



Universidad de Concepción  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Mecánica

Profesores Patrocinantes:  
Sr. Víctor Osorio L.  
Sr. Emilio Dufeu D.

**MODELACIÓN DE PIEZAS Y ELEMENTOS  
ESTRUCTURALES FABRICADOS CON PLÁSTICOS  
REFORZADOS**

Alfonso Edgardo Lavanchy Needham

Informe de Memoria de Título  
para optar al título de  
“Ingeniero Civil Mecánico”

Concepción, Agosto de 2005

## SUMARIO

---

El motivo principal por el cual se ha desarrollado el presente documento, es impulsar el desarrollo y fomentar la aplicación de los plásticos reforzados en el diseño de piezas y elementos estructurales. Para ello, se ha realizado un completo estudio sobre su comportamiento mecánico, el cual incluye una descripción cualitativa de los constituyentes que conforman el material, sus características y la forma en que pueden ser optimizados para mejorar su eficiencia estructural. Posteriormente, se han revisado algunos modelos analíticos que permiten obtener las propiedades mecánicas y predecir su comportamiento frente a un cierto estado de esfuerzos, como por ejemplo; la Ley de las Mezclas, la Ley Generalizada de Hooke, la Teoría de Vigas Laminadas, la Teoría Clásica de los Laminados (TCL), algunos de los criterios de falla para materiales compuestos, y los mecanismos básicos de fractura. Se han incluido algunos ejercicios resueltos para aplicar correctamente estas teorías, con el fin de abordar adecuadamente un problema de resistencia de materiales con plásticos reforzados. Luego, se han realizado ensayos de tracción para obtener las propiedades mecánicas de un plástico reforzado con fibra de vidrio. Las probetas de ensayos fueron fabricadas mediante el método de infusión al vacío, según la norma ASTM D3039-76. Esta experiencia ha permitido un grado de adiestramiento en la fabricación de piezas con este tipo de material, ya que a diferencia de los materiales tradicionales, la manufactura de los plásticos reforzados suele ser un procedimiento manual. Se han comprobado empíricamente los resultados obtenidos de los ensayos a tracción con los resultados teóricos, obteniendo valores con una buena aproximación. Así, se puede asumir una mínima confiabilidad en los resultados computacionales de un modelo numérico, permitiendo la realización de un análisis estructural simple, como es el caso del fuselaje de un avión no tripulado. Para dicho análisis, los casos que se tomaron en consideración fueron; la fuerza que ejerce el perno de unión (ala-fuselaje) sobre el fuselaje cuando el avión realiza una maniobra en vuelo, y las fuerzas de impacto que ocurren en el momento del aterrizaje. Se determinaron las solicitaciones en ambos casos, y luego se realizó un modelo en elementos finitos, con el cual se determinó el número de láminas y la secuencia de apilado necesarias, para que el fuselaje soporte adecuadamente la resistencia y la rigidez.

# ÍNDICE

---

<b>SUMARIO</b>	<b>i</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>ii</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	<b>iv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>vii</b>
<b>Capítulo 1 – OBTENCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS</b>	<b>1</b>
1.1 MANUFACTURA DE PROBETAS PARA ENSAYOS	1
1.1.1 Moldeo por Infusión al Vacío	2
1.1.2 Elementos Constituyentes y Fabricación de Probetas	4
1.2 PROCESO DE CARACTERIZACIÓN	6
1.2.1 Metodología para la Obtención de Propiedades	7
1.2.2 Resultados Experimentales	10
1.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	14
1.3.1 Validación de Propiedades “Off-Axis” en Láminas	14
1.3.2 Validación de Propiedades en Laminados	15
1.3.3 Análisis del Comportamiento del Material	18
<b>Capítulo 2 – ANÁLISIS DEL FUSELAJE DE UN AVIÓN NO TRIPULADO</b>	<b>20</b>
2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	21
2.2 DETERMINACIÓN DE LAS SOLICITACIONES	22
2.2.1 Solicitaciones durante el Vuelo	22
2.2.2 Solicitaciones durante el Aterrizaje	23
2.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL FUSELAJE	24
2.3.1 Análisis durante el Vuelo	26
2.3.2 Análisis durante el Aterrizaje	28
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>31</b>
<b>TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>31</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>32</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>32</b>
<b><u>ANEXOS: “Estudio de la Mecánica Elemental de Materiales Compuestos Avanzados”</u></b>	<b>35</b>
<b>Anexo A – FUNDAMENTOS DE LOS PLÁSTICOS REFORZADOS</b>	<b>36</b>
<b>A.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS PLÁSTICOS REFORZADOS</b>	<b>36</b>

A.2	CONSTITUYENTES DE LOS PLÁSTICOS REFORZADOS	37
A.2.1	Las Matrices Plásticas	37
A.2.2	Las Fibras de Refuerzo	40
A.2.3	Material de Relleno	49
A.3	OPTIMIZACIÓN DE LOS PLÁSTICOS REFORZADOS	50
A.3.1	Selección de los Materiales Constituyentes	50
A.3.2	Contenido de Fibra en el Material	51
A.3.3	Disposición y Orientación de las Fibras	55
<b>Anexo B</b>	<b>– MECÁNICA DE LOS PLÁSTICOS REFORZADOS</b>	<b>60</b>
B.1	DIRECCIONES ORTOTRÓPICAS	60
B.2	MODELO MICROMECAÁNICO: “La Ley de las Mezclas”	61
B.2.1	Módulo Elástico para una condición de Isodeformación	61
B.2.2	Módulo Elástico para una condición de Isoesfuerzo	64
B.2.3	Ley de las Mezclas para la Relación de Poisson y el Módulo de Rigidez	67
B.3	MODELO MACROMECAÁNICO: “Ley Generalizada de Hooke”	71
B.3.1	Ley Generalizada de Hooke	71
B.3.2	Ley Generalizada de Hooke en términos de Constantes Elásticas Ingenieriles	75
B.3.3	Ley Generalizada de Hooke aplicada a Láminas Delgadas	78
B.4	ANÁLISIS DE LAMINADOS: “Teoría Clásica de los Laminados”	85
B.4.1	Secuencias de Apilado	86
B.4.2	Viga Laminada Sometida a Flexión Pura	89
B.4.3	Teoría Clásica de los Laminados (TCL)	92
B.4.4	Efectos de la Secuencia de Apilado en las Matrices de Rigidez	97
B.4.5	Obtención de las Constantes Elásticas de un Laminado	100
B.5	CRITERIOS DE FALLA	103
B.5.1	Criterio del Esfuerzo Máximo (Teoría de Jenkin)	104
B.5.2	Criterio de la Deformación Máxima (Teoría de Waddoups)	105
B.5.3	Criterio de Tsai-Hill (Teoría de Interacción Cuadrática)	106
B.5.4	Criterio de Tsai-Hill/Hoffman (Criterio de Tsai-Hill Modificado)	106
B.5.5	Criterio de Tsai-Wu (Teoría General de Interacción Cuadrática)	107
B.5.6	Criterio de Hashin (Teoría de los Modos de Falla)	107
B.6	MECANISMOS DE FALLA	109
B.6.1	Falla Longitudinal por Tracción	109
B.6.2	Falla Longitudinal por Compresión	111
B.6.3	Fallas Transversales	112
B.6.4	Falla por Delaminación	112
B.6.5	Daño Progresivo en un Laminado	114
B.7	EJERCICIOS Y EJEMPLOS PROPUESTOS	117
B.7.1	Problemas de Resolución Analítica	117
B.7.2	Problemas de Resolución Numérica	128
<b>Anexo C</b>	<b>– DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS A TRACCIÓN</b>	<b>130</b>