera la formación del carenaje del tren.

El proceso se repitió para la construcción del segundo carenaje y del carenaje del tren de nariz.

Una vez que la pieza se encuentra completamente formada se procede a la inspección final de la misma y se lijó la superficie de kevlar para producir una superficie completamente lisa.

Cuadro 3.7 Materiales para construir el tren de aterrizaje principal

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Lamina de aluminio de 1.8 mm	500 cm <sup>2</sup>
Ruedas de caucho de 3 pulg. de diámetro	2
Pernos ½ x 1 ½	2
Tuercas ½	2
Lana de fibra de vidrio	1 m <sup>2</sup>
Tela de Fibra de Vidrio 7781 P/N MIL-C-9084	1 m <sup>2</sup>
Tela de fibra de kevlar 285 P/N AMS3901	1 m <sup>2</sup>
Resina: EPON 828 con catalizador DTA	1/8 Gl
Madera de balsa	0.0030 m <sup>3</sup>

Cuadro 3.8 Herramientas para la construcción del tren de aterrizaje principal

<b>Herramientas</b>	<b>Cantidad</b>
Dobladora manual	1
Llave de ¼	2
Cizalla	1
Taladro de banco	1
Broca ¼	1

Broca 3/16	1
Lápiz	1
Lijas No. 180	8
Sierra circular	1
Tiza	1
Tijeras para kevlar	1
Tijeras	1

Materia prima:

Madera de balsa  
0.003 m3

Aluminio  
500 cm2



Figura 3.6 Proceso de construcción del tren de aterrizaje principal

La construcción del tren de aterrizaje de nariz fue realizada en base al plano 3.5 que se encuentra en el anexo A del presente proyecto.

Para la construcción del mismo se utilizó una lámina de aluminio de 1.8 mm de espesor sobre la cual se trazaron las líneas de corte y doblado.

El siguiente paso fue el corte de la pieza utilizando la cizalla y posteriormente se le otorgó la forma deseada con la dobladora.

A continuación se taladraron los agujeros que servirán para unir la pieza de aluminio al fuselaje y a su respectiva rueda.

Al igual que en el tren de aterrizaje principal el carenaje fue creado a partir de madera de balsa siguiendo los procesos de trazado, corte y lijado. Sobre este carenaje se aplicó una capa de lana de fibra de vidrio, una capa de tela de fibra de vidrio a 0 grados, una capa de tela de fibra de vidrio orientada a 90 grados, una capa de fibra de kevlar a 45 grados y una capa final de - 45 grados de fibra de kevlar.

La rueda fue colocada dentro del carenaje y unida a la pieza metálica mediante un perno y una tuerca de ¼ de pulgada.

Una vez terminado el proceso de construcción del tren de aterrizaje delantero, este es inspeccionado y se encuentra listo para ser ensamblado.

Cuadro 3.9 Materiales para el tren de aterrizaje de nariz

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Lamina de aluminio de 1.8 mm	75 cm <sup>2</sup>
Rueda de caucho de 3 pulg. de diámetro	1
Perno ½ x 1 ½	1
Tuerca ½	1

Lana de fibra de vidrio	0.5 m2
Tela de Fibra de Vidrio 7781 P/N MIL-C-9084	0.5 m2
Tela de fibra de kevlar 285 P/N AMS3901	0.5 m2
Resina: EPON 828 con catalizador DTA	1/8 GI
Madera de balsa	0.0015 m3

Cuadro 3.10 Herramientas para la construcción del tren de aterrizaje de nariz

<b>Herramientas</b>	<b>Cantidad</b>
Dobladora manual	1
Llave de ¼	2
Cizalla	1
Taladro de banco	1
Broca ¼	1
Broca 3/16	1
Lápiz	1
Lijas No. 180	8
Sierra circular	1
Tiza	1
Tijeras para kevlar	1
Tijeras	1

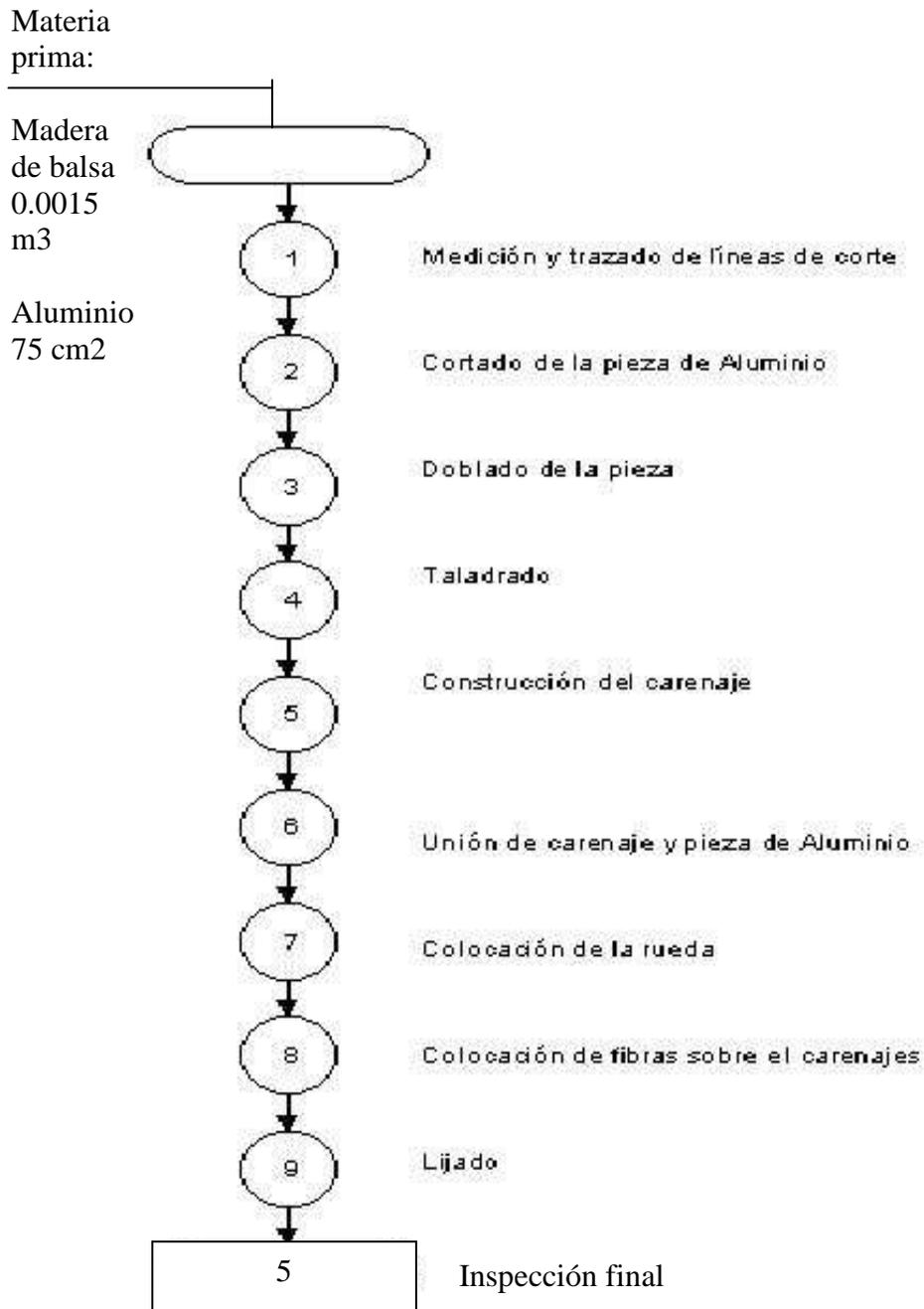


Figura 3.7 Proceso de construcción del tren de aterrizaje de nariz

### **3.7- Construcción de la Hélice**

La forma básica de una hélice es la de un ala, pero la curvatura y la cuerda (curvatura y longitud de sección cruzada) de cada sección de la hélice son diferentes. El ala provee elevación hacia arriba, mientras que la hélice provee elevación hacia delante.

Como un ala, la pala de la hélice tiene un borde de ataque grueso y un borde de salida fino. La parte trasera de la pala es la parte curva y es como la superficie superior de un ala. La parte delantera de la paleta es relativamente plana y se asemeja a la parte inferior de un ala.

La construcción de la hélice para el modelo a escala, fue realizada en base el plano 3.6 que se encuentra en el anexo A del presente proyecto de grado.

La primera parte a construir es el spinner de la hélice. Este fue construido a partir de un bloque de madera de balsa de 729 cm<sup>3</sup>. Sobre este bloque se trazaron las líneas de corte y con la ayuda de la sierra circular se dio forma a la pieza.

Utilizando nuevamente el cepillo para madera y las lijas se le otorgó al spinner una superficie lisa y aerodinámica.

Siguiendo los planos se realizaron tres agujeros en la parte delantera del spinner, en los que entrarán las palas de la hélice, y un agujero en la parte posterior, donde entrará un cojinete para hacer posible el movimiento rotativo de la hélice sobre el fuselaje.

Las tres palas fueron construidas en base al plano 3.6 del presente proyecto a partir de un bloque de madera de balsa de 684 cm<sup>3</sup>.

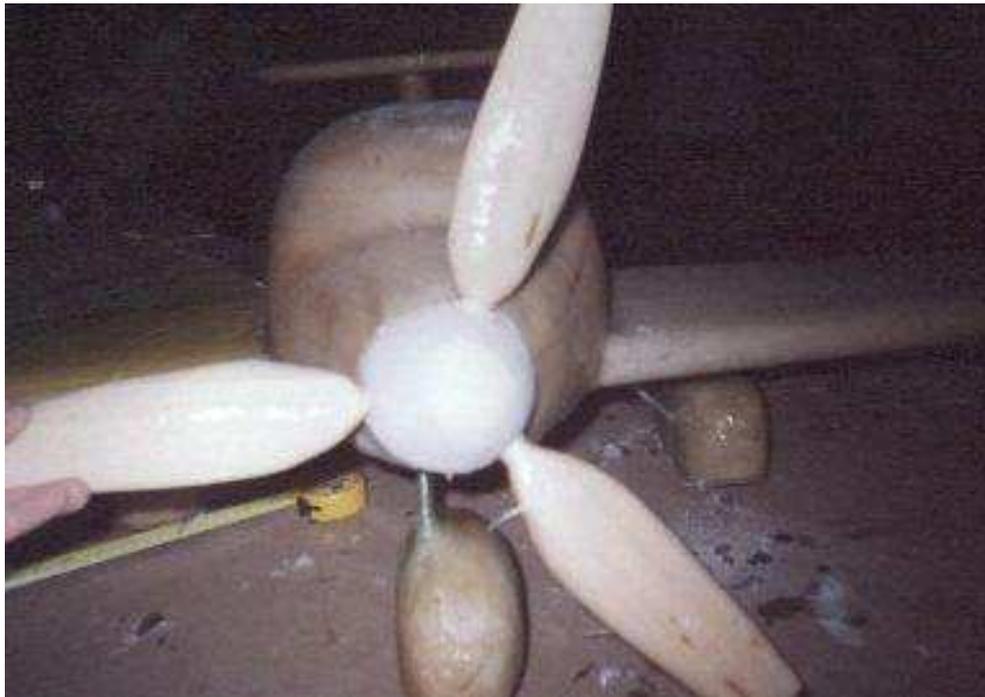


Figura 3.8 Hélice del prototipo

El proceso inicial fue el trazado de las líneas de corte sobre la madera. A continuación se utilizó la sierra circular para realizar dichos cortes.

Al igual que en las piezas anteriores, se procedió a lijar las palas con el fin de conseguir una superficie aerodinámica y lisa.

Una vez terminadas las palas, estas fueron colocadas dentro de los agujeros del spinner formando de esta manera la hélice.

Cuadro 3.11 Materiales para la construcción de la hélice

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Bloque de madera de balsa.	1413 cm <sup>3</sup>
Ruliman 1 x ¼	1
Perno ¼	1

Cuadro 3.12 Herramientas para la construcción de la hélice

Herramientas	Cantidad
Lápiz	1
Cepillo para madera	1
Lijas No. 180	5
Sierra	1

Materia prima:

Madera de  
balsa 1413 cm<sup>3</sup>



Figura 3.9 Proceso de construcción de la hélice

### 3.8- Unión de los elementos estructurales

Una vez moldeados e inspeccionados, los elementos estructurales son unidos al fuselaje mediante Cola de carpintero y tornillos. El proceso de unión y terminado es detallado en el plano 3.7.

Las primeras piezas unidas al fuselaje fueron las alas utilizando Cola de carpintero y cuatro tornillos de 1 pulgada por ala para otorgarle firmeza. A continuación fue unido el tren de aterrizaje principal mediante el uso de ocho tornillos y el tren de aterrizaje de nariz con cuatro.

Concluida esta estructura se procedió a unir el empenaje con cola de carpintero y un solo tornillo.

Cabe añadir que la firmeza de la unión de los elementos estructurales se debe a la posterior colocación de las telas de fibras reforzantes.

El último elemento añadido fue la hélice mediante la inserción del perno de la misma en el cojinete colocado en la parte delantera del fuselaje.

Cuadro 3.13 Materiales para la unión de los elementos estructurales

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Piezas estructurales	6
Tornillos	21
Cola de carpintero	1/8

Cuadro 3.14 Herramientas para la unión del prototipo

<b>Herramientas</b>	<b>Cantidad</b>
Destornillador	1
Prensa pequeña	1
Espátula	1
Lijas No. 180	10

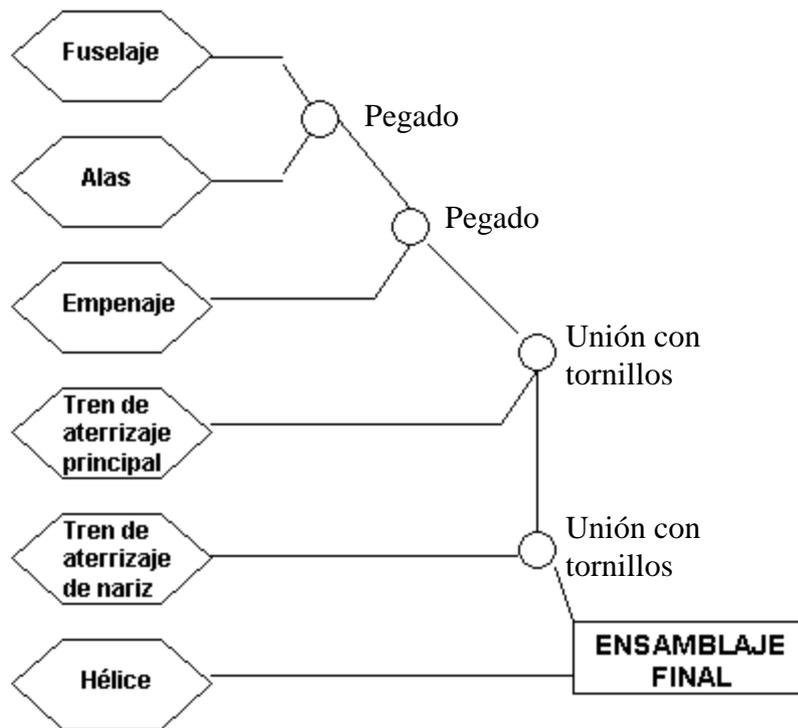


Figura 3.10 Ensamblaje de los elementos estructurales



Figura 3.11 Prototipo completamente ensamblado

### **3.9 Terminado del prototipo**

Una vez concluido el ensamblaje de las piezas y teniendo el prototipo completamente armado el siguiente proceso es cubrir toda la superficie del avión con las fibras reforzantes impregnadas en resina.

El primer paso es cortar varios trozos de lana de fibra de vidrio (los suficientes como para cubrir todas las estructuras) e impregnarlos con la respectiva resina. A continuación se cubre toda la superficie del modelo a escala con los trozos de lana de fibra de vidrio utilizando una espátula procurando que todas las superficies queden lo mas uniformes posibles.

Cuando la aplicación de la lana ha concluido, se procede a colocar el modelo a escala bajo lámparas que emanan calor para curar el material.

Después de aproximadamente 1 hora el material se encuentra completamente seco y rígido. Entonces se procede a lijar todo el modelo con el fin de conseguir superficies lisas. Seguidamente se aplica la mezcla de microballoon y resina para cubrir todas las fallas presentes en las superficies y otra vez se somete el prototipo curación. Terminado este proceso las superficies deben ser nuevamente lijadas obteniendo un fino terminado.

Basándose en las medidas de los planos de construcción se procede a trazar las líneas de corte sobre cada una de las telas de las fibras a ser utilizadas.

La primera capa será de tela de fibra de vidrio a 0 grados, la segunda será tela de fibra de vidrio orientada a 90 grados, la tercera kevlar a 45 grados, la cuarta kevlar a -45 grados y finalmente carbono a 0 grados (para cortar la tela de kevlar se debe usar tijeras especiales para este tipo de material).

Una vez obtenidos todos los trozos de tela necesarios el siguiente paso es pesar las telas de fibra de vidrio a ser utilizadas y realizar el cálculo de la cantidad de resina a ser utilizada. Se procede entonces a impregnar todos los trozos de

tela con la resina (mezclada con catalizador) y a continuación se coloca la primera capa (con orientación de 0 grados) sobre la estructura del prototipo.



Figura 3.12 Trazado de líneas de corte sobre el kevlar

Se somete nuevamente al avión a curación bajo lámparas que emanan calor durante 1 hora.

El proceso entonces se repite: se coloca la siguiente capa de tela de fibra de vidrio impregnada en resina sobre la estructura con la orientación respectiva y se deja curar durante una hora. Se procede de la misma forma con las siguientes capas hasta llegar a la última.

Finalizado el trabajo se deja reposar al avión durante una noche para que las fibras se endurezcan por completo logrando de esta manera una gran firmeza sobre todas las superficies.

El siguiente paso es lijar toda la superficie de la nave utilizando una lijadora neumática de alta velocidad con el fin de conseguir una superficie completamente lisa.

Cualquier falla detectada sobre la superficie será rellenada con microballoon mezclado con resina y nuevamente se lijará todas las superficies con una lija fina para darle un acabado muy fino.



Figura 3.13 Aplicación de matriz sobre capa de fibra de carbono

Entonces se procede a pintar el prototipo utilizando un soplete y un compresor. Se utilizará pintura de poliuretano. Luego se deja secar la pintura durante la noche.

El prototipo es inspeccionado por última vez y después de constatar que no existen fallas se da por terminada la construcción del mismo.

Cuadro 3.15 Materiales para el terminado del prototipo

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Aeronave	1
Lana de Fibra de Vidrio	4 m2
Tela de Fibra de Vidrio 7781 P/N MIL-C-9084	4 m2
Tela de fibra de kevlar 285 P/N AMS3901	4 m2
Tela de fibra de Carbono 584	1 m2

Resina: EPON 828 con catalizador DTA	¼ Gl
Microballoon	16 gr
Pintura de poliuretano	1 Gl

Cuadro 3.16 Herramientas para el terminado del prototipo

Herramientas	Cantidad
Espátula	1
Lijas No. 180	10
Tijeras para kevlar	1
Tijeras	1
Lijadora de alta velocidad	1
Discos para lijadora	4

Material:

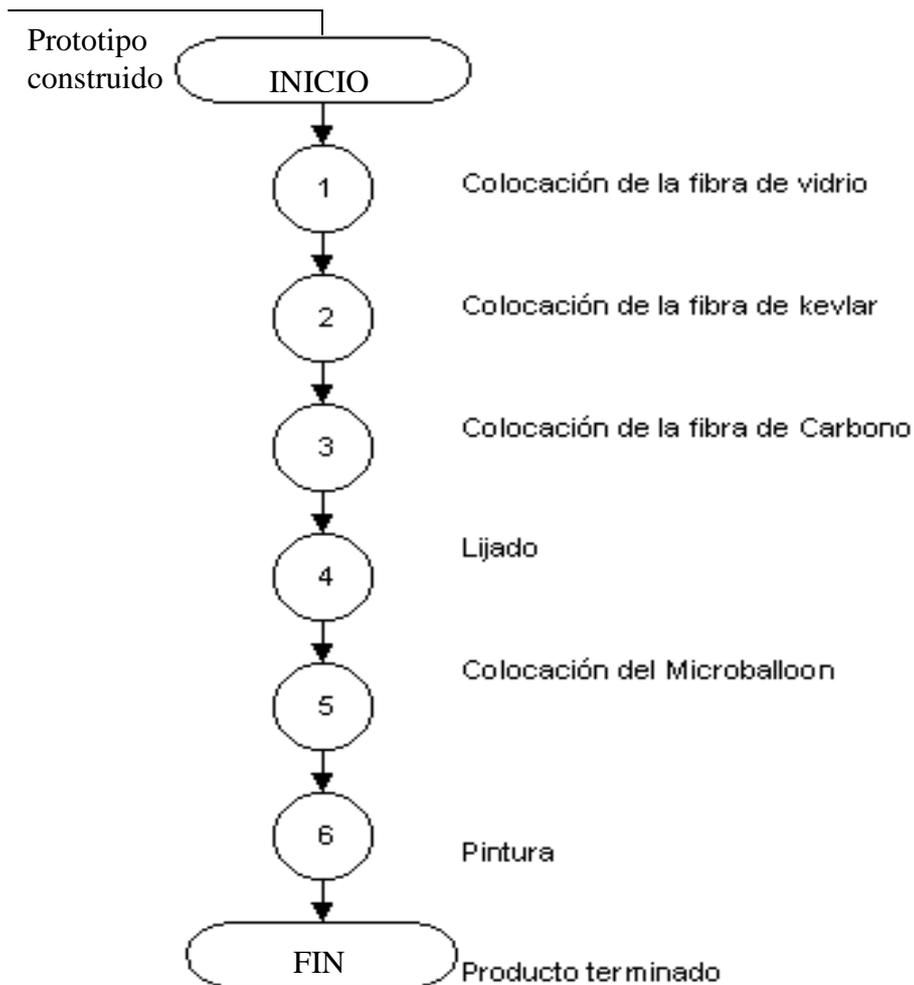


Figura 3.14 Proceso de terminado del prototipo



Figura 3.15 Avión completamente terminado

## **CAPÍTULO IV**

### **DATOS TÉCNICOS**

#### **4.1- Descripción general del prototipo**

El prototipo construido es una estructura de material compuesto basado en una aeronave DA – 40 Diamond Star fabricada por la compañía Diamond Aircraft de Austria, con medidas a escala de 1.23 metros de largo y 1.60 metros de envergadura.

Posee alma de madera de balsa y se encuentra recubierto por una capa de lana de fibra de vidrio, dos capas de tela de fibra de vidrio, dos capas de tela de fibra de kevlar y una capa de tela de fibra de carbono.

Las piernas de los trenes de aterrizaje (tanto principal como de nariz) son fabricadas en aluminio 2025 mientras que los carenajes están hechos de material compuesto (madera de balsa y fibras).

Las alas son trapezoidales con ángulo de diedro positivo y poseen winglets en las puntas.

La hélice tiene tres palas simétricamente separadas y puede girar gracias a dos rodamientos. Uno de ellos se encuentra ubicado en la parte posterior del spinner y el otro en el frente del fuselaje y se están conectados mediante un perno.

El empenaje formado por el estabilizador vertical y el estabilizador horizontal es un conjunto de cola en T (por la forma que este presenta) construido a partir de un solo bloque de madera de balsa. El estabilizador horizontal presenta un ángulo de ataque positivo y estructura en forma de flecha.

## 4.2- Características del DA – 40 Diamond Star

A continuación se presenta un breve resumen sobre la verdadera aeronave DA – 40 Diamond Star para comparación y referencia.

Es una aeronave de ala baja y diedro positivo. Posee 4 asientos y se utiliza para entrenamiento o transporte personal.



Figura 4.1 DA – 40 Diamond Star con 4 pasajeros

Posee varias ventajas:

- Visibilidad excepcional.
- Mayor Velocidad y eficiencia.
- Bajas velocidades de stall.
- Instrumentos completamente electrónicos.

Debido a su composición estructural es un avión muy seguro; los asientos tanto del piloto como del copiloto forman parte de la estructura del avión por lo tanto brindan total seguridad a los miembros de la tripulación en caso de accidente.

Las alas del DA – 40 tienen 2 spars y cualquiera de los dos puede resistir la carga alar completa; además debido a que es fabricado a partir de materiales compuestos tiene la certificación FAA de “sin límite de vida”. Los materiales compuestos no están sujetos a fatiga del material y por lo tanto es imposible que se produzcan rupturas en el aire.

Las grandes alas del DA – 40 se traducen en una corta carrera de despegue y excelentes velocidades de ascenso. El DA – 40 tiene alas relativamente grandes para su pequeño peso por lo tanto se verá más afectado por la turbulencia que otro tipo de aviones. Entonces porque no construir un avión con alas más pequeñas? Simplemente porque aeronaves con una relación de superficie alar / peso menor alcanzan velocidades muy reducidas.

El tren de aterrizaje del DA – 40 es fijo, simple y muy resistente. Está hecho de una aleación de acero y titanio. Antes de alcanzar la certificación la Diamond Aircraft voló un prototipo al cual sometió a 16000 aterrizajes sin dañar el tren.

Una de las ventajas que el DA – 40 tiene sobre otros aviones de su tipo es la hélice de madera recubierta con material compuesto. MT-propeller es la fabricante de esta hélice que tiene un borde de ataque metálico; sin embargo dicho borde no es parte estructural de la hélice lo que significa que un pequeño golpe producido por un objeto extraño no crecerá hasta convertirse en una rajadura y por ende en un catastrófico accidente.

Otra bondad de la hélice y su composición estructural es que cualquier pequeño golpe o agujero producido en cualquiera de sus caras puede ser reparada con Cola de carpintero epóxico en tan solo 15 minutos.



Figura 4.2 Hélice de un DA – 40 Diamond Star

Tabla 4.1 Principales valores del DA – 40 Diamond Star

PARÁMETRO	MEDIDA	DA 40 "Diamond Star"
Tipo de motor		Lycoming IO-360-M1A
Empuje	H.p.	180
Envergadura	M	12,0
Área del ala	M2	13,5
Altura	M	2,0
Longitud	M	8,0
Numero de asientos		4
Peso Vacío	Kg	701
Máximo peso para despegue	Kg	1150
Capacidad del tanque de combustible	L	155
Capacidad de carga	Kg	450
Carga	Kg/m2	85,2
Velocidad máxima horizontal	Km/h	283
Velocidad máxima de crucero	Km/h	283
Velocidad de crucero (75% de empuje)	Km/h	268
Velocidad de crucero (50% de empuje)	Km/h	217
Velocidad de stall	Km/h	89
Consumo de combustible a 75% de empuje (a 50% de empuje)	L/h	34 (25)
Rango (con capacidad de combustible para 45 minutos de vuelo)	Km	1100
Distancia de despegue	M	350
Rango de ascensión	M/sec	5,46
Precio	DM	245000

### 4.3- Manuales

Los manuales presentados en este capítulo están basados en los procedimientos de mantenimiento y hojas de registro de utilización para el correcto manejo y conservación de la aeronave a escala.

Los códigos de acuerdo a los procedimientos de ensayos según el manual de calidad de los laboratorios ITSA se indican en la siguiente tabla.

Tabla 4.2 Codificación de los procedimientos de construcción del DA – 40

<b>PROCEDIMIENTOS</b>
Mantenimiento
Guías prácticas
Hojas de registro

### 4.3.1- Manual de Mantenimiento

<b>ITSA</b>  	<b>MANUAL DE MANTENIMIENTO</b>		Pág.: 1 de 2
	<b>MANTENIMIENTO DEL AVION A ESCALA EN BASE A MATERIALES COMPUESTOS DA – 40 DIAMOND STAR</b>		<b>Código:</b>
<b>EMAI</b>	Elaborado por: Alexis Sánchez		<b>Revisión No: 1</b>
	Aprobado por: Sgop. Coral Iván	<b>Fecha:</b> 2003/10/31	<b>Fecha:</b> 2003/10/31
<p><b>1. OBJETIVO:</b></p> <p>Definir los procedimientos de mantenimiento para el avión a escala DA – 40 Diamond Star.</p> <p><b>2. ALCANCE:</b></p> <p>Las prácticas estándar consideradas en el presente manual comprenden a todo el mantenimiento preventivo y correctivo aplicado a la estructura del prototipo.</p> <p><b>3. PRECAUCIONES:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Los materiales compuestos al ser lijados producen pequeñas partículas de polvo el cual puede causar afecciones respiratorias si es aspirado. Use siempre equipo protector de vías respiratorias, manos y ojos al realizar actividades de lijado.</li> <li>- Las resinas, acelerantes y pinturas emiten vapores que pueden ser perjudiciales al ser aspiradas. Use siempre equipo protector para vías respiratorias y ojos al utilizar resinas, acelerantes o pinturas.</li> </ul> <p><b>4. PROCEDIMIENTOS:</b></p> <p><b>4.1 Almacenamiento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservar el prototipo cubierto en un lugar libre de polvo y humedad cuando no esté siendo utilizado.</li> <li>• No permitir que el presente equipo se encuentre en contacto directo con ácidos o sustancias corrosivas.</li> </ul>			

<b>ITSA</b> 	<b>MANUAL DE MANTENIMIENTO</b>		Pág.: 2 de 2
	<b>MANTENIMIENTO DEL AVIÓN A ESCALA EN BASE A MATERIALES COMPUESTOS DA – 40 DIAMOND STAR</b>		
<b>EMAI</b>	Elaborado por: Alexis Sánchez		Revisión No: 1
	Aprobado por: Sgop. Coral Iván	Fecha: 2003/10/31	Fecha: 2003/10/31

#### 4.2 Limpieza

La limpieza del prototipo será efectuada una vez al mes para evitar que las partículas de polvo deterioren su apariencia y la integridad del material expuesto al ambiente.

- Limpiar la sección pintada utilizando un trozo de tela húmedo que no raye la pintura retirando de este modo cualquier agente contaminante. Secar la humedad restante con un trapo seco o aire a presión.
- Limpiar la sección de material expuesto (sin pintura) con aire a presión (de preferencia aire seco)

#### 4.3 Lubricación

Las partes móviles (hélice y trenes de aterrizaje) deberán ser lubricadas una vez al mes para conservar sus ejes en buen estado.

- Utilizando un gotero lubrique los cojinetes de las hélices colocando 5 gotas en cada uno y provocando su rotación.
- Utilizando un gotero, lubrique los ejes de cada una de las ruedas de los trenes con 5 gotas en cada uno y provocando su rotación.

#### 4.4 Pintura

En caso de ser necesario o cuando la su apariencia así lo amerite el prototipo podrá ser pintado siguiendo los pasos descritos a continuación:

- Cubrir cuidadosamente el área de material expuesto para que no se vea afectado por el procedimiento de pintura.
- Lije la parte ser repintada, utilizando lija No. 180 para evitar rayones.
- Jamás utilice removedor de pintura sobre las superficies fabricadas con material compuesto pues el removedor ataca directamente a las resinas lo que provocaría debilitación y delaminación del material.
- Retire todo el polvo con aire seco.
- Aplique pintura con soplete.

#### 4.3.2- Manual de Guías Prácticas

<b>ITSA</b> 	<b>MANUAL DE GUÍAS PRÁCTICAS</b>		<b>Pág.:</b> 1 de 1
	<b>GUÍAS PRÁCTICAS DEL AVIÓN A ESCALA EN BASE A MATERIALES COMPUESTOS DA – 40 DIAMOND STAR</b>		<b>Código:</b>
<b>EMAI</b>	<b>Elaborado por:</b> Alexis Sánchez		<b>Revisión No:</b> 1
	<b>Aprobado por:</b> Sgop. Coral Iván	<b>Fecha:</b> 2003/10/31	<b>Fecha:</b> 2003/10/31

### 1. DEMOSTRACIONES DIDACTICAS

En este manual se describen las principales prácticas didácticas que pueden ser realizadas utilizando el prototipo.

#### 1.1. DEMOSTRACIÓN DE LAS DIVERSAS CAPAS DE MATERIAL COMPUESTO

Sobre el ala derecha del modelo a escala se pueden observar las diferentes capas de material compuesto. En la primera capa se puede notar la resina que cubre a la lana de vidrio. En la siguiente capa se puede apreciar la fibra de vidrio propiamente dicha en mezcla con la resina. En la tercera capa se encuentra el kevlar a 0 grados y en la siguiente el mismo kevlar pero a 90 grados. En el winglet se encuentran las mismas capas más un refuerzo superior de fibra de carbono.

El instructor podrá de esta manera demostrar varios aspectos de la utilización de materiales compuestos como son:

- La orientación de las fibras
- La configuración de layup (capas sobrepuestas)
- La diferencia entre la fibra sin resina y el material compuesto propiamente dicho.
- La diferencia entre el material en bruto y el material terminado.

#### 4.4- Hojas de Registro

Para efectuar la operación del prototipo se han elaborado varias hojas de registro que serán de utilidad tanto para instructores como para los alumnos.

Tabla 4.3 Codificación de las hojas de registro

<b>HOJAS DE REGISTRO</b>
Prácticas Didácticas
Partes y Repuestos
Mantenimiento
Libro de Vida – Daños

 <p>ITSA EMAÍ</p>	<b>REGISTRO</b>	<b>Código:</b>
	<b>PRÁCTICAS DIDÁCTICAS</b>	<b>Registro No: 1</b>

Solicitado por: .....

Hoja: ..... de .....

Fecha de inicio: ...../...../.....

Equipo Utilizado: .....

Fecha de finalización: ...../...../.....

Total de horas de instrucción: .....

Descripción de la práctica: .....

No	TEMA	OBSERVACIONES

-----  
**Responsable**

<b>ITSA</b>  <b>EMAI</b>	<b>REGISTRO</b>	<b>Código:</b>
	<b>PARTES Y REPUESTOS</b>	<b>Registro No: 2</b>

Hoja: ..... de .....

No	NOMBRE	NÚMERO DE PARTE	CANTIDAD	OBSERVACIONES
	Rueda de tren de aterrizaje principal	34 – 001 – 1		
	Rueda de tren de aterrizaje delantero	34 – 001 – 2		
	Rodamiento de hélice	36 – 001 – 1		
	Rodamiento de fuselaje	36 – 001 – 2		
	Cilindro conector hélice - fuselaje	36 – 002		
	Spinner	36 – 010		
	Palas	36 – 020		

-----  
**Responsable**

<b>ITSA</b>  <b>EMAI</b>	<b>REGISTRO</b>	<b>Código:</b>
	<b>LIBRO DE MANTENIMIENTO</b>	<b>Registro No: 3</b>

Hoja: ..... de .....

No	FECHA		TRABAJO REALIZADO	MATERIAL Y/O REPUESTO UTILIZADO	RESPONSABLE	OBSERVACIONES
	INICIO	FINAL				
	/ /	/ /				
	/ /	/ /				
	/ /	/ /				
	/ /	/ /				
	/ /	/ /				
	/ /	/ /				
	/ /	/ /				

-----  
**Responsable**

<b>ITSA</b>  <b>EMAI</b>	<b>REGISTRO</b>	<b>Código:</b>
	<b>LIBRO DE VIDA - DAÑOS</b>	<b>Registro No: 4</b>

Hoja: ..... de .....

No	FECHA	DAÑO PRODUCIDO	CAUSA DEL DAÑO	ACCIÓN CORRECTIVA	OBSERVACIONES
	/ /				
	/ /				
	/ /				
	/ /				
	/ /				
	/ /				
	/ /				
	/ /				
	/ /				

-----  
**Responsable**

## **CAPÍTULO V**

### **ESTUDIO ECONÓMICO**

En el presente capítulo se detalla el monto de la inversión utilizada para los materiales y la construcción del prototipo a escala del avión DA – 40 Diamond Star y se pretende hacer un análisis posterior respecto a la compra de un avión a escala en el exterior .

Los costos de este proyecto se justifican en la necesidad de crear un material didáctico inexistente hasta el momento y que posea una vida útil prolongada.

#### **5.1. Presupuesto**

Previo a la realización del proyecto se hizo un presupuesto estimado de 450 USD.

#### **5.2 Análisis económico y financiero**

Los principales aspectos a considerar son:

1. Materiales estructurales
2. Materiales fungibles
3. Otros

Es de suma importancia mencionar que en el presente proyecto la mano de obra fue llevada a cabo en conjunto con el asesor del mismo.

**Materiales estructurales.-** lista de todos los materiales utilizados en la constitución estructural del prototipo.

Tabla 5.1 Lista de costo de materiales

<b>MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL AVIÓN A ESCALA DA – 40 DIAMOND STAR</b>		
<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR (USD)</b>
Madera de balsa	0.15 M <sup>3</sup>	40.00
Resina EPON 828	1 GL	55.98
Catalizador DTA	1/8 GL	20.00
Pintura de Poliuretano	1 GL	30.00
Rodamientos	2	4.00
Cola de carpintero	¼ GL	2.00
Tornillos	21	0.80
Lamina de aluminio de 1.8 mm	0.75 M <sup>2</sup>	5.00
Ruedas de caucho	3	3.00
Pernos	4	0.58
Tuercas	3	0.30
Lana de fibra de vidrio	5.5 M <sup>2</sup>	8.00
Tela de fibra de vidrio 7781 P/N MIL – C – 9084	5.5M <sup>2</sup>	25.00
Tela de fibra de kevlar 285	5.5 M <sup>2</sup>	40.00

P/N AMS3901		
Tela de fibra de carbono 584	1 M <sup>2</sup>	20.00
Microballoon	16 GR	3.00
<b>Total</b>		<b>257.66</b>

**Materiales fungibles.**- Lista de los materiales que intervinieron en el proceso pero que no son parte constitutiva del modelo a escala.

Tabla 5.2 Materiales fungibles

<b>MATERIALES FUNGIBLES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL AVIÓN A ESCALA: DA – 40 DIAMOND STAR</b>		
<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR (USD)</b>
Guantes de caucho	3	3.00
Lijas No. 180	54	2.50
Discos para lijadora neumática	4	0.80
M.e.k.	1/16 gl	1.50
<b>Total</b>		<b>7.80</b>

### **Otros**

Consideramos varios rubros como gastos de transporte, servicio de Internet, impresiones de planos, cds, etc.

Tabla 5.3. Valores de otros gastos.

<b>DETALLES</b>	<b>VALOR USD</b>
OTROS	30
<b>TOTAL</b>	<b>30</b>

Tabla 5.4. Costo total del proyecto

<b>DETALLE</b>	<b>VALOR USD</b>
MATERIALES ESTRUCTURALES	257.66
MATERIALES FUNGIBLES	7.80
OTROS	30
<b>TOTAL</b>	<b>295.46</b>

### 5.3 Comparación de costos

A continuación se efectúa una comparación de costos entre el avión a escala **DA – 40 Diamond Star** construido con materiales compuestos respecto a la opción de adquirir un avión a escala en el exterior.

Tabla 5.5 Costo de un avión a escala importado

<b>DETALLE</b>	<b>VALOR USD</b>
COSTO DEL MODELO IMPORTADO	1000
<b>TOTAL</b>	<b>1000</b>

COMPARANDO COSTOS:

<b>COSTO DEL AVIÓN A ESCALA CONSTRUIDO</b>	<b>465.46 USD</b>
<b>COSTO DE LA MÁQUINA IMPORTADA</b>	<b>1.000 USD</b>

Se deduce una marcada diferencia de 534.54 USD, razón más que suficiente desde el punto de vista económico para justificar la construcción del modelo dentro del país y desechar la idea de comprarlo.

## **CAPÍTULO VI**

### **OBSERVACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este capítulo se presentan observaciones y conclusiones basadas en la experiencia adquirida y en los objetivos propuestos. Las recomendaciones se derivan de dichas observaciones y recomendaciones.

#### **6.1 Observaciones**

- Se utilizó más tiempo del propuesto en la consecución de materiales debido a la escasez de los mismos en el país. Estos materiales no son importados comúnmente debido a la poca demanda de los mismos en la industria aeronáutica ecuatoriana a pesar de que varias empresas de aviación poseen aeronaves constituidas en parte por materiales compuestos.
- Todas las alternativas consideradas para la construcción del proyecto presentaban propiedades bastante idóneas para la construcción sin embargo el costo y la facilidad de conseguirlos se convirtieron en los factores decisivos.
- Lamentablemente en nuestro país y sobre todo en el I.T.S.A. se pudo observar una reducida cantidad de información en lo que a materiales compuestos se refiere.
- La investigación sobre aerodinámica, estructuras y trenes de aterrizaje pudo ser llevada a cabo en la biblioteca del Instituto y a través del Internet.

## **6.2 Conclusiones**

- El avión fue construido, según los datos y planos especificados, constituido íntegramente por materiales compuestos cumpliendo de esta manera con los objetivos propuestos inicialmente.
- La alternativa escogida resultó ser la más idónea a pesar de las dificultades para conseguir el material.
- Una vez finalizada la investigación sobre materiales compuestos puede concluirse que la utilización de dichos materiales en diferentes campos y sobre todo en la aviación presenta grandes ventajas respecto a los materiales convencionales.
- La investigación se extendió hacia los campos de la aerodinámica y las estructuras aeronáuticas adquiriendo más conocimiento sobre estos temas.

## **6.3 Recomendaciones**

- Se recomienda que la utilización del presente material didáctico (proyecto escrito y prototipo) así como su mantenimiento y correcta utilización sean llevados a cabo por los alumnos de la especialidad de Mecánica – Estructuras del I.T.S.A.; puesto que ellos necesitarán un amplio conocimiento sobre los materiales compuestos una vez que hayan concluido su formación.
- La modernización de los textos de la biblioteca del I.T.S.A. es una necesidad urgente tanto para alumnos como para profesores.

## BIBLIOGRAFÍA

Ad Vlot. (2001). Glare: History of the Development of a New Aircraft Material. Kluwer Academic Publishers. Canada.

Elizabeth M. Red Elk. (1992). Paper Honeycomb vs. HDPE. Volume 14, U.S.

H. Nogueira y F. Jorge Lino. (2002). Production of Honeycomb Structures Based on Rapid Prototyping Process Leftovers, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

S.H. Lee. (1990), International Encyclopedia of Composites, VCH, New York

A. G. Metcalfe, (1974), Interfaces in Metal Matrix Composites, Academic Press, NY

B. R. Norton, (1974), Engineering Application of Composites, Academic Press, NY

R. K. Everett, (1991), Metal Matrix Composites, Academic Press, Boston

## NET GRAFÍA

<http://www.diamond-air.at/>

<http://callisto.my.mtu.edu/my4150/index.html>

<http://www.scientific.net>

<http://www.aviation.ru/aon/1999/index.html>

<http://www.goodfellow.com/csp/active/static/S/AR30.HTML>