

## Índice

Listado de figuras	iv
Listado de tablas	vii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Alcance y estructura	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
Capítulo 2. Marco teórico	3
2.1. Material compuesto	3
2.2. Material ortotrópico	4
2.3. Comportamiento elástico	5
2.3.1. Material anisotrópico general	5
2.3.2. Material especialmente ortotrópico	7
2.3.2.1. Material ortotrópico bajo esfuerzo plano	8
2.3.2.2. Relaciones esfuerzo-deformación para una lámina de orientación arbitraria	10
2.4. Fuerzas y momentos resultantes en un laminado	11
2.5. Concentración de esfuerzos	13
2.5.1. Aplicación a problemas bidimensionales	13
2.5.1.1. Solución elástica de una placa delgada de ancho infinito con un orificio circular bajo carga unidimensional	13

2.5.1.2. Concentración de esfuerzo alrededor de un orificio circular en una placa infinita de espesor arbitrario	17
2.6. Método de elementos finitos	18
2.6.1. El cuadrilátero de cuatro nodos	18
2.6.1.1. Funciones de forma	18
2.6.1.2. Matriz de rigidez del elemento	20
2.7. Casos de estudio anteriores	22
Capítulo 3. Materiales y métodos	23
3.1. Materiales	23
3.1.1. Tratamiento superficial a la fibra de carbón	23
3.2. Manufactura de láminas	24
3.3. Determinación de la fracción volumétrica de fibras	27
3.4. Propiedades mecánicas elásticas de los compuestos	29
3.4.1. Colocación de las galgas extensométricas	30
3.4.1.1. Preparación de la superficie	30
3.4.1.2. Colocación	31
Capítulo 4. Resultados y discusiones	32
4.1. Fracción volumétrica de fibra	32
4.2. Propiedades mecánicas elásticas de láminas	32
4.3. Propiedades mecánicas elásticas de laminados	35
4.4. Modelado con elementos finitos	35
4.4.1. Factor de concentración de esfuerzos	38

4.4.2. Componente de esfuerzo $\tau_{xy}$	43
4.4.3. Componente de esfuerzo $\sigma_x$	47
Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones	51
5.1. Conclusiones	50
5.2. Recomendaciones	50
Bibliografía	51

## **Resumen**

En esta tesis se realiza un análisis del efecto de la adherencia entre fibra y matriz de un material compuesto y del estado de esfuerzos en el comportamiento en un laminado cuando existe un orificio en el centro geométrico, esto es, un concentrador de esfuerzos. Este estudio se realiza utilizando un programa comercial de análisis por medio del método de elementos finitos.

Este análisis permite “observar” la distribución de las componentes de esfuerzos en la vecindad del orificio, lo cual resulta en un mejor entendimiento del posible efecto de la distribución de las componentes de esfuerzo en la respuesta del laminado.

Para dicho análisis son necesarias, entre otras variables, las propiedades mecánicas elásticas del laminado compuesto, las cuales se obtienen a partir de la teoría de laminación de materiales fibro-reforzados. Para esto, se requieren las propiedades mecánicas elásticas de una lámina con fibras orientadas unidireccionalmente. La secuencia de laminación seleccionada para este estudio es  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ]_s$ .

Las propiedades mecánicas elásticas de la lámina se obtuvieron por medio de ensayos de tensión unidireccional. Para obtener dos niveles de adherencia entre fibra y matriz, las láminas se fabricaron utilizando fibras de carbón en primer lugar sin tratamiento superficial (sizing) y fibras de carbón con tratamiento superficial consistente en un agente de acoplamiento para mejorar el nivel de adherencia fibra-matriz. Este tratamiento fue utilizado para aumentar el nivel de adherencia fibra-matriz. En este caso se utilizó un agente de acoplamiento de tipo silano. Se prepararon láminas de material compuesto como sigue: con fibras sin tratamiento orientadas a  $0^\circ$ , con fibras sin tratamiento orientadas a  $90^\circ$ , con fibras con tratamiento orientadas a  $0^\circ$ , con fibras con tratamiento orientadas a  $90^\circ$ .

De los resultados obtenidos, se pudo apreciar que el tratamiento superficial de la fibra y la adherencia no tuvo efecto significativo en la rigidez del material compuesto. Asimismo, el laminado presentó propiedades mecánicas elásticas casi isotrópicas.

Existen pequeñas diferencias en las direcciones ortogonales pero son atribuidas a las variaciones en la fracción volumétrica de fibra.

La distribución de las componentes de esfuerzo no fue afectada significativamente por la interacción fibra-matriz, sin embargo, del análisis de elementos finitos, se pudo apreciar que la anisotropía si tiene una influencia y de que existe corrimiento en la posición de los valores máximo y mínimo si se comparan los resultados respecto a la configuración de un material isotrópico.

Se tiene un mejor entendimiento de la distribución de las componentes de esfuerzos gracias al análisis de elemento finito, ya que permite obtener una visión panorámica de la distribución de los esfuerzos en la vecindad del orificio.