



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES EN
CORTE DE UNA LÁMINA FABRICADA EN MATERIALES
COMPUESTOS.”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN AERONÁUTICA

PRESENTA:

CITLALLI GUADALUPE OCAMPO

DIRIGIDA POR:

DR. HILARIO HERNÁNDEZ MORENO
M. EN C. ERIK VARGAS ROJAS

México, D. F. 2009

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD TICOMÁN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE: INGENIERO EN AERONÁUTICA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN: TESIS INDIVIDUAL
DEBERÁN PRESENTAR: LA C. PASANTE:
GUADALUPE OCAMPO CITLALLI

“DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES EN CORTE DE UNA LAMINA DELGADA FABRICADA EN MATERIALES COMPUESTOS”

CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	ESTADO DEL ARTE
CAPÍTULO III	METODOLOGÍA
CAPÍTULO IV	DISEÑO DEL DISPOSITIVO
CAPÍTULO V	DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS
	CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

México, DF., a 17 de junio de 2009.

A S E S O R E S


DR. HILARIO HERNÁNDEZ MORENO


M. EN C. ERIK VARGAS ROJAS


I. P. N.
ESCUELA SUPERIOR DE
INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD TICOMÁN
DIRECCIÓN


ING. MIGUEL ALVAREZ MONTALVO
DIRECTOR

Dedicatorias

Agradezco a mis padres, con todo mi cariño, la oportunidad que me brindaron para poder culminar este trabajo, a pesar de la distancia; pero sobre todo a mi madre, porque estoy consciente de los sacrificios realizados; y por el apoyo incondicional que me ha proporcionado toda la vida.

A mis hermanos por su cariño y comprensión a pesar de los errores cometidos.

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Hilario Hernández Moreno por el apoyo y consejos brindados durante el desarrollo de este trabajo, por ser una persona íntegra, lo cual me inspira un profundo respeto.

Al Instituto Politécnico Nacional, por las herramientas brindadas, en muchos aspectos, para la realización de mis estudios y de la presente tesis, además del apoyo económico brindado.

Al Ing. Julio César Millán Díaz, por proporcionarme los instrumentos necesarios para el desarrollo del trabajo, por sus consejos, dedicación, paciencia y apoyo incondicional, ya que sin él, éste trabajo no sería el mismo. Mi más sincera admiración, cariño y respeto.

Al Ing. Antonio Medrano Mejía, por sus sugerencias durante la etapa de diseño, pero sobre todo, por sus consejos y brindarme el tiempo para escucharme, por que sin su ayuda no hubiera llegado a este punto de mi carrera.

Al Ing. Gerardo López Ramírez, por las facilidades otorgadas y la asesoría brindada acerca de los equipos del laboratorio de ensaye de materiales, pero más aun, por ser un gran amigo.

Al Ing. Fausto H. Rodríguez Ibarra, por las facilidades dadas para el uso y acceso a los laboratorios; y por enseñarme que los obstáculos en el camino, sólo nos hacen más fuertes.

Al Ing. Mario Méndez R. por la accesibilidad respecto a los trámites administrativos correspondientes al proceso de titulación, además de su disponibilidad para asesorarme.

Al Ing. Víctor Manuel Sauce y al Ing. Antonio Mosqueda por su apoyo y sugerencias en la etapa de selección de materiales y por las facilidades dadas en el uso de equipo y el laboratorio de Ingeniería de materiales.

Al Ing. Ricardo Hernández y al Ing. Juan Manuel Salcedo, por sus sugerencias y asesoría durante la etapa de diseño de detalle.

Al MBA Marcos Fragoso M. y al Ing. Alfonso Espinoza P. por las facilidades otorgadas en el uso de las instalaciones y equipo del laboratorio de ensaye de materiales.

Al Ing. Gustavo Rodríguez Z. y Ing. Alejandro Cerón por su ayuda y sus sugerencias durante el proceso de diseño.

Al Ing. Carlos Correa, por el tiempo brindado para apoyarme durante el diseño y las facilidades para el uso de herramientas del laboratorio de Procesos de Manufactura.

Al joven Mario Ernesto Martínez Alonso, por su paciencia y la asistencia brindada, durante el uso de los equipos de cómputo y consejos durante el modelado realizado.

Al Ing. Oscar de Jesús Reyes, por el apoyo otorgado durante el inicio de mi trabajo, por su paciencia, comprensión, consejos, por saber empujarme cuando desistía y por estar siempre cuando más lo necesité.

Agradezco a todas las personas aportaron de una u otra manera, para lograr la realización de este trabajo, las cuales de algún modo forman parte de mi vida.

Resumen

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos.”

El desarrollo de un trabajo con estas características, surge de la necesidad de conocer las propiedades mecánicas, como parte del análisis de integridad estructural de una aeronave biplaza, monomotora, de ala alta, construida en gran parte por materiales compuestos o composites (resina epóxica reforzada con fibra de carbono, C-Ep); estudio en desarrollo, que es parte de los convenios de vinculación con la empresa mexicana fabricante de aeronaves Aeromarmi y el Instituto Politécnico Nacional.

Para la caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica de altas prestaciones es necesario utilizar el método de prueba adaptado al material que se está ensayando. En el presente documento escrito, se describe de manera general los materiales compuestos, su comportamiento mecánico y se hace énfasis en la descripción de los métodos de caracterización en corte con el fin de establecer las constantes elásticas (módulo cortante ó de cizallamiento) y de ruptura (resistencia al corte) para compuestos laminados reforzados con fibras.

De la investigación realizada, fue posible elegir el método de prueba de la viga con muescas en “v” mejor conocido como prueba de corte losipescu, (esto es debido al nombre del dispositivo requerido), en función a las virtudes que éste método de prueba manifiesta. Posteriormente es expuesto el proceso de diseño del dispositivo normalizado losipescu para determinar las propiedades en corte de materiales compuestos. Para tal efecto fue necesaria la implementación de diversas metodologías de diseño de productos, lo cual implica la descripción del desarrollo del producto desde la etapa de comprensión del problema (QFD y AHP), la del diseño conceptual (Análisis Funcional, AHP, Lluvia de Ideas, Matriz Morfológica), la de diseño de detalle (Acotación Funcional) hasta el resultado final que culmina con la fabricación del dispositivo y la verificación de su óptimo funcionamiento mediante la realización de pruebas mecánicas.

Como logro del estudio presentado, se obtienen por un lado el desarrollo de un dispositivo propio tipo losipescu y por otro las propiedades en corte de una probeta fabricada en material compuesto.

Palabras clave: Caracterización mecánica, corte, losipescu, Materiales compuestos

Abstract

"Experimental determination of the shear properties of a thin lamina manufactured in composite materials."

The development of a work of this type, arises of the necessity of knowing the mechanical properties, as a part of the integrity structural analysis of a two-seat, single engine airplane, largely built by composite materials or composites (epoxy resin reinforced with graphite fiber, C-Ep); in development study that is part of the linking agreements with the Mexican airship maker company Aeromarmi and the Instituto Politécnico Nacional.

For the characterization of high performance polymer matrix composites it is necessary to employ the test method adapted to the material that is going to be tested. In this work it is described, in a general way, the composite materials, their mechanical behavior and emphasis is made in the description of the shear characterization methods, with the purpose of establishing the shear elastic constants and shear properties in rupture (shear strength) for a fiber reinforced composite laminate.

From the investigation carried out, it was possible to choose the "V" notched beam test method, known as losipescu shear test, (this is due to the name of the required device) as a result of the virtues that this method evidently demonstrate. Later the the losipescu normalized fixture design process is exposed to determine the composite materials shear properties. For such an effect it was necessary the implementation of diverse product design methodologies, which implies the description of the product development starting from understanding the problem (QFD and AHP), the conceptual design (Functional Analysis, AHP, brainstorming, morphological matrix), the detailed design (Functional Demarcation) until the final result that culminates with the manufacture of the fixture and the verification of their good operation by means of the mechanical tests execution.

As achievement of the presented study, is fabrication of the actual designed prototype and the corresponding shear properties of a composite coupon.

Keywords: Mechanical characterization, shear, losipescu, V-notched beam test.

ÍNDICE

Dedicatorias.....	III
Agradecimientos.....	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	VI
Índice.....	VII
Lista de figuras	X
Lista de Tablas	XIII
Simbología.....	XIV
Glosario de términos.....	XVII
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Solución propuesta.....	5
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Justificación.....	7
1.5 Alcances.....	7
Referencias.....	8
Capítulo 2. Estado del arte	
2.1 Materiales compuestos.....	10
2.1.1 Introducción.....	10
2.1.2 Definición.....	11
2.1.3 Clasificación.....	13
2.1.4 Aplicaciones.....	16
2.2 Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra.....	17
2.2.1 Matrices.....	17
2.2.2 Fibras.....	19
2.3 Comportamiento mecánico de materiales compuestos.....	21
2.3.1 Resistencia.....	22
2.3.2 Módulo elástico.....	24
2.3.3 Relación de Poisson.....	26
2.3.4 Módulo de corte en plano.....	27
2.3.5 Importancia de la longitud de las fibras.....	28
2.4 Caracterización mecánica de materiales compuestos.....	29
2.4.1 Tensión axial.....	30
2.4.2 Compresión axial.....	31
2.4.3 Caracterización de propiedades en corte de materiales compuestos	34
2.4.3.1 Prueba de corte a $\pm 45^\circ$	36
2.4.3.2 Prueba de corte 10° fuera del eje.....	38
2.4.3.3 Prueba de corte con rieles	40
2.4.3.4 Corte en torsión de un tubo de pared delgada.....	42
2.4.3.5 Dispositivo losipescu.....	43
2.5 Caracterización física de materiales compuestos.	48
2.5.1 Densidad.....	48
2.5.2 Calcinación.....	49
2.5.3 Disolución de resina.....	50
Referencias.....	52

Capítulo 3. Metodología	
3.1 Metodología general.....	55
3.2 Proceso de diseño del dispositivo.....	59
3.2.1 Primera etapa: Comprensión del problema.....	60
3.2.2 Segunda etapa: Diseño conceptual.....	60
3.2.3 Tercera etapa: Diseño de detalle.....	60
3.3 Despliegue de las funciones de calidad.....	61
3.3.1 Identificación del cliente.....	61
3.3.2 Determinación de los requerimientos y expectativas del cliente.....	61
3.3.3 Determinar de la importancia relativa de los requerimientos del cliente.....	62
3.3.4 Traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería.....	63
3.3.5 Establecimiento de metas de diseño.....	64
3.4 Determinación de la función global.....	64
3.5 Determinación de los límites del sistema.....	65
3.6 Análisis funcional.....	65
3.7 Generación conceptual.....	66
3.8 Evaluación conceptual.....	66
3.9 Definición del modelo conceptual.....	67
3.10 Determinación de las tolerancias generales.....	67
3.11 Determinación de ajustes.....	68
3.12 Determinación de cotas funcionales.....	68
3.13 Determinación de tolerancias de forma y posición.....	69
3.14 Dibujos de fabricación.....	69
Referencias.....	70
Capítulo 4. Diseño del dispositivo	
4.1 Primera etapa: comprensión del problema.....	72
4.2 Despliegue de las funciones de calidad.....	72
4.2.1 Identificación del cliente.....	72
4.2.2 Determinación de los requerimientos y las expectativas del cliente....	72
4.2.3 Determinación de la importancia relativa de los requerimientos del cliente (Análisis de jerarquía analítica AHP).....	73
4.2.4 Traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería.....	76
4.2.5 Establecimiento de metas de diseño.....	79
4.3 Segunda etapa: Diseño conceptual.....	83
4.3.1 Determinación de la función global.....	83
4.3.2 Determinación de los límites del sistema.....	83
4.3.3 Análisis funcional (Definición de las funciones).....	84
4.3.4 Generación conceptual.....	85
4.3.5 Evaluación conceptual.....	92
4.3.7 Definición del modelo conceptual.....	95
4.4 Diseño de detalle.....	98
4.4.1 Determinación de tolerancias generales.....	98
4.4.2 Determinación de ajustes.....	99
4.4.3 Determinación de cotas funcionales.....	100
4.4.4 Determinación de tolerancias de forma y posición.....	101
4.4.5 Elección de materiales.....	104
4.4.5 Dibujos de fabricación.....	105

4.5 Fabricación del dispositivo	112
Referencias.....	115
Capítulo 5. Desarrollo experimental y análisis de resultados	
5.1 Datos generales.....	117
5.2 Desarrollo de las pruebas mecánicas.....	119
5.2.1 Preparación preliminar.....	119
5.2.3 Instalación del dispositivo.....	119
5.3 Resultados y análisis.....	123
Referencias.....	128
Conclusiones, comentarios y sugerencias para trabajos futuros.....	129

Lista de figuras

Figura 1.1	Aeronave fabricada en México, con materiales compuestos.....	2
Figura 1.2	La pirámide de bloques de construcción para ensayos mecánicos.....	3
Figura 1.3	Sistema de referencia para una lámina unidireccional.....	4
Figura 2.1	Comparación de las propiedades de distintos materiales.....	11
Figura 2.2	Ejemplo de los principales constituyentes de un material compuesto.....	12
Figura 2.3	Características de los principales constituyentes de los materiales compuestos.....	12
Figura 2.4	Clasificación de los materiales compuestos según su tipo de refuerzo.....	13
Figura 2.5	Diferentes tipos de matrices.....	18
Figura 2.6	Principales tipos de fibras y sus características.....	20
Figura 2.7	Formas esquemáticas de diversas configuraciones y empaquetamiento de fibras.....	21
Figura 2.8	curvas esfuerzo-deformación para dos diferentes combinaciones fibra-matriz.....	23
Figura 2.9	Variación en el mecanismo de falla de un compuesto con relación a la deformación de falla de las fibras, de la matriz y la fracción de volumen de fibras.....	24
Figura 2.10	Patrón de deformación en una matriz que rodea a una fibra sometida a un esfuerzo de tracción.....	28
Figura 2.11	Esfuerzo de corte en la matriz (a) y esfuerzo de tracción en la fibra (a, b y c) como una función de la longitud de fibra.....	29
Figura 2.12	Ensayo de tensión uniaxial en probeta de fibra de vidrio y resina poliéster...	31
Figura 2.13	Esquemático del dispositivo de compresión Celanese y sus componentes..	32
Figura 2.14	Esquemático del dispositivo de compresión IITRI y sus componentes.....	33
Figura 2.15	Probeta para la prueba de la viga sándwich para pruebas de compresión de compuestos.....	34
Figura 2.16	Sistema coordinado de referencia para un material compuesto.....	35
Figura 2.17	Probeta con un laminado $\pm 45^\circ$, sometida a tensión uniaxial para determinar las propiedades en corte.....	37
Figura 2.18	Arreglo de galgas para medición de deformaciones en probeta con un laminado a 10° respecto al eje de aplicación de carga, sometida a tensión uniaxial para determinar las propiedades en corte.....	39
Figura 2.19	Dispositivo de dos rieles de corte	40
Figura 2.20	(A) Dispositivo de tres carriles de corte y (B) dispositivo de tres carriles de corte modificado.....	41
Figura 2.21	Especimen cilíndrico de pared delgada con enrollado filamentario.....	43
Figura 2.22	Dimensiones estandarizadas de la probeta en mm.....	44
Figura 2.23	Esquemático de la aplicación de carga al dispositivo losipescu para pruebas de corte	45
Figura 2.24	Modos típicos de falla para el método de prueba obtenidos mediante el dispositivo losipescu	46
Figura 3.1	Diagrama esquemático de la metodología general.....	57
Figura 3.2	Ciclo de vida del producto.....	59
Figura 3.3	Clasificación de los requerimientos del cliente.....	62
Figura 3.4	Modelo de la función mecánica.....	65
Figura 3.5	Ejemplo de diagrama de pulpo para una lavandería	65
Figura 3.6	Ejemplo de árbol de funciones para un extractor de jugo de naranja.....	66
Figura 3.7	Representación de la determinación de cotas funcionales.....	68
Figura 4.1	Dimensiones generales.....	82

Figura 4.2	Orientación de las galgas extensométricas.....	82
Figura 4.3	Centro de la malla respecto al eje de aplicación de carga.....	82
Figura 4.4	Máquina servohidráulica Instron de ensayos universales	82
Figura 4.5	Orientación de las fibras respecto al eje de aplicación de carga	82
Figura 4.6	Representación del torcimiento en la probeta.....	82
Figura 4.7	Tamaño de la celda unitaria representativa.....	83
Figura 4.8	Ondulaciones de las fibras.....	83
Figura 4.9	Modelo de la función mecánica.....	83
Figura 4.10	Diagrama de pulpo para el establecimiento de funciones.....	84
Figura 4.11	Árbol de funciones.....	84
Figura 4.12	Vista frontal del modelo conceptual.....	96
Figura 4.13	Vista Isométrica del modelo conceptual.....	96
Figura 4.14	Vista lateral del modelo conceptual.....	96
Figura 4.15	Detalle de la unión entre la parte inferior del dispositivo y la base magnética	96
Figura 4.16	Dispositivo conceptual sin probeta.....	97
Figura 4.17	Vista trasera del modelo conceptual.....	97
Figura 4.18	Detalle del ensamble de las partes inferiores del dispositivo	97
Figura 4.19	Vista superior del modelo conceptual.....	97
Figura 4.20	Ensamble del dispositivo.....	105
Figura 4.21	Sub-ensamble 1	106
Figura 4.22	Sub-ensamble 2.....	107
Figura 4.23	Sub-ensamble 3.....	108
Figura 4.24	Pieza No. 06 “Calza 2”.....	109
Figura 4.25	Pieza No. 04 “Caja”.....	110
Figura 4.26	Pieza No. 07 “Ensamblador”.....	111
Figura 4.27	Vista general del torno utilizado para maquinar las piezas de revolución del dispositivo.	112
Figura 4.28	Operario durante la fabricación de alguna de las piezas utilizando el torno...	112
Figura 4.29	Vista general del taller de fabricación de dispositivo.....	112
Figura 4.30	Vista general de la parte trasera del taller de fabricación del dispositivo.....	112
Figura 4.31	Operario durante la fabricación de alguna de las piezas en la fresadora.....	112
Figura 4.32	Detalle de la pantalla digital que permite acabados con mayor precisión	112
Figura 4.33	Subconjunto 1.....	113
Figura 4.34	Subconjunto 2.....	113
Figura 4.35	Subconjunto 3.....	113
Figura 4.36	Vista frontal del dispositivo con probeta.....	113
Figura 4.37	Vista isométrica del dispositivo.....	114
Figura 4.38	Vista trasera del dispositivo.....	114
Figura 4.39	Vista superior el dsipositivo.....	114
Figura 4.40	Detalle del perno utilizado para alinear las probetas.....	114
Figura 5.1	Probeta de fibra de vidrio.....	118
Figura 5.2	Probeta de fibra de carbono.....	118
Figura 5.3	Alineación de la parte superior e inferior del dispositivo.....	120
Figura 5.4	Detalle de la colocación del perno de alineamiento para la probeta.....	121
Figura 5.5	Dispositivo instalado en la máquina de ensayos universales Instron.....	122
Figura 5.6	Ensayo de la probeta de fibra de vidrio.....	122
Figura 5.7	Ensayo de la probeta de fibra de carbono.....	122
Figura 5.8	Detalle del momento de la falla de la fibra de carbono.....	123
Figura 5.9	Gráfica carga vs desplazamiento para la probeta de fibra de carbono.....	123
Figura 5.10	Gráfica carga vs desplazamiento para la probeta de fibra de vidrio.....	124
Figura 5.11	Gráfica esfuerzo-deformación para la probeta de fibra de carbono.....	125

Figura 5.12	Gráfica esfuerzo-deformación para la probeta de fibra de vidrio.....	125
Figura 5.13	Gráfica de la región lineal para la probeta de fibra de carbono.....	126
Figura 5.14	Gráfica de la región lineal para la probeta de fibra de vidrio.....	126

Lista de tablas

Tabla 1.1	Propiedades mecánicas básicas de un material de matriz plástica reforzado con fibras.....	4
Tabla 2.1	Clasificación de los materiales compuestos de acuerdo a su tipo de matriz...	16
Tabla 2.2	Comparación de propiedades entre los principales tipos de matrices poliméricas.....	18
Tabla 2.3	Comparación de propiedades entre los principales tipos de fibras.....	20
Tabla 2.4	Propiedades mecánicas de un material compuesto	30
Tabla 2.5	Ventajas y desventajas de las principales pruebas de caracterización en corte.....	47
Tabla 3.1	Cronograma de actividades.....	58
Tabla 3.2	Escala fundamental de comparación.....	63
Tabla 3.3	Ejemplo de matriz comparativa.....	63
Tabla 3.4	Ejemplo de matriz comparativa normalizada	63
Tabla 3.5	Niveles de traducción para el requerimiento “Que las partes involucradas sean de fácil adquisición”.....	64
Tabla 3.6	Establecimiento de metas para el requerimiento “Que las partes involucradas sean de fácil adquisición”.....	64
Tabla 3.7	<i>Ejemplo de matriz morfología para la función “limpiar la máquina”.....</i>	66
Tabla 3.8	Ejemplo de evaluación conceptual según su factibilidad.....	67
Tabla 3.9	Ejemplo de evaluación conceptual.....	67
Tabla 4.1	Ponderación de requerimientos.....	74
Tabla 4.2	Matriz normalizada de requerimientos.....	75
Tabla 4.3	Traducción de requerimientos.....	76
Tabla 4.4	Establecimiento de metas de diseño.....	79
Tabla 4.5	Generación conceptual para la función 1.....	85
Tabla 4.6	Generación conceptual para la función 2 y 4.....	87
Tabla 4.7	Generación conceptual para la función 3.....	88
Tabla 4.8	Generación conceptual para la función 5.....	89
Tabla 4.9	Generación conceptual para la función 6.....	90
Tabla 4.10	Generación conceptual para la función 7.....	91
Tabla 4.11	Evaluación conceptual para la función 1	92
Tabla 4.12	Evaluación conceptual para la función 2 y 4.....	93
Tabla 4.13	Evaluación conceptual para la función 3	93
Tabla 4.14	Evaluación conceptual para la función 5	94
Tabla 4.15	Evaluación conceptual para la función 6	95
Tabla 4.16	Evaluación conceptual para la función 7.....	95
Tabla 4.17	Tolerancias generales (Para dibujos acotados en pulgadas).....	98
Tabla 4.18	Determinación de ajustes.....	99
Tabla 4.19	Determinación de juegos funcionales.....	100
Tabla 4.20	Codificación de las diferentes funciones de las superficies.....	102
Tabla 4.21	Tabla guía para la selección de tolerancias de forma y posición.....	103
Tabla 5.1	Características de la máquina de ensayos universales Instron modelo 8500	117
Tabla 5.2	Características de las probetas ensayadas.	118
Tabla 5.3	Comparación de resultados	127

Simbología

E_l	Módulo de elasticidad longitudinal
E_t	Módulo de elasticidad transversal
ν_{lt}	Relación de Poisson longitudinal-transversal
ν_{tl}	Relación de Poisson transversal-longitudinal
σ_l ruptura tensión	Esfuerzo de ruptura en tensión en sentido longitudinal
σ_t ruptura tensión	Esfuerzo de ruptura en tensión en sentido transversal
σ_l ruptura compresión	Esfuerzo de ruptura en compresión en sentido longitudinal
σ_t ruptura compresión	Esfuerzo de ruptura en compresión en sentido transversal
τ_l ruptura tensión	Esfuerzo de ruptura en corte
ΔL	Elongación (Diferencia entre la longitud inicial y la longitud final)
F_c, F_m, F_f	Carga soportada por el compuesto, matriz y fibra respectivamente
$\sigma_c, \sigma_m, \sigma_f$	Esfuerzo del compuesto, matriz y fibra respectivamente
A_c, A_m, A_f	Área del compuesto, matriz y fibra respectivamente
V_c, V_m, V_f	Fracción de volumen del compuesto, matriz y fibra respectivamente
$\epsilon_c, \epsilon_m, \epsilon_t$	Deformación del compuesto, matriz y fibra respectivamente
V_{min}	Valor mínimo de volumen de fibras
E_c, E_m, E_f	Módulo de elasticidad del compuesto, matriz y fibra respectivamente
$\nu_{lc}, \nu_{lf}, \nu_{lm}$	relación de Poisson longitudinal del compuesto, fibra y matriz respectivamente.
$\nu_{tc}, \nu_{tf}, \nu_{tm}$	relación de Poisson transversal del compuesto, fibra y matriz respectivamente
ϵ_t, ϵ_l	Deformación transversal y longitudinal respectivamente
$\delta_{lc}, \delta_{lf}, \delta_{lm}$	Elongación longitudinal sufrida por el compuesto, fibra y matriz respectivamente
$\delta_{tc}, \delta_{tf}, \delta_{tm}$	Elongación transversal sufrida por el compuesto fibra y matriz respectivamente
W	Ancho del elemento

\mathcal{L}	Longitud del elemento
γ	Deformación angular
τ	Esfuerzo cortante del material
G	Módulo cortante del material
$\Delta c, \Delta f, \Delta m$	Elongación sufrida por el compuesto, fibra y matriz respectivamente
\mathcal{L}_c	Longitud crítica de la fibra
d	Diámetro de la fibra
η	Parámetro de eficiencia de la fibra
l	Dirección longitudinal
t	Dirección transversal
P_{\max}	Carga de ruptura
b	Ancho de la probeta
h	Espesor de la probeta
l	Longitud de la probeta
θ	Ángulo
T	Par aplicado
R_0	Radio exterior del espécimen
R_i	Radio interior del espécimen
S_{xy}	Resistencia al corte
W_b	Peso registrado por la balanza
W_p	Peso de la probeta en el aire
W_c	Peso del crisol
E	Empuje
v	Volumen
g	Gravedad
ρ	Densidad

m_f, m_r	Masa de la fibra y la resina respectivamente
V_{poros}	Volumen de porosidad
V_p	Volumen de la probeta
h	Espesor
r	Radio
Pm	Profundidad de la muesca
Dm	Distancia entre muescas
L	Longitud de la probeta
Lg	Longitud de la galga
Leu	Longitud del área de esfuerzo uniforme
ϕ	Diámetro
Ra	Rugosidad
R	Resistencia
V	Voltaje
n	número de probetas
$\gamma_{última}$	Deformación angular última
CUR	Celda unitaria representativa
AC	Área calibrada
Vel	Velocidad
T	Tiempo

Glosario

Abrasión: Acción mecánica de rozamiento y desgaste que provoca la erosión de un material o tejido.

Anisotropía: Es la propiedad general de los materiales según la cual determinadas propiedades varían según la dirección en que son examinadas.

ASTM: American Society for Testing and Materials (ASTM) son organizaciones de desarrollo de normas técnicas para materiales, productos, sistemas y servicios.

Caracterización: Es la determinación de las propiedades que posee determinado material.

CEN: Comité Europeo de Normalización que proporciona una plataforma para el desarrollo de normas europeas y otras especificaciones técnicas.

Curado: Es el proceso mediante el cual el material compuesto se endurece y obtiene su geometría final.

Delaminación: Es el desprendimiento entre capas del laminado

Dimensión nominal: Es el valor o dimensión que se toma como referencia, y es conveniente que esté basado en medidas comerciales o normales

Dispersoides: Son materiales compuestos endurecidos por dispersión y contienen partículas de 10 a 250 nm de diámetro.

Ductilidad: Es una propiedad que presentan algunos materiales, los cuales bajo la acción de una fuerza, pueden sufrir grandes deformaciones sin romperse.

Elasticidad: Es la capacidad de un material para recobrar su forma al cesar la carga que lo ha deformado. Se llama límite elástico a la carga máxima que puede soportar un metal sin sufrir una deformación permanente.

Ensimaje: Composición aplicada a las fibras discontinuas o a filamentos de vidrio en el transcurso de su fabricación.

Extensometría eléctrica: Es una de las técnicas experimentales utilizadas para la medición de esfuerzos y deformaciones que utiliza un sensor llamado galga extensométrica.

Galga: Una galga extensométrica es un sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica.

Higrotérmico: Concerniente a una situación climática que involucra la medición de características referentes tanto a la temperatura como a la humedad relativa.

Inestabilidad elástica: Es la pérdida de la condición de equilibrio estable, que presentan los elementos estructurales esbeltos, perdiendo la rectitud del elemento y provocando grandes deformaciones que son inaceptables para la buena funcionalidad del mismo.

ISO: La Organización Internacional de Normalización (ISO), ISO es organización internacional no gubernamental, con base en Ginebra, Suiza, que produce normas internacionales industriales y comerciales. Las normas desarrolladas por ISO son voluntarias, comprendiendo que es un organismo no gubernamental no tiene autoridad para imponer sus normas a ningún país.

Lámina: Una sola capa de un material compuesto de varias capas. La lámina es la configuración básica de una estructura de materiales compuestos.

Laminado: Es el resultado de unir dos o más capas con diferente orientación de las fibras para formar un material compuesto.

Ortogonal: Se refiere al sistema de referencia formado por tres planos separados 90° entre sí.

Pandeo: Es la inestabilidad elástica que puede darse en elementos esbeltos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales (flexión) a la dirección principal de compresión.

Planicidad: Propiedad en donde la superficie se considera plana cuando está totalmente comprendida entre dos planos paralelos separados entre sí la tolerancia

Plasticidad: La plasticidad es la propiedad mecánica de un material, de deformarse permanentemente e irreversiblemente sin que llegue a romperse cuando se encuentra sometido a cargas por encima de su límite elástico.

Ponderar: Es Asignar a cada uno de los elementos de un grupo un valor distinto en función de su importancia relativa dentro del conjunto.

Termofluencia: Es la tendencia de los materiales a deformarse plásticamente bajo carga estática prolongadas a una temperatura elevada.

Tenacidad: Es la resistencia a la fractura por esfuerzos de impacto que deforman el metal.

Termoestable: Es un material polimérico que no se altera físicamente ni pierde sus propiedades al aplicarle calor.

Termoplástico: Es un material polimérico que puede deformarse por acción de la temperatura, fundirse si se eleva ésta suficientemente y se endurece en un estado vítreo cuando se enfría lo suficiente.

Servohidráulico: Mecanismo que se acciona mediante una fuerza de presión generada por agua o aceite.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo es descrita, de manera muy breve, la problemática de la cual surge la necesidad de desarrollar el presente trabajo, el cuál es parte de un proyecto que a su vez engloba diferentes aspectos más, Este trabajo ayuda a dar solución a estos problemas, mediante el desarrollo de un dispositivo de prueba para ensayos en corte. Asimismo se reconocen las limitaciones con las que se cuenta y que son motivo del desarrollo de nueva tecnología. Además se presentan los objetivos, que muestran lo que se pretende lograr por medio de esta tesis, así como las restricciones que se tomarán durante su desarrollo.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, ESIME, Unidad Ticomán se están llevando a cabo varios proyectos con la industria aeronáutica nacional, tal es el caso del la vinculación con la empresa constructora de aeronaves Aeromarmi, de San Luís Potosí. Este proyecto tiene que ver con el desarrollo integral de una aeronave utilitaria de cuatro a seis pasajeros en materiales compuestos, específicamente en fibra de carbono y resina epóxica [1, 2]. Otra fase del proyecto consiste en evaluar la integridad estructural de la aeronave Stela M1, actualmente en fabricación, ilustrada en la figura 1.1.



Figura 1.1 Aeronave fabricada en México, con materiales compuestos a) Aeronave en plataforma, b) Aeronave en vuelo

La integridad estructural de una aeronave depende principalmente de cuatro factores: 1) resistencia estática, 2) efectos ambientales, 3) fatiga y 4) tolerancia a la presencia de daños o defectos [3]. El criterio de resistencia se toma en cuenta en el diseño de la aeronave al comparar las propiedades mecánicas de los materiales con respecto a los esfuerzos producidos en ellos por las cargas impuestas en vuelo, aterrizaje, despegue, o algún otro tipo de maniobras. Al considerar los efectos producidos por los factores ambientales y por la presencia de daños o defectos, se lleva a cabo una reducción de las propiedades de resistencia de los materiales. Para llevar a cabo este estudio es necesario contar con las capacidades para medir las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Para cumplir satisfactoriamente con estas tareas el Laboratorio de Ensaye de Materiales (LEM) de la ESIME Ticomán, requiere desarrollar la infraestructura necesaria para llevar a cabo investigación, desarrollo tecnológico, y análisis en el campo de los materiales compuestos de matriz plástica reforzados con fibras, capacidades que, además, no se tienen en otros laboratorios de ensayos mecánicos nacionales. Conociendo las propiedades mecánicas básicas se podrá predecir analítica o numéricamente el comportamiento mecánico de elementos estructurales sencillos, componentes y de la estructura ensamblada, como se ilustra en la figura 1.2.

La pirámide de ensayos [4, 5] es una metodología usada para llevar a cabo programas de pruebas mecánicas para desarrollo y validación de estructuras aeronáuticas. Se denomina así por la gran cantidad de pruebas en la base, que se reducen en los siguientes niveles para componentes estructurales de mayor complejidad. En los niveles más inferiores, las propiedades básicas de los materiales se determinan experimentalmente usando grandes cantidades de probetas. En cada nivel superior se ensayan estructuras más complicadas cuyo

modo de falla se predice a partir de los análisis hechos en los niveles inferiores. Conforme se avanza en la pirámide se va contando con más información y de esta manera se van refinando los modelos de análisis estructural para que ajusten con los resultados experimentales. La cúspide de la pirámide es, en muchos de los casos, una sola prueba de un componente completo o de un ensamble estructural a escala real.

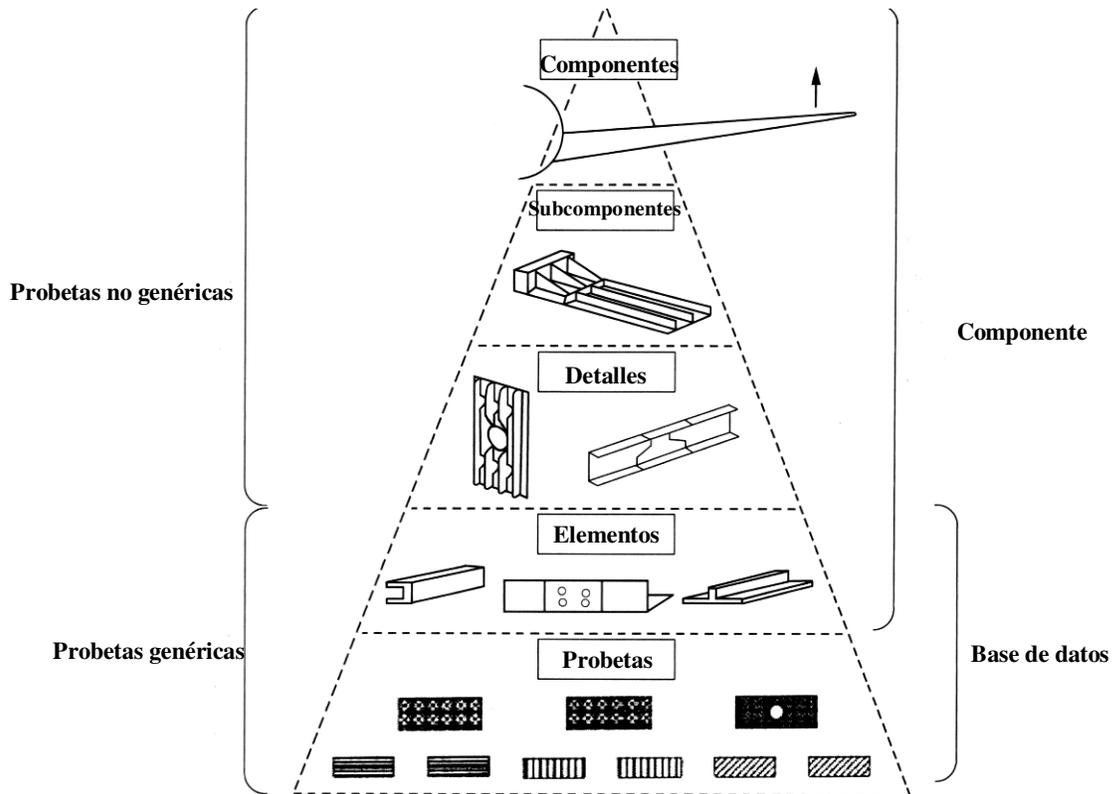


Figura 1.2 La pirámide de ensayos mecánicos para el desarrollo de estructura aeronáutica [5]

De acuerdo con Ishai [6], los tipos de pruebas de caracterización mecánica de un material compuesto de matriz plástica son los siguientes:

1. De los materiales constituyentes, esto es, fibra, matriz e interfase para análisis micromecánicos.
2. Caracterización de láminas unidireccionales.
3. Determinación de las propiedades interlaminares.
4. Predicción del comportamiento del material bajo condiciones especiales de carga, por ejemplo, estados multiaxiales de esfuerzo, fatiga, termofluencia, etc.
5. Análisis experimental de esfuerzos y de modos de falla de laminados compuestos y estructuras, especialmente aquellas que involucran discontinuidades geométricas.
6. Valoración de la integridad estructural por medio de pruebas no destructivas.

El LEM tiene la capacidad para cumplir parcialmente los primeros dos tipos de pruebas; y de acuerdo a la figura 2 se ubica en los primeros dos niveles al poder llevar a cabo pruebas mecánicas de tensión [7], compresión y flexión [8] a probetas normalizadas o no, y a elementos estructurales sencillos. Además se cuenta con los medios para llevar a cabo ensayos uniaxiales a estructuras cilíndricas por medio de ensayos de presión interna [9].

En lo que respecta a la caracterización de láminas unidireccionales, las propiedades mecánicas básicas de un laminado reforzado con fibras se pueden predecir a partir de las propiedades y el arreglo de los materiales constituyentes o por medio de un programa de pruebas extenso, como se ha referido anteriormente. Estas propiedades básicas son las constantes de ingeniería (módulo de Young en sentido longitudinal y transversal, módulo de cizallamiento, relaciones de Poisson longitudinal-transversal y transversal-longitudinal), las propiedades de resistencia (esfuerzo de ruptura en tensión en sentido longitudinal y transversal, esfuerzo de ruptura en compresión en sentido longitudinal y transversal, esfuerzo de ruptura en corte), entre otras; véase la tabla 1.1 y la figura 1.3. En esta tabla sólo se consideran las propiedades elásticas y de resistencia; sin embargo, también se tienen las propiedades higrotérmicas, en fractura, ópticas, eléctricas, etc. En el caso de los materiales metálicos convencionales, la caracterización mecánica es bastante más simple debido a que sólo se requiere conocer dos constantes elásticas y dos valores de resistencia (módulo de elasticidad, relación de Poisson, esfuerzo de cedencia, y esfuerzo máximo).

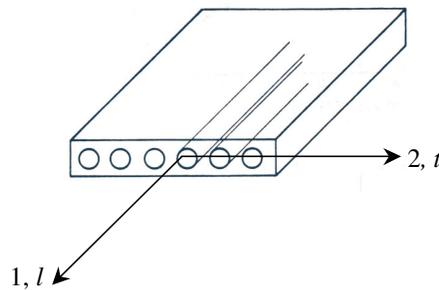


Figura 1.3 Sistema de referencia para una lámina unidireccional

Tabla 1.1 Propiedades mecánicas básicas de un material de matriz plástica reforzado con fibras

No	Propiedad mecánica	Símbolo
1	Módulo de elasticidad longitudinal	E_l
2	Módulo de elasticidad transversal	E_t
3	Módulo cortante en el plano	G_{lt}
4	Relación de Poisson longitudinal-transversal	ν_{lt}
5	Relación de Poisson transversal-longitudinal	ν_{tl}
6	Esfuerzo de ruptura en tensión en sentido longitudinal	$\sigma_l \text{ ruptura tensión}$
7	Esfuerzo de ruptura en tensión en sentido transversal	$\sigma_t \text{ ruptura tensión}$
8	Esfuerzo de ruptura en compresión en sentido longitudinal	$\sigma_l \text{ ruptura compresión}$
9	Esfuerzo de ruptura en compresión en sentido transversal	$\sigma_t \text{ ruptura compresión}$
10	Esfuerzo de ruptura en corte	$\tau_l \text{ ruptura tensión}$

Mediante ensayos de tensión en un material compuesto, se pueden determinar cinco constantes elásticas (módulo de elasticidad longitudinal, módulo de elasticidad transversal, módulo de cizallamiento, relación de Poisson longitudinal-transversal, relación de Poisson transversal-longitudinal) y tres propiedades de resistencia (resistencia en tensión en sentido longitudinal, en sentido transversal, y en corte). El módulo cortante y resistencia en corte se pueden determinar con este ensayo, de acuerdo a [5, 6], siempre y cuando la orientación de las fibras sea de $\pm 45^\circ$ con respecto al eje longitudinal del espécimen, midiendo la deformación de manera paralela y perpendicular al sentido de aplicación de la carga.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Existen algunas limitantes al medir la resistencia al corte de esta forma, por un lado, sólo es válido para laminados balanceados y simétricos; el material en la zona de medición no está sometido a un esfuerzo de corte puro en el plano medio, existe un componente de esfuerzo normal y un estado de esfuerzos complejo cerca de los bordes libres (efecto de borde).; Este ensayo representa una aproximación aceptable, además facilita el trabajo de laboratorio, pues no se requiere fabricar un dispositivo especial y la probeta tiene las mismas dimensiones que la utilizada en un ensayo de tensión, sin embargo, tiene la limitante de que la información obtenida de esta prueba no representa los valores reales, ya que se sobreestiman los valores de resistencia del material.

Existen otras pruebas que permiten determinar las propiedades en corte de una lámina delgada, algunas de estas son: 1) la prueba de aplicación de carga 10° fuera del eje longitudinal; 2) La prueba a base de barras de corte; 3) la prueba de torsión a barras sólidas o probetas cilíndricas huecas sometidas a par de torsión; 4) las pruebas de corte que se basan en el hecho de que la fuerza cortante transmitida a través de una sección con dos concentradores en los bordes produce un esfuerzo uniforme a lo largo de la sección.

1.2 SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta al problema que se plantea, parte primero de la investigación bibliográfica y del estado de la ciencia y la tecnología para identificar el método de ensayo en corte que permita obtener los valores de módulo cortante y resistencia en corte que mejor se aproximen a los valores reales y desarrollar el dispositivo necesario para lograrlo utilizando metodologías de diseño objetivas.

1.3 OBJETIVOS

Para llegar a la solución propuesta se ha planteado, como objetivo global, obtener experimentalmente el módulo cortante y la resistencia al corte de una lámina delgada, fabricada en material compuesto de matriz plástica, reforzado con fibras, sometiendo el material a un estado de esfuerzo de corte casi puro.

Este objetivo general puede desglosarse en los objetivos particulares siguientes:

- Identificar el estado de la ciencia y de la tecnología en lo referente a las técnicas para caracterizar las propiedades en corte de materiales compuestos.
- Desarrollar el dispositivo necesario para obtener las propiedades en corte de una lamina fabricada en materiales compuestos.
- Utilizar criterios de diseño mecánico y de fabricación en el dimensionado del dispositivo y la selección de la materia prima.
- Implementar una metodología de diseño para llevar a cabo el desarrollo del dispositivo planteado.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La caracterización de láminas unidireccionales y de laminados multidireccionales de matriz plástica reforzados con fibras requiere determinar al menos diez propiedades básicas. En el Laboratorio de Ensaye de Materiales de la ESIME Ticomán se tienen los medios para conocer ocho de esas propiedades básicas al tener implementadas las pruebas normalizadas de tensión y compresión; sin embargo, no se cuenta todavía con los medios para determinar experimentalmente las propiedades en corte sometiendo al material a un estado de esfuerzo de corte puro. Es por esto que se plantea la necesidad de llevar a cabo el desarrollo tecnológico de un dispositivo normalizado con el que se cumpla, en la medida de lo posible, esta condición y que además se reduzcan los efectos de borde, de acoplamiento, el comportamiento no lineal de la matriz y de la interfase fibra – matriz, y la presencia de esfuerzos normales combinados que producen una incertidumbre sobre todo en la determinación de la resistencia al corte [5].

Las capacidades adquiridas tras la realización de esta tesis permitirán al LEM llevar a cabo investigación básica y estar en la posibilidad de cumplir satisfactoriamente con los programas de pruebas mecánicas de proyectos vinculados, como lo es el relacionado con la evaluación de la integridad estructural de la aeronave Stela M1.

La experiencia adquirida en la realización experimental de esta tesis permitirá además implementar prácticas similares en el LEM y en el Laboratorio de Plásticos y Materiales Compuestos, para materias curriculares de la licenciatura de Ingeniería Aeronáutica como son Tecnología de los Materiales Compuestos, Materiales Compuestos, y Mecánica Estructural de Materiales Compuestos, además de futuras prácticas para firmas de posgrado.

Se plantea la posibilidad en el futuro de continuar esta propuesta con el desarrollo de otros dispositivos para pruebas y de formular rutinas computacionales para corroborar los resultados experimentales, usando por ejemplo el Método del Elemento Finito.

1.5 ALCANCES

El resultado de este trabajo será el dispositivo necesario para llevar a cabo las pruebas de caracterización mecánica en corte de un laminado fabricado en material compuesto; el módulo cortante y la resistencia al corte del material en estudio.

REFERENCIAS

- [1] Vargas E., Hernández H., Fernández I., Hernández R., Bello O., Cortés G. “Proyecto Aeromarmi – ESIME Ticomán: desarrollo integral de una aeronave utilitaria fabricada en materiales compuestos”. 10º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. IPN – ESIME – SEPI. México, D. F., 26 – 30 noviembre 2007. Artículo aceptado por refereo. pp. 6.
- [2] O. E. Bello-Olvera; R. G. Hernández-García; A. I. Fernández-Ochoa. “Diseño conceptual de una aeronave de 6 plazas en materiales compuestos” 10º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. IPN – ESIME – SEPI. México, D. F., 26 – 30 noviembre 2007. Artículo aceptado por refereo.
- [3] Hernández H., Cortés A., González J.-L., “Propuesta de estudio de la integridad estructural de la aeronave STELA M1” Diciembre 2007. pp. 12.
- [4] Fields, R., “Overview of Testing and Certification”. ASM Handbook v.21. Composites. 2001. pp 736.
- [5] U. S. Department of Defense, Handbook Polymer Matrix Composites Vol. 1, “Guide lines for characterization of structural materials”, MIL-HDBK-17-1E, DOD, 1997. p. 2-4 – 2-5, 6-49 – 6-63.
- [6] Daniel, Isaac. Ishai, Ori. “Engineering Mechanics of Composite Materials”. 1994. Oxford University Press. New York. 299 – 300, 316 – 318, 321 – 331.
- [7] Méndez Ramos, M., “Determinación de la Matriz de Rigidez de un Material Compuesto Laminado de Fibra de Vidrio y Resina Poliéster”. Tesis de maestría. IPN ESIME UPALM. México, 2004.
- [8] Hernández Moreno, H., “Desarrollo de un Material Compuesto para Aplicaciones Estructurales”. Tesis de maestría, SEPI ESIME UPALM. México, 2002.
- [9] Vargas Rojas, E. “Caracterización Mecánica de Tubería Metálica Reforzada con Material Compuesto Fabricado por el Proceso de Enrollado de Filamento”. 2007. Tesis de maestría, SEPI ESIME UPALM. México.
- [10] Ramos, J., “Diseño de un Soporte Hidráulico para Sostener Techos de Minas de Carbón con Capacidad de 25 Toneladas”. Tesis de maestría, SEPI ESIME UPALM. México, 1996.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

Dentro de este capítulo se presenta de manera general, una introducción a la definición de material compuesto, las características de sus constituyentes, su clasificación, aplicaciones, etc., de manera que los datos presentados permitan una familiarización preliminar con el tema.

Asimismo, se incluye información acerca del comportamiento mecánico que presentan los materiales compuestos y la relevancia de conocer las propiedades mecánicas que poseen; para subsecuentemente hacer una revisión con énfasis en los principales métodos de pruebas de corte, se describe el funcionamiento de los respectivos dispositivos de prueba, así como también las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

2.1 MATERIALES COMPUESTOS

2.1.1. Introducción

A pesar de que la idea de material compuesto no es nueva, dado que existen de manera corriente en la naturaleza, además de que estos materiales han acompañado al ser humano desde su origen; sin embargo, desde hace aproximadamente 100 años, se ha ido creando una industria masiva que ha registrado una clara tendencia a elevar el uso de esta clase de materiales.

El desarrollo inicial de este nuevo tipo de materiales, nace de la creciente demanda que existía en la década de los 60, por parte de diferentes ramas industriales, como la aeronáutica, espacial, la energía, la construcción civil, etc.; en contar con materiales cada vez más rígidos, resistentes y ligeros. Estas demandas, que se exigían al comportamiento de los materiales, eran cada vez más extremas y variadas, por lo que ningún material convencional era capaz de satisfacerlas al mismo tiempo. Este hecho fue el que motivó el resurgimiento del concepto antiguo de combinar diferentes materiales en un material compuesto integral para satisfacer los requerimientos de los diferentes usuarios. Dos logros muy importantes en este sentido y que marcaron la rápida expansión de los materiales compuestos, fueron, por un lado, el desarrollo durante los primeros años de la década de los 60, de las fibras de carbono en el Reino Unido y por el otro lado el desarrollo de las fibras de boro en los Estados Unidos[1].

El ejemplo más representativo del desarrollo de los materiales compuestos está asociado a su aplicación en la industria aeronáutica, dado que los materiales compuestos han introducido una extraordinaria fluidez a la ingeniería de diseño, permitiendo al diseñador crear un material diferente para cada aplicación, con el propósito de mejorar la relación resistencia/peso.

Los materiales compuestos disponen de ventajas con relación a los materiales tradicionales, aportando numerosas cualidades funcionales: ligereza, resistencia mecánica y química, mantenimiento reducido, 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 gracias a sus propiedades químicas (resistencia a la corrosión). También refuerzan la seguridad gracias a 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[2].

Estos sistemas de materiales compuestos dan lugar a un comportamiento que no es alcanzable por sus constituyentes individuales, ofreciendo por tanto, como gran ventaja, la posibilidad de realizar un producto especialmente adaptado a las especificaciones requeridas y optimizar la relación precio contra prestación. Esta posibilidad es mucho más importante de lo que en un principio podría parecer, ya que implica que, partiendo del diseño más eficiente, podemos fabricar el material que permita construir lo que se solicite [3].

El costo de fabricación de los compuestos es superior al de los materiales tradicionales como el acero, la madera o el aluminio. Sin embargo, por otra parte es posible ahorrar por medio de la reducción de costos de mantenimiento y aumentando la vida útil y la seguridad;

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

las ventajas de los materiales compuestos pueden valorarse en términos de beneficios con el uso [3].

La figura 2.1 compara, de forma ilustrativa, las propiedades de los materiales compuestos con la de otros dos materiales comunes de amplia utilización, como son: el acero y el aluminio. De estos datos, se deduce las importantes posibilidades de mejora que pueden obtenerse, sobre los materiales convencionales, lo que justifica el importante esfuerzo de investigación y desarrollo que aun hoy en día se está realizando en el campo de los materiales compuestos.

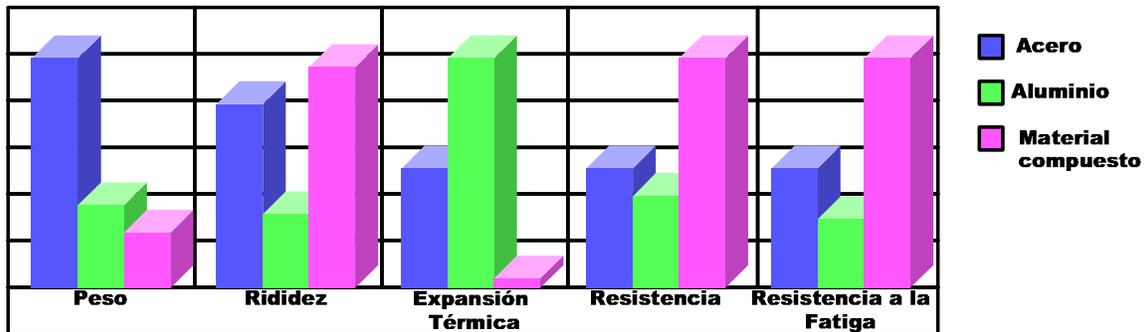


Figura 2.1 Comparación de las propiedades de distintos materiales [4]

A pesar de haberse obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunos factores que aumentan mucho su costo, como son: la dificultad de fabricación o la incompatibilidad entre materiales, además de que se presentan ciertas desventajas como: pérdida de ductilidad, complejidad en su confección, tecnología avanzada en ocasiones y en general la desventaja más clara de los materiales compuestos es el precio. Las características de los materiales y de los procesos encarecen mucho el producto. Para ciertas aplicaciones las propiedades mecánicas como la alta rigidez específica, la buena estabilidad dimensional, la tolerancia a alta temperaturas, la resistencia a la corrosión, la ligereza o una mayor resistencia a la fatiga que los materiales clásicos compensan el alto precio y demás desventajas.

2.1.2 Definición

Los materiales compuestos, o simplemente compuestos, están formados por la combinación de dos o más materiales (fases), sin que se produzca reacción química entre ellos, para formar un tercer material con propiedades y características específicas tales que puedan ser superiores a aquellas de sus constituyentes y que no son obtenibles de ninguna otra forma. Los principales componentes de los materiales compuestos, son una fase discontinua, es decir, los refuerzos y una fase continua llamada matriz, los cuales están separados por una interfaz, además de otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación, véase la figura 2.2 y 2.3.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

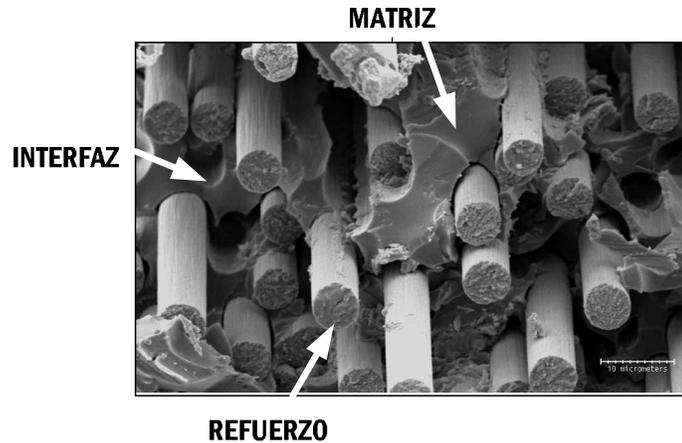


Figura 2.2 Ejemplo de los principales constituyentes de un material compuesto [5].

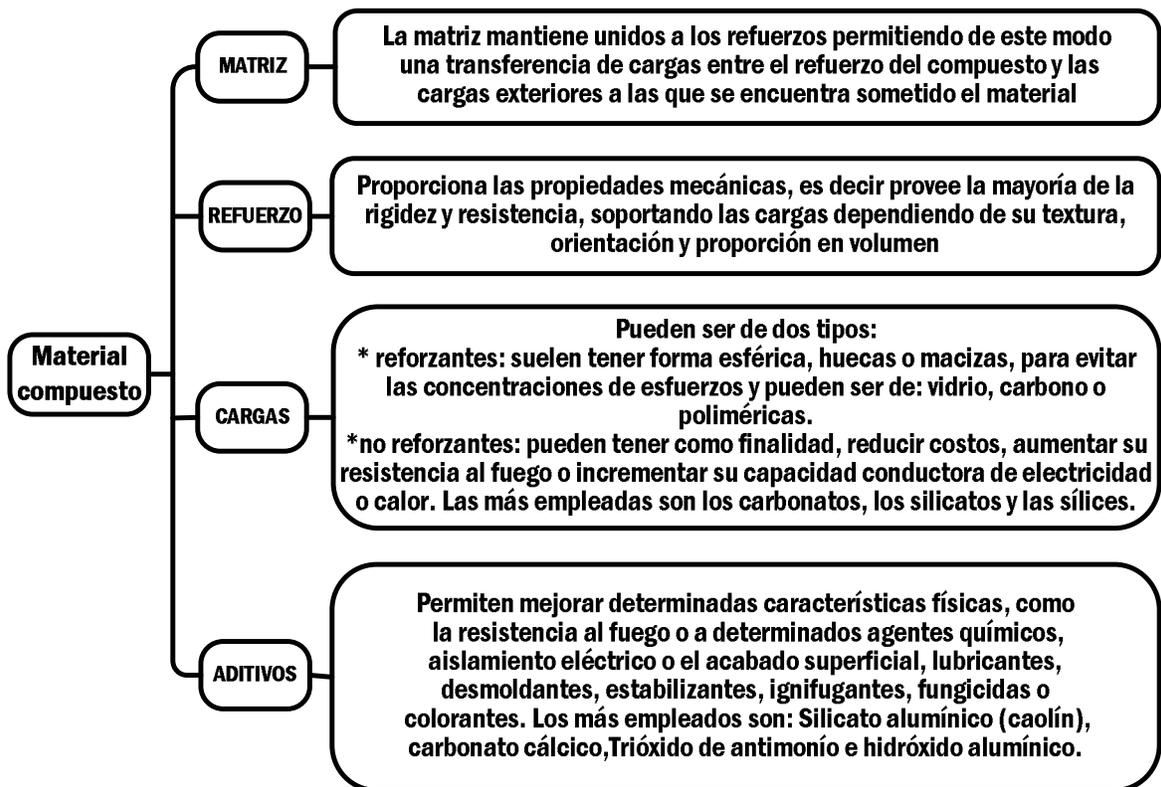


Figura 2.3 Características de los principales constituyentes de los materiales compuestos.

Sin embargo, esta definición da pie a generalizar el concepto de material compuesto, pues en la naturaleza siempre han existido este tipo de materiales, por ejemplo, la madera o el hueso. Por este motivo, es necesario limitar el concepto de material compuesto atendiendo a diferentes aspectos:

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Basándose en estos conceptos, se han propuesto diferentes definiciones entre las que se pueden destacar la que considera que un material compuesto es aquel que cumple las siguientes condiciones[6]:

- Está fabricado de forma artificial (lo que excluye de la definición a materiales naturales como la madera).
- Está formado por dos o más fases o constituyentes física y/o químicamente diferentes, dispuestos de forma adecuada y separados por una interfase definida.
- Sus propiedades no pueden ser alcanzadas por ninguno de sus constituyentes de forma aislada.

A diferencia de los materiales convencionales, las propiedades del compuesto pueden ser diseñadas simultáneamente con el diseño del componente estructural. Las propiedades del compuesto pueden variar, sobre un amplio intervalo de valores, bajo el control del diseñador; lo que a su vez implica un proceso mas complicado, ya que las propiedades de diseño en los materiales convencionales por lo general se limitan a asuntos geométricos.

El secreto de los materiales compuestos reside en la elección de un sistema de matriz adecuado y su asociación con fibras de refuerzo, obteniéndose como resultado un nuevo material con cualidades diferentes, que no son alcanzables por cada uno de los materiales predecesores de manera aislada.

El reto actual de los materiales compuestos, en cualquiera de sus variantes, consiste en aproximarse a las mejores asociaciones de refuerzo-matriz, para proporcionar cada vez materiales con mejores prestaciones para el fin que son concebidos.

2.1.3. Clasificación:

- ✚ De acuerdo a su tipo de refuerzo, los materiales compuestos se pueden dividir en tres grandes grupos, como se presenta en la figura 2.4 :

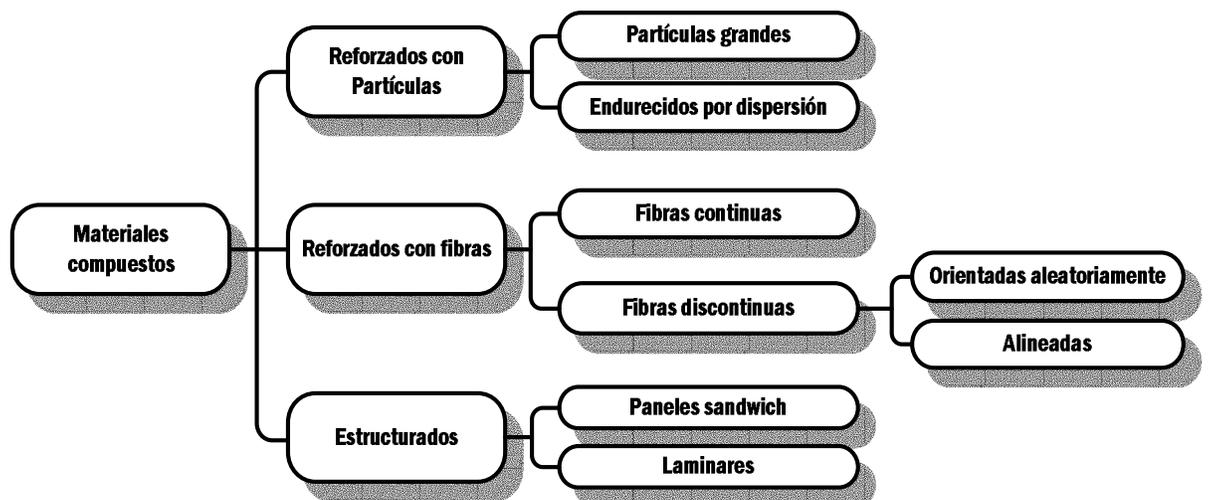


Figura 2.4 Clasificación de los materiales compuestos según su tipo de refuerzo.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

➤ Materiales Compuestos reforzados con partículas.

Están compuestos por partículas de un material duro y frágil dispersas discreta y uniformemente, rodeadas por una matriz más blanda y dúctil. Dentro de estos podemos distinguir dos tipos:

- Los dispersoides, que son materiales endurecidos por dispersión y contienen partículas de 10 a 250 nm de diámetro, que aunque no sean coherentes con la matriz, bloquean el movimiento en las dislocaciones y producen un marcado endurecimiento del material matriz.
- Particulados, que contienen grandes cantidades de partículas gruesas, esto es, que su comportamiento no puede describirse a nivel atómico o molecular y restringen el movimiento de la fase matriz en las cercanías de la partícula, son diseñados para obtener combinaciones de propiedades poco usuales, y no para mejorar la resistencia.

Las partículas no poseen una dimensión predominante como las fibras y generalmente su presencia no es tan efectiva en el incremento de la resistencia de la matriz. La presencia de partículas muy rígidas en una matriz puede, de hecho, reducir la resistencia en virtud de la concentración de esfuerzos en el material de la matriz adyacente. Por lo tanto, el uso de partículas se utiliza para el incremento de otras propiedades como:

- Conductividad y aislamiento térmico, eléctrico y acústico.
- Resistencia a las altas temperaturas.
- Reducción de la fricción
- Resistencia al desgaste superficial.
- Mejora de la dureza superficial.
- Reducción de costos

➤ Materiales Compuestos reforzados con fibras

Por lo general, este tipo de compuestos consiguen mayor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas, aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. En términos de resistencia, las fibras (responsables de las propiedades mecánicas) sirven para resistir los esfuerzos normales. El material matriz (responsable de las propiedades físicas y químicas) transmite las cargas a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la carga aplicada. De forma semejante a los compuestos reforzados con partículas, la regla de las mezclas predice algunas de sus propiedades.

Las fibras pueden ser continuas, largas o cortas, en un intervalo de 5 mm a 25 mm de longitud. En cuanto a su disposición, éstas pueden ser paralelas, unidireccionales, o bidireccionales, en forma de tejido, o inclusive pueden estar aleatoriamente orientadas.

Las fibras son utilizadas en los compuestos debido a que estas son livianas, rígidas y fuertes. Las fibras pueden disponerse de un mismo material o bien, como muchas fibras mezcladas (sistemas híbridos).

Las fibras más comunes disponibles comercialmente son:

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

- Fibras de vidrio
- Fibras de carbono y grafito
- Fibras de aramida (aromáticas, orgánicas, nombres comerciales: kevlar, twaron)
- Fibras de polietileno
- Fibras de carburo de silicio
- Fibras de nitruro de silicio, sílice, alúmina.
- Fibras de Monocristales (*whiskers*)
- Fibras de Asbesto.
- Fibras cerámicas.

Las fibras más utilizadas en compuestos avanzados son las fibras de vidrio, las fibras de carbono y las fibras de aramida. Las fibras de boro, carburo de Silicio (SiC), alúmina y otras fibras son utilizados en aplicaciones especiales.

➤ Materiales compuestos estructurados.

Están formados tanto por compuestos como por materiales convencionales y sus propiedades dependen fundamentalmente de la geometría y de su diseño. Se pueden clasificar en laminares y los llamados paneles sándwich.

-Los laminares están formadas por paneles unidos entre si por algún tipo de adhesivo u otra unión. Incluyen recubrimientos delgados, superficies protectoras, revestimientos metálicos, laminados y todo un conjunto de materiales con aplicaciones específicas. Gran cantidad de compuestos laminares están diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión conservando un bajo costo, alta resistencia o bajo peso.

Otras características de importancia incluyen resistencia superior al desgaste o a la abrasión, mejor apariencia estética y algunas características de expansión térmica poco usuales. Con la regla de las mezclas se pueden estimar algunas de las propiedades, paralelas a la laminillas de los materiales compuestos laminares. También se pueden calcular con poco margen de error: la densidad y la conductividad eléctrica y térmica.

-Los paneles sándwich consisten en dos láminas exteriores de elevada rigidez y resistencia (normalmente plásticos reforzados, aluminio o titanio), separadas por un material menos denso y menos resistente (polímeros espumosos, poliméricos reforzados, cauchos sintéticos, madera o cementos inorgánicos). Estos materiales se utilizan con frecuencia en construcción, en la industria aeronáutica y en la fabricación de condensadores eléctricos

- ☒ De acuerdo a su tipo de matriz, podemos identificar tres grupos principales, como se muestra en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Clasificación de los materiales compuestos de acuerdo a su tipo de matriz

Materiales compuestos de matriz metálica.	<p>Los materiales compuestos de matriz metálica han sido desarrollados principalmente para componentes aeroespaciales y de motores de vehículos automotores. Poseen alta resistencia y muy bajo peso. Se clasifican en tres grandes grupos, de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado: reforzados con fibra continua, reforzados con fibras discontinuas y reforzados con partículas.</p> <p>Así, encontramos como ejemplos de los materiales compuestos de matriz metálica las aleaciones de aluminio con refuerzos de fibras de boro, aleaciones de aluminio reforzados con partículas de alúmina y carburo de silicio, etc.</p>
Materiales compuestos de matriz cerámica.	<p>Los materiales compuestos de matriz cerámica son más recientes, y mejoran las propiedades mecánicas como la resistencia y tenacidad de los materiales cerámicos tradicionales, especialmente en intervalos de bajas temperaturas.</p> <p>Las principales fibras de refuerzo que se combinan con las matrices cerámicas son las de carburo de silicio y las de óxido de aluminio, y en el caso de fibras discontinuas y partículas se utilizan como refuerzo agujas cerámicas de carburo de silicio.</p>
Materiales compuestos de matriz polimérica.	<p>En cuanto a los materiales compuestos de matriz polimérica, podemos definirlos como materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos, y que dadas sus particulares características, pueden ser moldeados con relativa libertad en cuanto a forma se refiere. Son aquellos materiales en los cuales la matriz está constituida por un polímero y el refuerzo es algún tipo de fibra.</p> <p>Podemos destacar entre éstos los materiales compuestos termoestables, con sus principales grupos de matrices, las resinas poliéster, viniléster, epoxi, y fenólicas; y, como materiales de refuerzo, las fibras de vidrio, las aramídicas (kevlar) y las de carbono, tomando la forma de numerosos tipos de estructuras textiles simples o combinadas.</p>

Debido al principal tipo de material que manejaremos de acuerdo a los intereses de esta tesis, se dedicará el estudio a los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras.

2.1.4 Aplicaciones:

Varias industrias y disciplinas incorporan desde hace muchos años las ventajas de los materiales compuestos. A continuación se enumeran algunas aplicaciones principales sin ser limitativas[7].

Industria Naval: cascos mástiles, hélices y diversos elementos para embarcaciones deportivas o de placer, navíos, submarinos científicos y de prospección, recipientes de agua y combustible, ductos de ventilación, boyas.

Industria química: recipientes farmacéuticos, tanques de almacenamiento, tuberías y ductos.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Industria militar y aeroespacial: carcasas de cohetes, hélices de aviones, rotores de helicópteros, recipientes a presión, naves de desembarque.

Industria automovilística: partes de carrocería de automóviles, camiones y ómnibus, defensas, paneles de instrumentos, revestimientos internos.

Construcción civil: perfiles estructurales, pisos, paneles y placas divisorias, hormigón armado, hormigón con fibras, refuerzos estructurales.

Industria del deporte: cascos, esquís, raquetas de tenis, palos de golf, piscinas, arcos y flechas, cuadros de bicicleta, cañas de pesca.

2.2 MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRA

En los últimos años, es considerable el aumento del uso de materiales compuestos avanzados en la manufactura de elementos estructurales. Así pues, los materiales tradicionales como el acero, la madera o el aluminio van cediendo ciertas aplicaciones a materiales compuestos avanzados, con los que se consiguen mejores propiedades específicas.

En particular los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras, presentan hoy día una gran importancia, debido a su continua aplicación en la fabricación de estructuras tanto primarias como secundarias, desplazando a los materiales metálicos y a los convencionales, como por ejemplo los polímeros reforzados con fibra de vidrio o de carbono, presentan unas excelentes relaciones rigidez/peso y resistencia/peso que los hace idóneos para ciertos sectores productivos, dentro de la industria en general y en la aeroespacial en específico.

Estos son los materiales compuestos más conocidos por sus altas prestaciones mecánicas y el alto valor añadido del material final y representan sin duda, el gran avance de los materiales compuestos. Su desarrollo fue inducido por la esperanza de obtener estructuras entre un 20% a 30% más livianas que las construidas con partes metálicas.

2.2.1 Matrices

La fase matriz en un material compuesto con fibras ejerce varias funciones. En primer lugar une las fibras y actúa como un medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados. Solo una pequeña fracción del esfuerzo es resistido por la matriz. Además, la matriz debe ser dúctil y, por otra parte, el módulo elástico de la fibra debe ser mucho mayor que el de la matriz. En segundo lugar, la matriz protege las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente. Estas interacciones introducen defectos superficiales capaces de originar grietas, que podrían producir fallas con esfuerzos de tracción relativamente bajos. Finalmente, la matriz separa las fibras y en virtud de su relativa plasticidad y baja dureza impide la propagación de grietas.

Es importante la adherencia entre la fibra y la matriz, para evitar el arrancado de fibras. La resistencia a la tracción final del compuesto depende en gran parte, de la unión; una unión adecuada es esencial para optimizar la transmisión de esfuerzos desde la matriz a las fibras.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Generalmente se utilizan termoplásticos o termoestables como matriz, porque son materiales dúctiles.

Las matrices de los compuestos poliméricos, de una manera muy general, se pueden clasificar según las variedades indicadas en la figura 2.5.

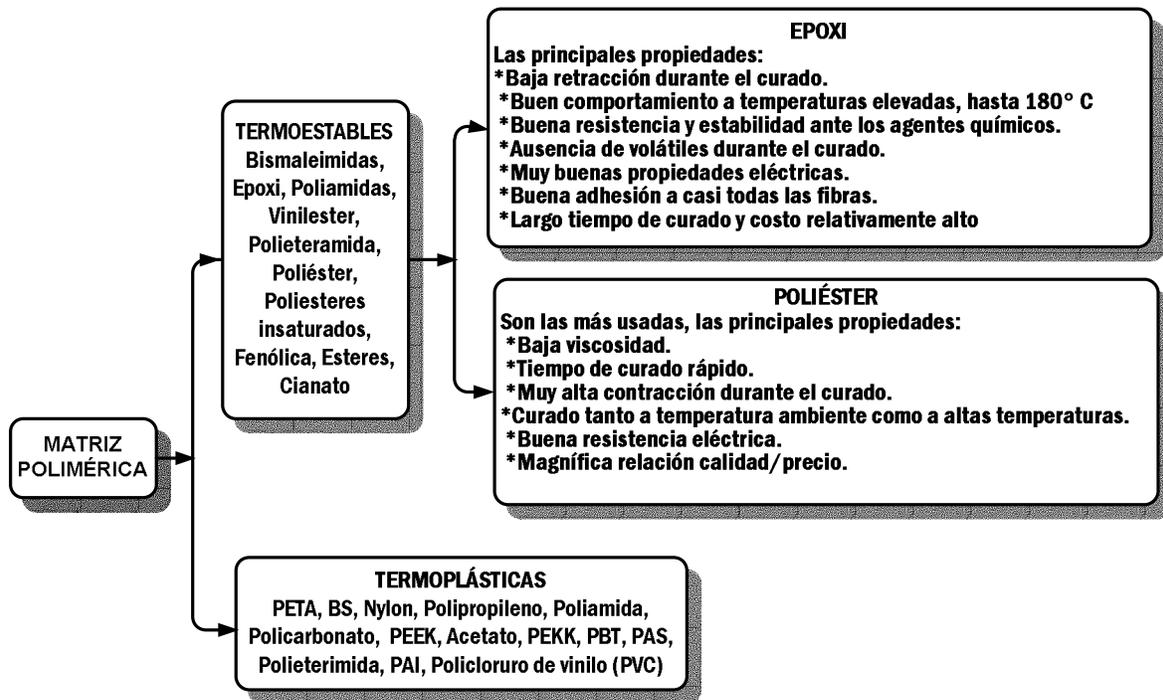


Figura 2.5 Diferentes tipos de matrices

Las resinas utilizadas comúnmente son tipo resinas de poliéster insaturadas o resinas epoxi. Las primeras son más baratas, fáciles de maquinar, fáciles de curar a temperatura ambiente (aunque se pueden curar de forma acelerada a alta temperatura).

Las resinas epoxi son ahora más comunes por las ventajas que presentan: mayor resistencia, menores modificaciones en la etapa de curado, mejor adherencia a las fibras, y se pueden utilizar a temperaturas más altas que las resinas de poliéster [7].

A continuación, en la tabla 2.2 se comparan las propiedades de las dos principales tipos de resinas utilizadas como matrices:

Tabla 2.2 Comparación de propiedades entre los principales tipos de matrices poliméricas [8]

	Exp. Térmica 10 ⁶ mm /°C	Densidad g/cm ³	Resistencia Mpa	Rigidez Gpa	Elongación %	Curado %
Epoxy	50-80	1.2-1.3	55-130	2.7-4.1	2.0-3.2	1.0-5,0
Poliéster	60-205	1.1-1.4	35-103	2.1 -4.1	1.0-5.0	5.0,12-0
Éster Vinílico	93-135	1.1-1.3	73-81	3.0-3.5	3.5-5.5	5.4 -10.3

2.2.2 Fibras

Las fibras del refuerzo deben ser resistentes, rígidas, ligeras y con una temperatura de fusión alta (en los casos de materiales termoplásticos), prefiriéndose las fabricadas con materiales que tengan valores elevados en cuanto a resistencia específica y módulo específico.

La influencia de las fibras sobre las características totales del compuesto es determinante ya que las propiedades del compuesto son función tanto del porcentaje como de la orientación de las fibras, entre mayor porcentaje de fibra (fracción volumétrica de fibra) incrementa la resistencia y rigidez del compuesto; pero el porcentaje máximo deberá estar limitado para asegurar así que la totalidad de la superficie de las fibras quede recubierta con el material de la matriz, este límite máximo suele establecerse en el 80% [9].

La orientación del refuerzo también influye de una manera rotunda en las características del compuesto. Las fibras continuas, colocadas paralelas de forma unidireccional, originan la estructura más resistente aunque con el problema de una fuerte anisotropía. Por ello, se utiliza también la colocación de fibras en disposición ortogonal cruzadas en una o varias capas, sacrificando la alta resistencia por una mayor uniformidad estructural del compuesto (tejidos). Asimismo, existe una relación entre la orientación y el porcentaje de las fibras, así cuando se trata de fibras continuas colocadas unidireccionalmente puede llegarse al máximo porcentaje de fibras, (entre el 70% y 80%), aunque normalmente con los procesos convencionales se obtiene alrededor del 60%. En el caso de compuestos con el refuerzo colocado ortogonalmente los porcentajes de las fibras se reducen y se logra entre el 45% y el 65% [9].

Las fibras son más resistentes que el material a granel que constituye a las fibras, esto se debe a que poseen una mejor estructura, ya que los procesos de fabricación permiten orientar o alinear preferentemente la estructura cristalina o molecular. En las fibras, los cristales están alineados a lo largo del eje de la fibra y por otra parte, tienen menores defectos internos (menores dislocaciones) que en la forma a granel. De este modo, una fibra se caracteriza no solamente por su elevada relación longitud/radio sino también por sus diámetros en órdenes de magnitud similares al cristal.

Todos los materiales estructurales fallan mecánicamente debido a la formación, propagación y crecimiento de defectos o fallas. Debido a que la construcción de un laminado compuesto implica un gran número de fibras capaces de transmitir carga, la falla catastrófica requiere la falla simultánea de muchas fibras. Esta situación permite contar con un aviso temprano de falla a partir de detectar la acumulación de daño significativo en la estructura de del compuesto. Naturalmente, la geometría y la preparación física de las fibras son cruciales para la evaluación de su resistencia y deben ser consideradas en aplicaciones estructurales.

Los principales tipos de fibras utilizadas en los compuestos son: vidrio, carbono y aramida, sus propiedades más importantes son comparadas en la tabla 2.3, mientras que las características fundamental son mostradas en la figura 2.6.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 2.3 Comparación de propiedades entre los principales tipos de fibras [10]

Propiedad	Vidrio E	Carbono (tipo HT)	Aramida (Kevlar 49)
Resistencia a la tensión Ksi (MPa)	450 (3100)	500(3450)	525(3600)
Módulo a tensión Msi (Gpa)	11,0 (76)	33 (228)	19 (131)
% de alargamiento a la fractura	4,5	1,6	2,8
Densidad (g/cm3)	2,54	1,8	1,44

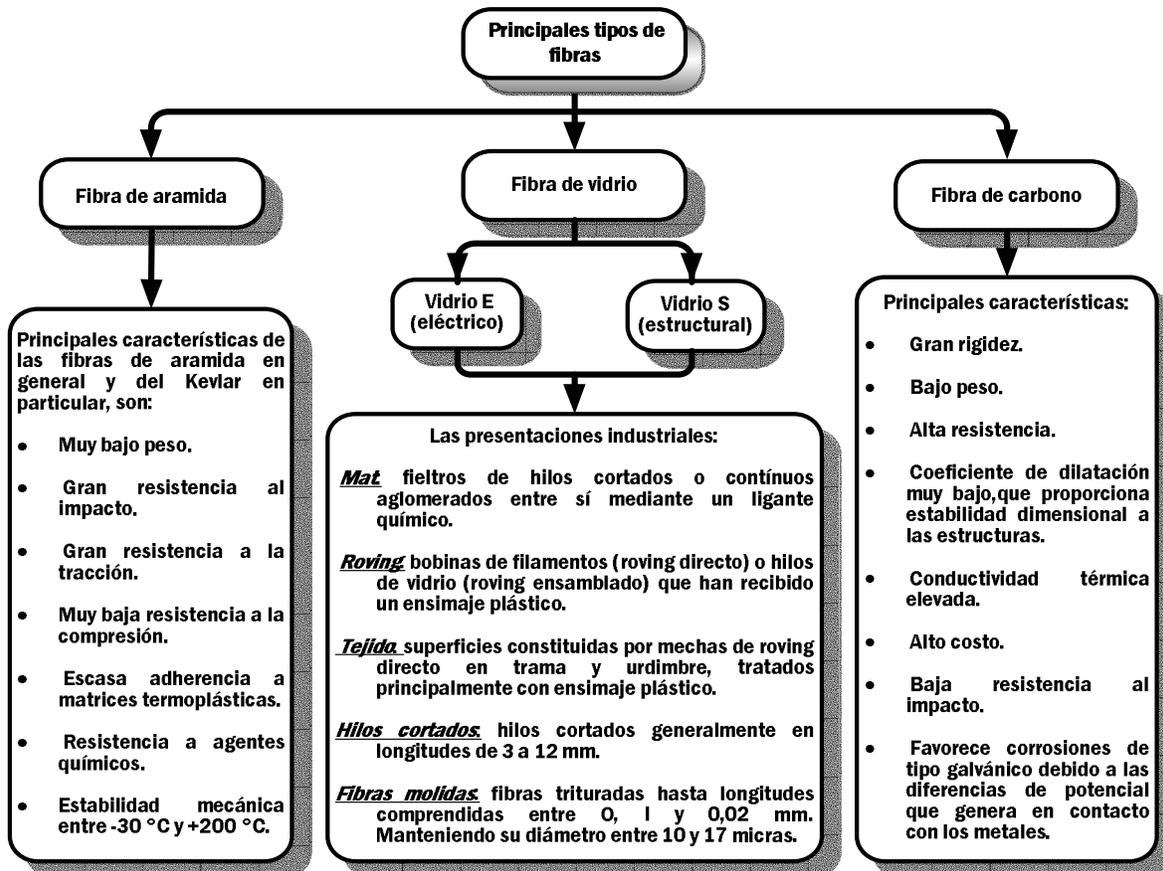


Figura 2.6 Principales tipos de fibras y sus características

Las propiedades de los materiales compuestos son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de las fases dispersas. Geometría de la fase dispersa se refiere a la forma, tamaño, distribución y orientación de las fibras. A continuación en la figura 2.7 se presentan distintos tipos de empaquetamientos y configuraciones en los que se pueden presentar las fibras.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

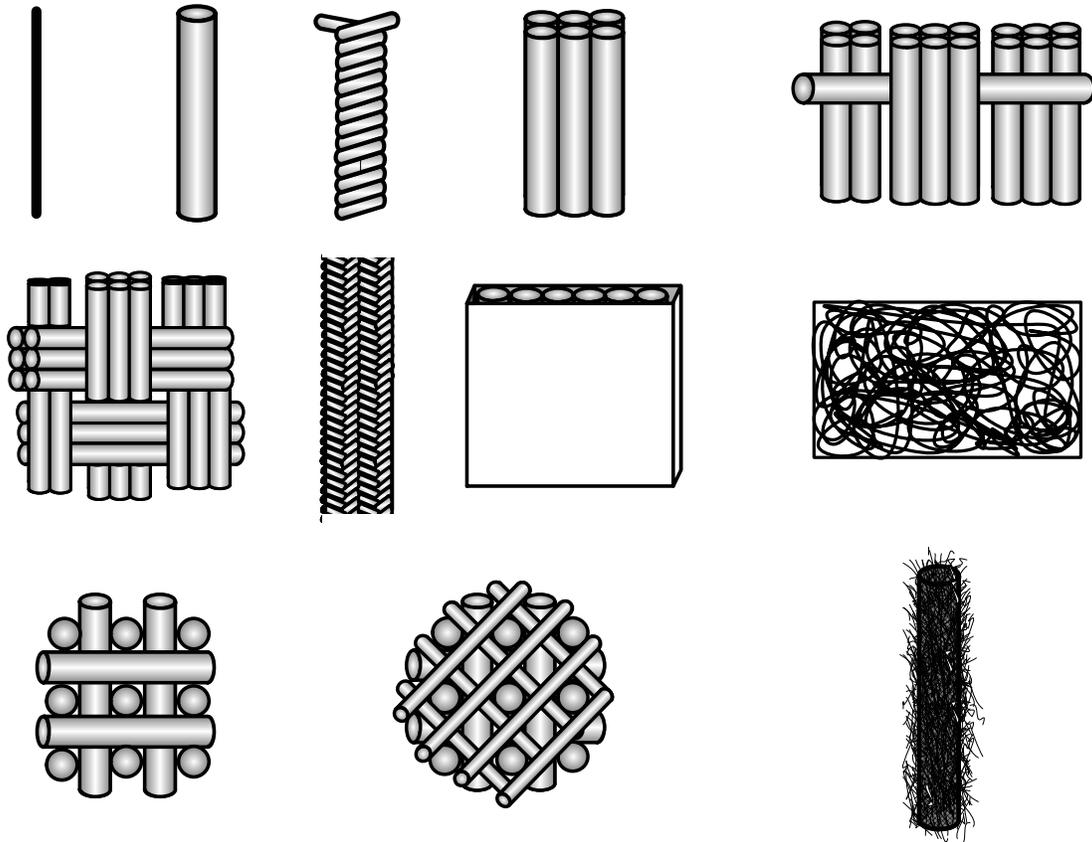


Figura 2.7 Formas esquemáticas de diversas configuraciones y empaquetamiento de fibras [7].

2.3 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

El objetivo de esta sección es presentar el marco teórico sobre la obtención de las propiedades mecánicas aparentes de un material compuesto, en función de los correspondientes a los materiales constituyentes. Sin embargo existirán discrepancias con la determinación del módulo elástico por ensayo, esto se debe principalmente al hecho que las fibras no tienen una adhesión perfecta a la matriz.

La disposición u orientación relativa de las fibras, su concentración y distribución influyen de manera definitiva en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras. Con respecto a la orientación podemos distinguir dos situaciones:

- Alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras
- Alineación aleatoria

Las fibras continuas normalmente se alinean, mientras que las fibras discontinuas se pueden alinear o bien se pueden orientar al azar o alinearse parcialmente. Las mejores propiedades de los materiales compuestos se consiguen con la distribución uniforme de la fibra.

2.3.1 Resistencia

Si se supone un elemento de compuesto, donde entre fibra y matriz existe una adherencia perfecta (caso ideal), es decir, suponer que la unión matriz-fibra es muy resistente, y sólo actúa la tensión longitudinal, entonces la deformación ΔL es la misma para la fibra y la matriz.

De esta forma, la carga soportada por el compuesto F_c es igual a las cargas soportadas por la Fase Matriz F_m y por la Fase Fibra F_f .

$$F_c = F_f + F_m \quad (2.1)$$

Teniendo en cuenta la definición de esfuerzo, $F = \sigma A$, la ecuación 2.1 se transforma en la ecuación 2.2

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.2)$$

Dividiendo todos los términos de la ecuación 2.2 por el área de la sección del compuesto A_c , se obtiene la ecuación 2.3

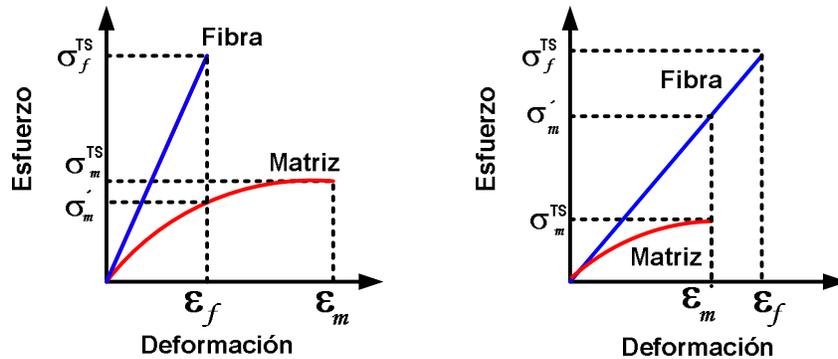
$$\sigma_c = \frac{\sigma_f A_f + \sigma_m A_m}{A_c} \quad (2.3)$$

Donde A_f / A_c y A_m / A_c son las fracciones de área de la matriz y de la fibra, respectivamente. Si las longitudes del compuesto, de la matriz y de las fibras son iguales, A_f / A_c es equivalente a la fracción volumétrica de la fibra V_f , y la otra relación A_m / A_c es igual a V_m (fracción volumétrica de matriz). Por lo que, finalmente, el esfuerzo en el compuesto esta dado por la ecuación 2.4

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2.4)$$

Se debe enfatizar que la ecuación refiere el esfuerzo normal de cualquier compuesto pero en ninguna deformación en específico.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”



(a) Matriz dúctil

(b) Matriz frágil

Figura 2.8 curvas esfuerzo-deformación para dos diferentes combinaciones fibra-matriz[11]

Se estudiará ahora, una combinación fibra-matriz donde, $\epsilon_f < \epsilon_m$ como se muestra en la figura 2.8. La secuencia de falla dependerá de la fracción volumétrica de las fibras. Si se provee de un valor de fracción volumétrica mayor que el valor mínimo V_{min} , el compuesto fallará cuando las fibras fallen. Así que la resistencia en tensión estará dada por la ecuación 2.5:

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_f^{TS} V_f + \sigma_m' V_m \quad (2.5)$$

Donde σ_f^{TS} es el esfuerzo en tensión de las fibras y σ_m' es el esfuerzo en tensión producido por la deformación de la matriz al momento de la falla. Este tipo de falla está ilustrado esquemáticamente en la figura 2.9.

Para pequeñas fracciones de fibra, existe suficiente material matriz para soportar la carga en cuanto las fibras se rompen. El compuesto, por consiguiente, solamente falla cuando los esfuerzos en la matriz alcanzan la resistencia en tensión y puede ocurrir una fractura múltiple de fibras. En esas circunstancias las fibras no contribuyen a la resistencia, y la resistencia en tensión del compuesto se expresa mediante la ecuación 2.6:

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_m^{TS} V_m \quad (2.6)$$

Se considerará ahora la situación donde $\epsilon_f > \epsilon_m$. De nuevo dos diferentes secuencias de fractura se encuentran dependiendo del V_f . La matriz, siendo el componente menos resistente, se fractura antes que las fibras y la carga es entonces transferida a estas. Para fracciones de fibra bajas, las fibras se vuelven incapaces de soportar la carga aplicada y el compuesto falla [véase Figura 2.9 (c)]; el esfuerzo de tensión está dado por la ecuación 2.7:

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_m^{TS} V_m + \sigma_f' V_f \quad (2.7)$$

Donde σ_f' es el esfuerzo en tensión producido por la deformación de las fibras al momento de la falla [véase Figura 2.9 (b)]. En contraste, si hay una fracción de fibras alta, la gran cantidad de fibras es capaz de soportar la de carga cuando la matriz falla y el esfuerzo de tensión estará dado por la ecuación 2.8:

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_m^{TS} V_m \quad (2.8)$$

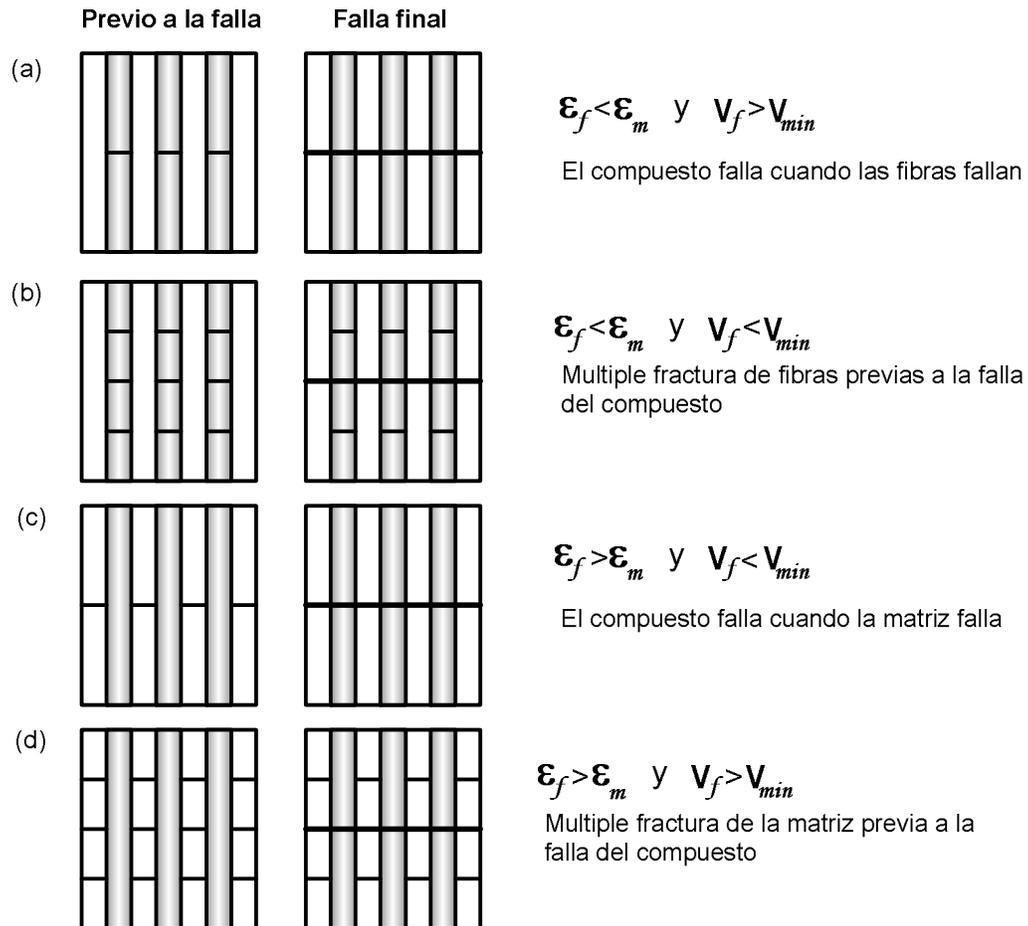


Figura 2.9 Variación en el mecanismo de falla de un compuesto con relación a la deformación de fallas de la fibras, de la matriz y la fracción de volumen de fibras [11].

Si la carga se aplica perpendicularmente a la dirección de la fibra alineada, entonces para esta condición, el compuesto y ambas fases están expuestos al mismo esfuerzo, como se muestra en la ecuación 2.9.

$$\sigma_T = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \quad (2.9)$$

2.3.2 Módulo Elástico

En un estado deformación equivalente tanto para la matriz como para el refuerzo considerando que existe una adherencia perfecta, se cumple que las deformaciones son iguales para ambas fases, como queda establecido en la ecuación 2.10:

$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m \quad (2.10)$$

Dividiendo cada término de la ecuación (2.4) entre sus respectivas deformaciones, que son consideradas iguales, se tiene la ecuación 2.11:

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_f V_f}{\varepsilon_f} + \frac{\sigma_m V_m}{\varepsilon_m} \quad (2.11)$$

Además, si las deformaciones del compuesto, de la matriz y de la fibra son elásticas, siendo E los módulos de elasticidad de cada fase, se cumple con la condición establecida en la ecuación:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.12)$$

Dado que:

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.13)$$

Entonces, la ecuación 2.12 se transforma en la ecuación 2.14

$$E_c = E_m (1 - V_f) + E_f V_f \quad (2.14)$$

En consecuencia, el módulo de elasticidad de un material compuesto reforzado con fibras continuas y alineadas en dirección de las fibras es igual a la suma de los productos de las fracciones volumétricas multiplicadas por los módulos de elasticidad de cada fase.

Para una carga transversal, tomando como referencia la ecuación (2.9) se tiene que la deformación del material compuesto es como muestra la ecuación 2.15:

$$\varepsilon_{c(T)} = \varepsilon_{m(T)} V_m + \varepsilon_{f(T)} V_f \quad (2.15)$$

Considerando la definición de deformación en el compuesto que nos muestra la ecuación 2.16 :

$$\varepsilon_{c(T)} = \frac{\sigma_{(T)}}{E} \quad (2.16)$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación 2.15, obtenemos la ecuación 2.17 :

$$\varepsilon_{c(T)} = \frac{\sigma_{(T)}}{E_m} V_m + \frac{\sigma_{(T)}}{E_f} V_f \quad (2.17)$$

Dividiendo los términos de la ecuación 2.17 por el esfuerzo, tenemos que el módulo elástico queda establecido en la ecuación 2.18 :

$$E_{(T)} = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + V_f E_m} \quad (2.18)$$

2.3.3 Relación de Poisson

Para determinar la relación de Poisson longitudinal del compuesto ν_{lc} , se analiza la deformación en la dirección transversal ε_{tc} producida por un esfuerzo en la dirección longitudinal ε_{lc} . Se debe tomar en cuenta que esto se debe hacer para cada uno de los componentes, es decir debemos sumar la relación de Poisson correspondiente tanto a la fibra como a la matriz, tal como se presenta en la ecuación 2.19. y posteriormente en la ecuación 2.20

$$\nu_{lc} = \frac{\varepsilon_{tc}}{\varepsilon_{lc}} = \frac{\frac{\delta_{tf}}{W}}{\frac{\delta_{lf}}{L}} + \frac{\frac{\delta_{tm}}{W}}{\frac{\delta_{lm}}{L}} \quad (2.19)$$

$$\nu_{lc} = \frac{\delta_{tf} L_f}{\delta_{lf} W_f} + \frac{\delta_{tm} L_m}{\delta_{lm} W_m} \quad (2.20)$$

Donde δ_{lf} y δ_{tf} son las elongaciones longitudinales y transversales de la fibra respectivamente y δ_{lm} , δ_{tm} son las elongaciones sufridas por la matriz de manera longitudinal y transversal respectivamente.

Atendiendo que el elemento de volumen representativo de compuesto es cuadrado $W = L$, entonces de igual manera, que en los casos anteriores, las deformaciones son proporcionales a los fracciones volumétricas de los componentes (V_f y V_m). De manera que se obtienen las ecuaciones 2.21 y 2.22

$$\nu_{lc} = \frac{\delta_{tf}}{\delta_{lf}} V_f + \frac{\delta_{tm}}{\delta_{lm}} V_m \quad (2.21)$$

$$\nu_{lc} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (2.22)$$

De manera análoga, para determinar el módulo de Poisson transversal ν_{tc} , se analiza la deformación en la dirección longitudinal ε_{lc} con respecto a la dirección transversal ε_{tc} .

Considerando que $\nu_t = \varepsilon_l / \varepsilon_t$, de esta manera se obtienen las ecuaciones 2.23 y 2.24.

$$\nu_{tc} = \frac{\varepsilon_{lc}}{\varepsilon_{tc}} = \frac{\frac{L}{\delta_{lf}}}{\frac{L}{\delta_{tf}}} + \frac{\frac{L}{\delta_{lm}}}{\frac{L}{\delta_{tm}}} \quad (2.23)$$

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

$$v_{tc} = \frac{\delta_{lf} W_f}{\delta_{tf} L_f} + \frac{\delta_{lm} W_m}{\delta_{tm} L_m} \quad (2.24)$$

Conociendo que el elemento de compuesto posee igualdad en sus dimensiones, es decir $W=L$, entonces, de igual manera que en los casos anteriores, las deformaciones son proporcionales a los volúmenes de los componentes. De manera que:

$$\frac{W}{v_{tc}} = \frac{L_f}{v_{tf}} + \frac{L_m}{v_{tm}} \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{v_{tc}} = V_f \frac{1}{v_{tf}} + V_m \frac{1}{v_{tm}} \quad (2.26)$$

Despejando de las ecuaciones anteriores la relación de Poisson transversal queda definida en la ecuación 2.27:

$$v_{tc} = \frac{1}{V_f \frac{1}{v_{tf}} + V_m \frac{1}{v_{tm}}} \quad (2.27)$$

2.3.4 Módulo cortante en el plano

Para determinar el módulo de corte del compuesto se siguen pasos similares a los mostrados anteriormente. Se considera un elemento de compuesto cuadrado ($W = L$) sometido a un estado de corte. La deformación angular se puede expresar como $\gamma = \frac{\tau}{G_c}$,

en donde τ es el esfuerzo cortante del material, G es el módulo cortante y γ es la deformación angular y se considera que la deformación del compuesto es proporcional a la deformación de sus componentes, como se presenta en la ecuación 2.28.

$$\gamma = \frac{\Delta_f + \Delta_m}{L} \quad (2.28)$$

Si se considera que el esfuerzo cortante es el resultado de la fuerza cortante entre la superficie sobre la que actúa, entonces se tiene, y que la deformación angular es el desplazamiento en el extremo, dividido entre la longitud, entonces se obtiene la ecuación 2.29.

$$\frac{\frac{V_f}{V_c} \cdot \gamma_f \cdot L + \frac{V_m}{V_c} \cdot \gamma_m \cdot L}{L} \quad (2.29)$$

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Por lo tanto, la ecuación 2.29 se transforma en la ecuación 2.30 :

$$\frac{1}{G_c} \cdot \tau = \frac{V_f}{G_f} \tau + \frac{V_m}{G_m} \tau \quad (2.30)$$

Finalmente el módulo cortante se obtiene a través de la ecuación 2.31

$$G_c = \frac{G_f G_m}{G_f V_f + G_m V_m} \quad (2.31)$$

2.3.5 Importancia de la longitud de las fibras

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no solo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. La fuerza aplicada es transmitida de las fibras a la matriz, es por eso que en este proceso de transmisión de carga, es muy importante la magnitud de la unión en la interfaz de la matriz y fibra (véase la figura 2.10). Al aplicar el esfuerzo de tracción la unión fibra-matriz cesa en los extremos de la fibra y en la matriz se genera un patrón de deformación. Es decir, en los extremos de la fibra no hay transmisión de la carga desde la matriz.

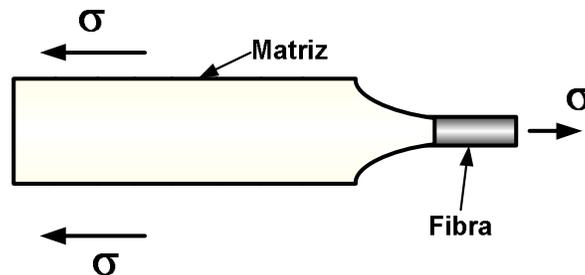


Figura 2.10 Patrón de deformación en una matriz que rodea a una fibra sometida a un esfuerzo de tracción [12].

Existe una longitud de fibra crítica para la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta longitud crítica l_c depende del diámetro d de la fibra, de la resistencia a la tracción σ_f (de la fibra) y de la resistencia de la unión matriz-fibra (resistencia al corte de la matriz) τ_m , de acuerdo a la ecuación 2.32:

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_m} \quad (2.32)$$

Las fibras con $l \gg l_c$ (normalmente $l > 15 l_c$) se denominan continuas y las fibras de menor longitud se denominan discontinuas o fibras cortas. En las fibras discontinuas de longitud significativamente menor que l_c , la matriz se deforma alrededor de la fibra de modo que

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

apenas existe transferencia del esfuerzo y del efecto de reforzamiento de la fibra es insignificante (véase la figura 2.11).

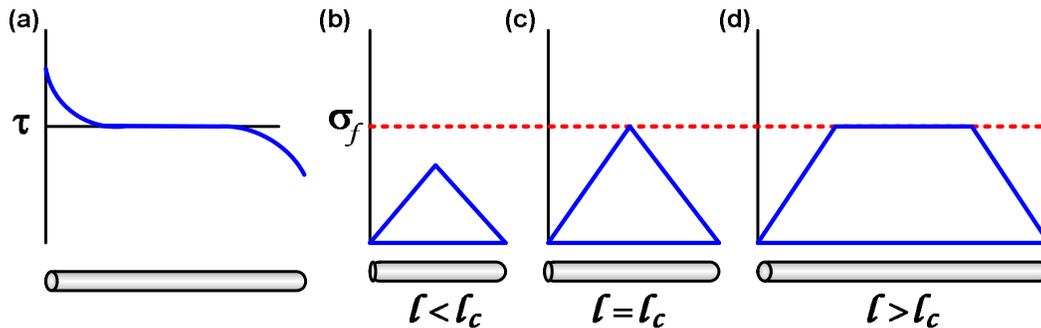


Figura 2.11 Esfuerzo de corte en la matriz (a) y esfuerzo de tracción en la fibra (a, b y c) como una función de la longitud de fibra. [11]

Generalmente, cuando los materiales compuestos tienen fibras orientadas al azar, éstas suelen ser discontinuas y cortas. En estas circunstancias, el módulo elástico se expresa mediante una “regla de las mezclas”:

$$E_c = \eta E_f V_f + E_m V_m \quad (2.33)$$

En esta expresión η es el parámetro de eficiencia de la fibra, que depende de V_f y de la relación $\frac{E_f}{E_m}$. Esta magnitud es inferior a la unidad y ordinariamente del orden de 0,1 a 0,6.

El módulo elástico de los materiales reforzados, tanto si las fibras están alineadas como si están orientadas al azar, aumenta al incrementarse la fracción de volumen de la fibra.

2.4 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS

En años recientes, los materiales compuestos están reemplazando crecientemente a los materiales metálicos convencionales en estructuras automotrices y de aviación. Algunas aplicaciones de materiales compuestos implican componentes y estructuras dinámicamente cargadas. Por lo tanto, hay una necesidad de comprender por completo el comportamiento de los materiales compuestos para facilitar el análisis y diseño de estructuras de material compuesto. La actividad de investigación en esta área tiene muchos propósitos, es necesario entender los efectos de las cargas sobre el comportamiento del material, los esfuerzos a los que está sometido, su resistencia, rigidez y sus modos de falla.

Este tipo de propiedades requeridas como datos de entrada en el análisis de el comportamiento del material, se pueden clasificar en dos tipos: físicas y mecánicas.

La caracterización mecánica de materiales compuestos tiene tres objetivos principales: determinar las propiedades básicas para que sirvan de datos de entrada en el análisis y diseño estructural; investigar y verificar las predicciones analíticas del comportamiento mecánico; llevar a cabo estudios experimentales del material y del comportamiento estructural para geometrías y condiciones de carga específicas.

Los tipos y aplicaciones de las pruebas de caracterización son [13]:

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

- De los materiales constituyentes, esto es, fibra, matriz e interfase para análisis micromecánicos.
- Caracterización de láminas unidireccionales.
- Determinación de las propiedades interlaminares.
- Predicción del comportamiento del material bajo condiciones especiales de carga, por ejemplo, multiaxial, fatiga, termofluencia, etc.
- Análisis experimental de esfuerzos y de modos de falla de laminados compuestos y estructuras, especialmente aquellas que involucran discontinuidades geométricas.
- Valoración de la integridad estructural por medio de pruebas no destructivas.

A diferencia de los materiales metálicos convencionales, en los cuales solo necesitamos conocer 4 propiedades mecánicas para poder predecir su comportamiento, las propiedades obtenidas de la caracterización, necesarias para poder predecir el comportamiento de los laminados de materiales compuestos se muestran a continuación en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Propiedades mecánicas de un material compuesto [14]

Propiedad mecánica	Símbolo	Prueba
módulo de elasticidad longitudinal	E_1	tensión uniaxial
módulo de elasticidad transversal	E_2	tensión uniaxial
módulo de cortante en el plano	G_{12}	tensión uniaxial ($\pm 45^\circ$); tensión o compresión con dispositivo
relación de Poisson longitudinal-transversal	ν_{12}	tensión uniaxial
relación de Poisson transversal-longitudinal	ν_{21}	tensión uniaxial
esfuerzo de ruptura en tensión en sentido longitudinal	$\sigma_{1 \text{ ruptura tensión}}$	tensión uniaxial
esfuerzo de ruptura en tensión en sentido transversal	$\sigma_{2 \text{ ruptura tensión}}$	tensión uniaxial
esfuerzo de ruptura en compresión en sentido longitudinal	$\sigma_{1 \text{ ruptura compresión}}$	compresión con dispositivo
esfuerzo de ruptura en compresión en sentido transversal	$\sigma_{2 \text{ ruptura compresión}}$	compresión con dispositivo
esfuerzo de ruptura en corte	$\tau_{1 \text{ ruptura tensión}}$	tensión uniaxial ($\pm 45^\circ$); tensión o compresión con dispositivo

El análisis de las estructuras en material compuesto requiere conocer las propiedades promedio de los materiales. Estas propiedades se pueden predecir a partir de las propiedades y orientación de los constituyentes; sin embargo, la caracterización requiere de un programa de pruebas extenso para determinar el gran número (más de 10) de las propiedades básicas del material mediante procedimientos normalizados.

2.4.1 Tensión axial

Este ensayo es de aplicación generalizada, las propiedades que se obtienen pueden aplicarse en el diseño de distintos componentes. Las velocidades de deformación suelen

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

ser muy pequeñas ($\epsilon=10^{-4}$ a 10^{-2} s⁻¹). Para medir las deformaciones se utiliza un extensómetro o galga extensométrica, así lo que se mide es el cambio de longitud en el espécimen Δl en una longitud determinada l_0 .

Este tipo de prueba permite determinar cinco constantes elásticas (módulo de elasticidad longitudinal, módulo de elasticidad transversal, módulo de cizallamiento, relación de Poisson longitudinal-transversal, relación de Poisson transversal-longitudinal) y tres propiedades de resistencia (esfuerzo de ruptura en tensión en sentido longitudinal, en sentido transversal, y en corte).

Las probetas de tensión son láminas con lados rectos y una sección transversal constante con lengüetas adheridas en la zona de sujeción de las mordazas. Los detalles están dados en la norma ASTM D-3039 [15]. Las probeta longitudinal (0°) es usualmente de 12.7 mm de ancho mientras que una probeta transversal (90°) tiene 25.4 mm. El espesor recomendado es de 0.5 a 2.5mm.

Algunas veces se preparan compuestos unidireccionales en forma tubular de pared delgada, los cuales se caracterizan, usando el mismo procedimiento de fabricación para estructuras tubulares. Las probetas son instrumentadas en la parte exterior con galgas extensométricas a lo largo de la dirección axial como circunferencial.

En la figura 2.12 se muestra el ensayo de tensión a una probeta fabricada de resina poliéster reforzada de fibra de vidrio con apilamiento $[0/90^{\circ}]_{2s}$ para determinar las constantes indicadas en el párrafo anterior, instrumentada con dos galgas extensométricas, una orientada en la dirección de aplicación de la carga y otra transversalmente, de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM.



Figura 2.12 Ensayo de tensión uniaxial en probeta de fibra de vidrio y resina poliéster

2.4.2 Compresión axial

Este tipo de pruebas son difíciles por la tendencia a la falla prematura debido a la inestabilidad (pandeo). Los resultados dependen de la longitud calibrada, l , de la probeta; si

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

ésta es muy larga, la probeta se pandea, ocasionando una falla prematura; si es muy corta, las lengüetas afectan adversamente el estado de esfuerzos, dando valores altos.

A través de los años, muchos métodos de prueba han sido desarrollados y usados, incorporando una variedad de diseños de probetas y aparatos de carga.

Los métodos desarrollados se clasifican en tres tipos: Ensayos Tipo I, probetas de longitud calibrada corta y no apoyada. Ensayos tipo II, probeta larga pero con longitud calibrada más corta y completamente apoyada. Los ensayos tipo III laminado pegado a un núcleo tipo panal de abeja que se ensaya en compresión o en flexión pura.

En los de tipo I las probetas son de una longitud calibrada corta y no apoyada, tal es el caso cuando se usa el dispositivo cilíndrico Celanese, descrito en la norma ASTM D-3410, mostrado en la figura 2.13. La probeta se coloca en un juego de mordazas trapezoidales colocadas dentro de un collar y en un contenedor cilíndrico. La longitud de la probeta es 12.7 mm para pruebas longitudinales y 6 mm para transversales. Se obtienen altos valores de rigidez y de resistencia en compresión debido a que se desarrollan cargas elevadas de fricción entre las mordazas y la probeta. La más grande desventaja de este método es que requiere un contacto perfecto entre cono y cono que normalmente no se logra, debido a las pequeñas variaciones entre las lengüetas de las probetas.

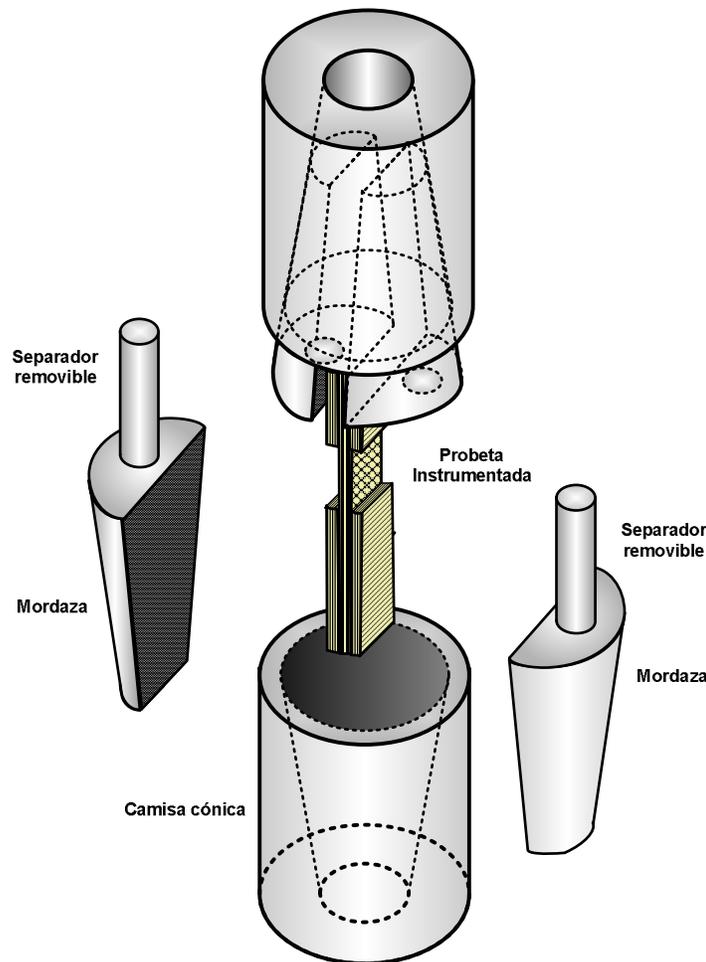


Figura 2.13 Esquemático del dispositivo de compresión Celanese y sus componentes.

Este tipo de dispositivo presenta condiciones inestables que causa giros laterales en las mordazas, lo cual causa grandes fuerzas de fricción que envuelven al cilindro. Esta situación puede resultar en valores de rigidez y resistencia a la compresión, sobrevaluados, todo esto crea la necesidad de modificar este dispositivo y una evolución es el dispositivo IITRI, mostrado en la figura 2.14.

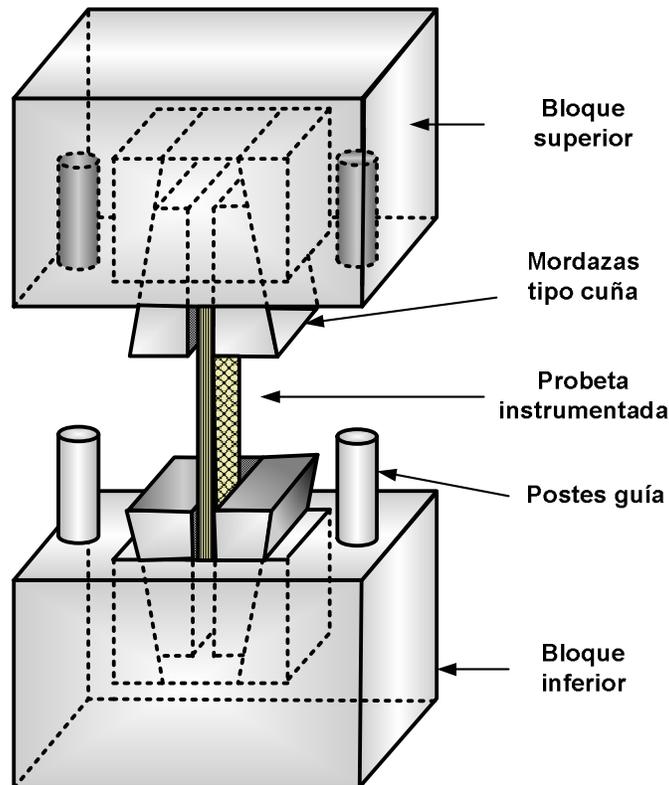


Figura 2.14 Esquemático del dispositivo de compresión IITRI y sus componentes.

En el dispositivo IITRI las mordazas cónicas se reemplazan por cuñas trapezoidales con las que el contacto entre superficies se logra para todas las posiciones de las cuñas. Además, se logra una compresión previa de las lengüetas de la probeta con lo que se prevé el deslizamiento durante las cargas iniciales. Se colocan galgas extensométricas en ambos lados de la probeta para verificar que la falla se produzca por esfuerzo normal en compresión y no por flexión producida por pandeo, lo que se verifica cuando las lecturas de las galgas de ambas caras son similares hasta la falla. Este método ha mostrado ser sensible a la planicidad y al paralelismo de las lengüetas, por lo que, se debe asegurar que la probeta reúne los requisitos en cuanto a tolerancias.

En los ensayos tipo II la probeta es más larga pero con una longitud calibrada más corta, completamente apoyada y con lengüetas más largas. Los Datos producidos por los ensayos de tipo II son similares a los obtenidos en los ensayos de tipo I, excepto en el caso de las probetas a 0° , para las cuales este método arroja valores consistentemente bajos.

Los ensayos tipo III implican el pegado del laminado a un núcleo tipo panel de abeja que provee el apoyo lateral requerido. Las probetas tipo sándwich son sometidas a flexión en cuatro puntos, sometiendo la parte superior de la lámina a compresión.; mientras que la

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

capa inferior debe ser del mismo material pero con la mitad del espesor de la capa superior (véase la figura 2.15). Las dos láminas están separadas y pegadas a un panel de abeja de aluminio. Cuando la viga es cargada, lo que se espera es la falla en compresión de la cubierta superior. Mediante este ensayo es posible medir propiedades tales como; la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad en compresión. La deformación se mide utilizando extensómetros o galgas extensométricas.

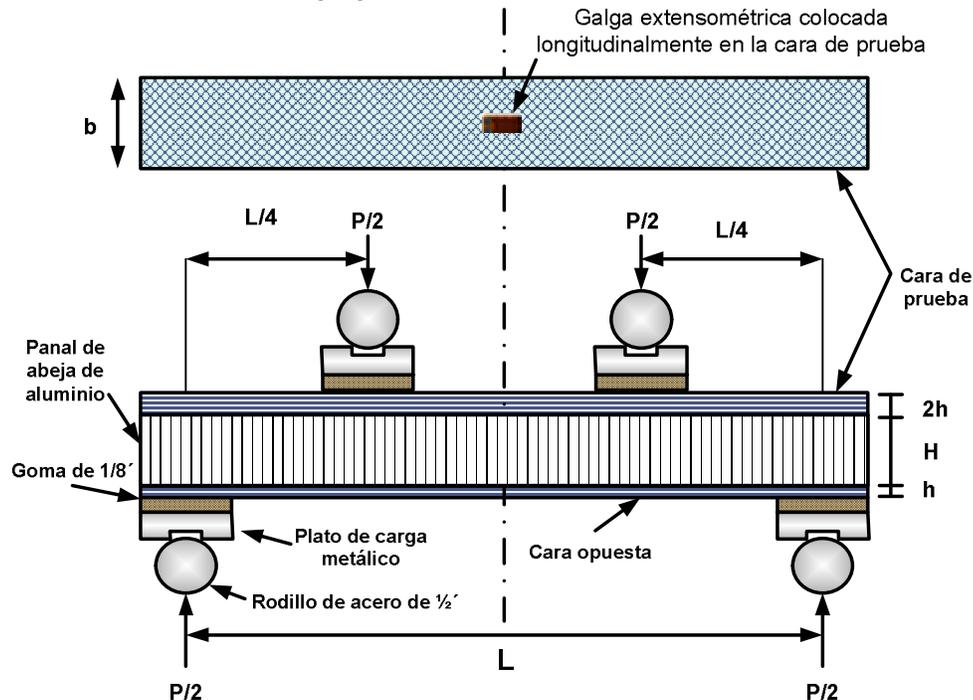


Figura 2.15 Probeta para la prueba de la viga sándwich para pruebas de compresión de compuestos.

2.4.3 Caracterización de materiales compuestos en corte

Con estas pruebas se puede medir el esfuerzo cortante y el módulo cortante de los materiales compuestos, sin embargo esas propiedades también han probado ser las más difíciles de obtener comparadas con otras, debido a la dificultad para definir un estado de esfuerzos en corte puro, reportándose, como consecuencia, discrepancias significantes en la literatura. Según Han y Piggot [16], al menos 10 tipos de pruebas han sido usados para medir el esfuerzo de corte aparente en los materiales compuestos reforzados con fibras, los cuales usualmente arrojan resultados diferentes. Estas pruebas se realizan comúnmente para medir las propiedades de corte en el plano: esfuerzo cortante en el plano y el módulo cortante en el plano del laminado. 1-2 (direcciones $l-t$). Las propiedades de corte que describen la respuesta del material en el plano 1-3 o 2-3 se les denomina cortante transversal, utilizando un sistema cartesiano de coordenadas y describiendo el sistema de coordenado principal del material usando 1,2 y 3 ejes como se muestra en la figura 2.16.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

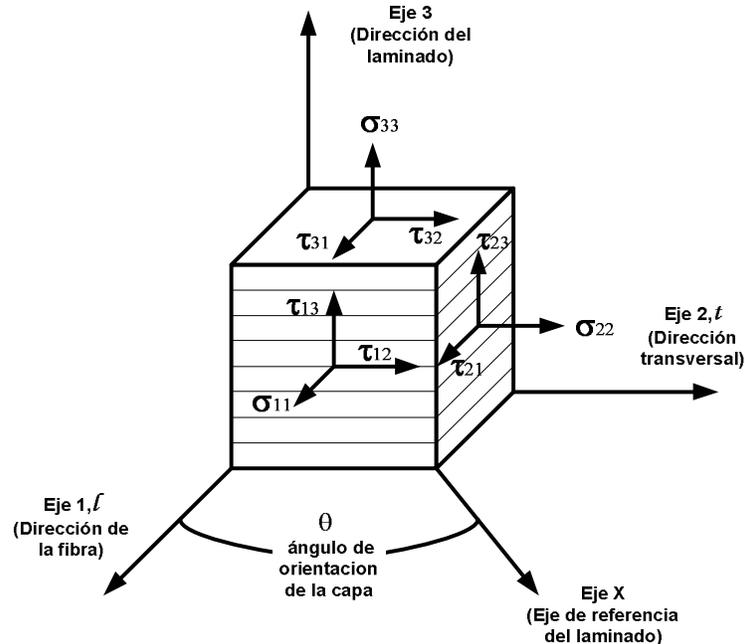


Figura 2.16 Sistema coordinado de referencia para un material compuesto [17].

La falla de un compuesto unidireccional para un esfuerzo aplicado en alguna dirección diferente de la dirección de las fibras, normalmente se presenta en un plano paralelo a la dirección de la fibra, debido a que generalmente la resistencia de la matriz es mucho menor a la resistencia del refuerzo, lo que hace que los laminados multidireccionales comúnmente fallen entre las capas. Sin embargo, la resistencia al corte en el plano de laminados multidireccionales es completamente diferente, ya que involucra una cantidad masiva de fallas en las fibras.

En los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras se presenta una resistencia al corte relativamente baja, en planos del material dominados por las propiedades de la matriz.

Valores de rigidez y esfuerzo cortante relativamente bajos, muchas veces comprometen el comportamiento del material, forzando a los diseñadores a especificar las secuencias de apilamiento de las capas con el objetivo de maximizar la resistencia al corte. El efecto resultante de la optimización de estas propiedades es que otras propiedades mecánicas frecuentemente se ven afectadas.

Se han hecho esfuerzos experimentales y analíticos en el desarrollo de métodos de caracterización en corte (tanto en el plano como fuera del mismo), para la determinación del módulo cortante y la resistencia al corte de materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras; estos métodos deben generar en la probeta específica una región de esfuerzo cortante uniforme y puro en la sección de prueba del espécimen, esto último es una de las principales dificultades. Además, debe existir una relación única entre la carga aplicada y la magnitud del esfuerzo cortante en la sección de prueba.

La dificultad de inducir un esfuerzo cortante puro se incrementa conforme a la anisotropía y la heterogeneidad del material. Conforme estas características se incrementan, los estados

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

de esfuerzos complejos se desarrollan muy cerca de las zonas de carga convirtiéndose en zonas más dominantes que el estado de esfuerzos en la zona de prueba. En los materiales compuestos es difícil obtener regiones con un esfuerzo cortante uniforme, libre de algún otro tipo de esfuerzos, aunque la producción del espécimen y la alineación de la prueba fueran perfectas. Las dificultades encontradas para producir un estado de esfuerzo puro en un material compuesto han resultado un número reducido de métodos de uso general y normalizado.

Algunas de las determinaciones o conclusiones obtenidas por el grupo de expertos en compuestos de la ASTM [18] son que:

- No existe un método de prueba estandarizado que sea capaz de producir un estado perfecto de corte puro en cada material, aunque algunos de estos métodos pueden estar aceptablemente cerca para ciertos sistemas específicos de materiales.
- Los esfuerzos resultantes de los métodos de prueba que no producen una aproximación razonable a un corte puro, o que la causa de falla se obtenga mediante un modo de falla de corte no puro, no debe entenderse por “resistencia al corte”.
- Puesto que los valores de resistencia última de las pruebas de corte existentes no son capaces de proveer un adecuado criterio de comparación para sistemas de materiales, se sugiere tomar como esfuerzo cortante máximo, el esfuerzo resultante de la intersección de una recta paralela a la recta elástica de desplazada 0.2%.

La caracterización completa de propiedades en corte de una lamina o laminado de material compuesto requiere la medición del modulo de corte y resistencia al corte en los planos 1-2, 1-3 y 2-3. El interés del presente trabajo sólo está enfocado en las propiedades en el plano(1-2 o l-t).

Pueden ser obtenidos módulos de corte aceptables dentro de una gama de métodos de prueba, pero todos los métodos tienen limitaciones tanto físicas como geométricas. Algunos de los métodos que se encuentran dentro del intervalo de resultados aceptables son los siguientes.

2.4.3.1 Prueba de corte a $\pm 45^\circ$

Es un método relativamente directo para encontrar las propiedades al corte en el plano (esfuerzo y modulo cortante) de sistemas reforzados con fibras, mediante la aplicación de tensión uniaxial a una probeta de un laminado con una orientación de capas balanceada y simétrica a $\pm 45^\circ$; lejos del área de la región de las mordazas el esfuerzo cortante en el plano es una simple función del promedio de los esfuerzos de tensión aplicados, permitiendo entonces un cálculo directo de la respuesta al corte del material.

El procedimiento de la prueba esta descrito en las normas basadas en ASTM D 3518 [19] y utiliza una probeta rectangular de 250mm de longitud, 25mm de ancho y un espesor de 2mm formado con 8 capas (véase la figura 2.17). Se recomienda que para los materiales formados por capas con espesor del orden de 0.125mm, el laminado conste de 16 capas.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Las superficies y ejes de las probetas deben estar libres de defectos tales como rayones, delaminaciones, agujeros, etc.

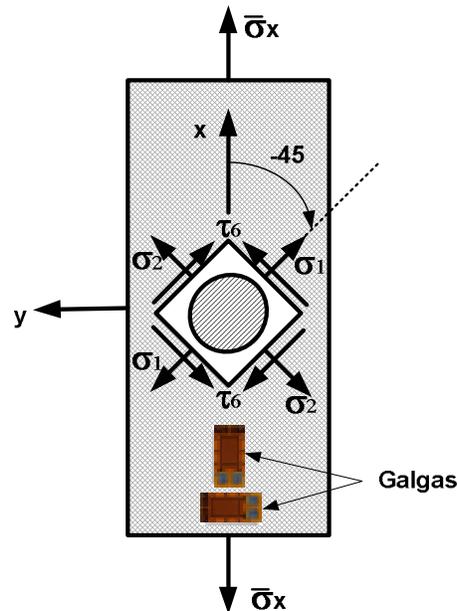


Figura 2.17 *Probeta con un laminado $\pm 45^\circ$, sometida a tensión uniaxial para determinar las propiedades en corte.*

Los esfuerzos normales en el sistema coordenado de la lámina (σ_1 y σ_2) dependen del esfuerzo de tensión aplicados axialmente sobre la probeta ($\bar{\sigma}_x$) y el esfuerzo de corte inducido (τ_{xy}), como se muestra, tal como se describe en las ecuaciones 2.34

$$\sigma_1 = \frac{\bar{\sigma}_x}{2} + \tau_{xy} \quad \sigma_2 = \frac{\bar{\sigma}_x}{2} - \tau_{xy} \quad \tau_6 = \frac{\bar{\sigma}_x}{2} \quad (2.34)$$

Donde τ_6 el esfuerzo de corte en el plano l-t (1-2) y τ_{xy} es el esfuerzo de corte en el plano axial – transversal de la probeta, generado debido a la desigualdad de acoplamiento de corte. (Ver figura 2.17). Las deformaciones de la lámina en el plano l-t (1-2) (ε_1 y ε_2) se obtienen a partir de las deformaciones de la probeta en dirección axial ε_x y transversal ε_y , como se presenta en la ecuación 2.35

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y}{2} \quad (2.35)$$

La deformación angular en el plano l-t (1-2) se obtiene mediante la ecuación 2.36

$$\gamma_6 = \bar{\varepsilon}_x - \bar{\varepsilon}_y \quad (2.36)$$

Donde $\bar{\varepsilon}_x$ y $\bar{\varepsilon}_y$ se miden sobre la probeta mediante las galgas axial y transversal respectivamente (ver figura 2.17). El módulo cortante G_{12} en el plano de una lámina

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

unidireccional es obtenido de la pendiente de la curva esfuerzo-deformación (τ_6 vs γ_6) como se presenta en la ecuación 2.37

$$G_{12} = \frac{\bar{\sigma}_x}{2(\bar{\epsilon}_x - \bar{\epsilon}_y)} \quad (2.37)$$

Este módulo no se ve influenciado por efectos de borde presentes en la probeta por el estado biaxial de esfuerzos existentes en la lámina; esta ecuación puede ser rescrita en la ecuación 2.38

$$G_{12} = \frac{\bar{E}_x}{2(1 - \bar{\nu}_{xy})} \quad (2.38)$$

De esta manera el modulo cortante de la lámina puede ser obtenido en términos del módulo axial \bar{E}_x y de la relación de Poisson $\bar{\nu}_{xy}$ de un laminado a $\pm 45^\circ$.

La resistencia al corte en el plano se expresa como:

$$\tau_{12} = \frac{P_{\max}}{2bh} \quad (2.39)$$

Donde b y h son el ancho y el espesor de la probeta respectivamente, P_{\max} es la carga de ruptura y τ_{12} es el esfuerzo cortante aplicado en dirección 1-2.

El espécimen se prueba usando lengüetas para inducir que la falla se presente fuera de la región de las mordazas. Esta prueba provee un método aceptable para determinar el módulo cortante en el plano, pero se debe tener precaución al interpretar la resistencia y el esfuerzo último, esto es debido a que la probeta se somete a un estado biaxial de esfuerzos y no corte puro.

Previo a la fractura final se pueden presentar: agrietamiento en capas múltiple, la rotación de las fibras o delaminaciones internas. Las normas ISO [19] recomiendan la prueba sea terminada cuando γ_{12} sea igual al 5.0%.

2.4.3.2 Prueba de corte 10° fuera del eje

Este método utiliza una probeta rectangular de tensión unidireccional con las fibras orientadas a 10° con respecto al de aplicación de carga. La prueba consiste en una probeta de laminado unidireccional sometida a tensión, con las fibras orientadas a 10° respecto al de aplicación de carga, como se puede apreciar en la figura 2.18. Un estado biaxial de esfuerzos es inducido en el sistema principal de coordenadas cuando se somete a una carga de tensión uniaxial. El ángulo de 10° fue elegido para minimizar los componentes de esfuerzo longitudinal y transversal, que en ese ángulo se aproximan al valor mínimo.

Este método no está registrado en las normas, por lo tanto no hay especificaciones ciertas acerca de las dimensiones y preparación de la probeta. Se recomienda se prepare de manera idéntica al procedimiento empleado para la prueba de $\pm 45^\circ$.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

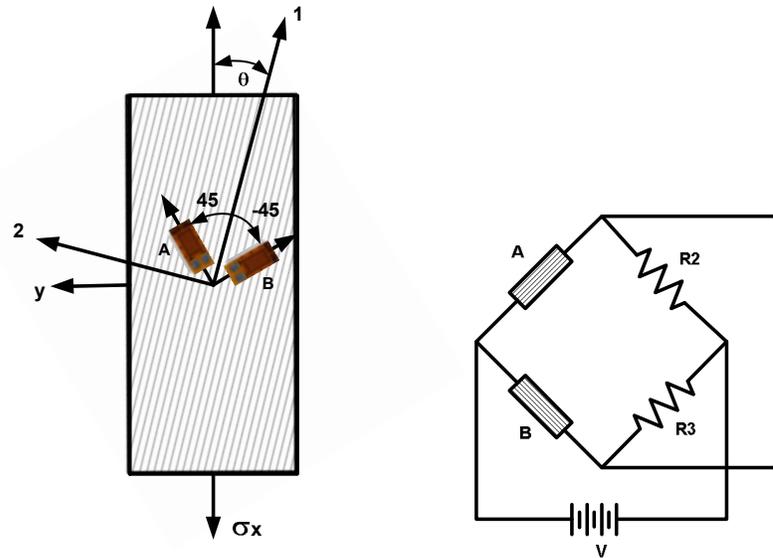


Figura 2.18 Arreglo de galgas para medición de deformaciones en probeta con un laminado a 10° respecto al eje de aplicación de carga, sometida a tensión uniaxial para determinar las propiedades en corte.

La diferencia algebraica de las deformaciones leídas de las galgas A y B arroja directamente la deformación de corte en el plano mediante la ecuación 2.40.

$$\gamma_6 = \overline{\varepsilon_x} - \overline{\varepsilon_y} \quad (2.40)$$

La diferencia es leída directamente mediante la instrumentación, cuando las dos galgas se conectan a brazos adyacentes, mediante un puente de Wheatstone, tal como está esquematizado en la figura 2.18. La probeta se somete a un esfuerzo de tensión uniaxial σ_x hasta la falla. Los esfuerzos de corte referido al sistema coordinado de las fibras está dado por:

$$\tau_6 = \sigma_x \sin \theta \cos \theta = 0.171 \sigma_x \quad (2.41)$$

Donde $\theta = 10^\circ$. El modulo de corte en el plano puede ser obtenido dibujando la curva τ_6 vs γ_6 tomando la pendiente inicial. Los valores últimos de τ_6 y γ_6 definen le resistencia al corte y la deformación ultima. Este método está limitado a compuestos laminados unidireccionales. La probeta no está bajo un estado de corte puro y sufre de los efectos de esfuerzos combinados. Esta prueba produce, por lo regular, resultados con un alto modulo y un esfuerzo sensiblemente menor que otros métodos y además requiere de un factor de corrección para calcular el verdadero modulo cortante.

La falla en esta prueba se produce debido a la combinación de esfuerzos transversales de tensión y cortantes, como consecuencia este método tiende a subestimar los valores de esfuerzo máximo al corte.

2.4.3.3 Prueba de corte con rieles.

Este método determina las propiedades de corte en el plano, mediante la aplicación de fuerzas cortantes en un laminado usando 2 o 3 rieles alineados. Los dos tipos de configuraciones para esta prueba están especificados en la norma ASTM D 4255 [21].

La prueba de corte con dos rieles (Figura 2.19) se trata de sujetar los lados mas grandes de una probeta rectangular entre dos pares de barras rígidas de acero, con los otros lados permaneciendo sin esfuerzo. Las barras de carga normalmente están atornilladas al espécimen de la prueba. Una fuerza de tensión es aplicada a los carriles, los cuales inducen una carga cortante en el plano de la probeta. La norma ASTM D 4255 [21] especifica una probeta de 76mm de longitud y 152mm de ancho. La deformación al corte es determinada principalmente por galgas extensométricas que permiten medir la deformación en corte.

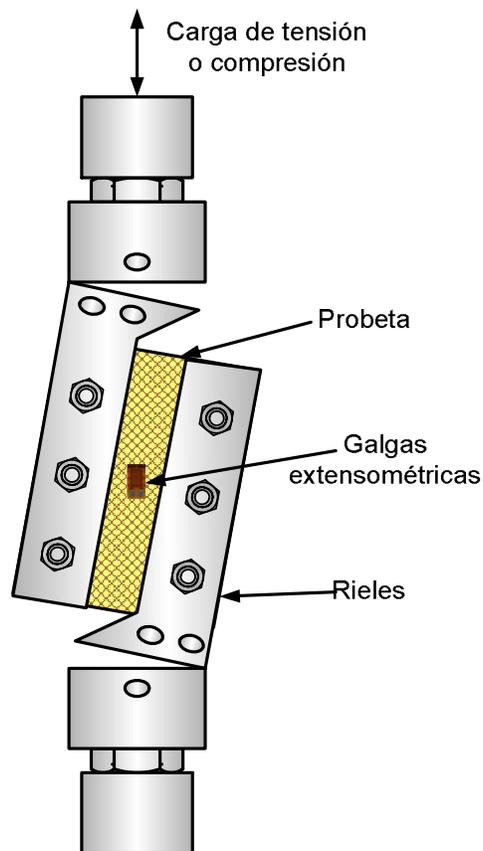


Figura 2.19 Dispositivo de dos rieles de corte

La prueba con tres carriles de corte (Figura 2.20 (a)), desarrollado para producir una aproximación muy cercana a un esfuerzo cortante puro, consiste en tres pares de rieles sujetos a la probeta, usualmente mediante tornillos. Los dos pares de carriles exteriores están unidos a la base que se apoya en la maquina de pruebas. El carril central se guía a través de una ranura en la parte superior de la base del dispositivo. Este arreglo es cargado a compresión, ya que no requiere sujetar la base del dispositivo a la maquina de pruebas. El módulo cortante es medido mediante galgas al centro de las dos secciones de prueba

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

colocadas a 45° del eje longitudinal del espécimen. Las dimensiones del espécimen deben ser 137mm de ancho y 152mm de longitud. Se recomienda que los laminados tengan entre 1.27 y 3.17 mm de espesor.

Las probetas se sujetan usando tornillos de 9.5 mm insertados en agujeros de diámetro de 12.5mm, esto es para asegurar que la carga cortante sea introducida en el laminado mediante fuerzas de fricción entre la probeta y los carriles.

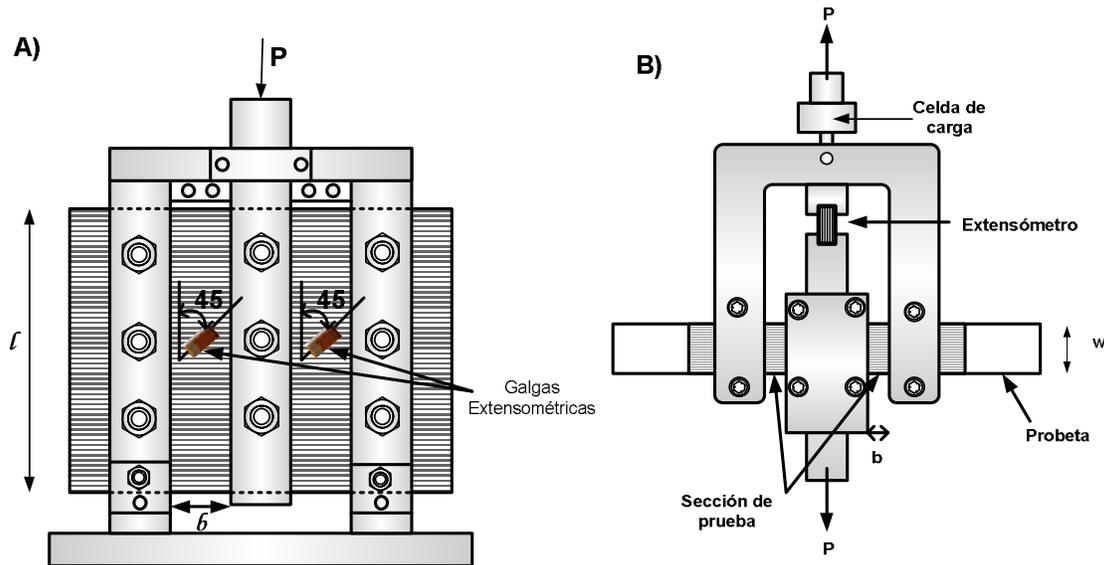


Figura 2.20 (A) Dispositivo de tres carriles de corte y (B) dispositivo de tres carriles de corte modificado

La carga es aplicada al carril central y hace reaccionar los otros dos carriles. El promedio de esfuerzo cortante aplicado se calcula mediante la ecuación 2.43

$$\tau_6 = \frac{P}{2lh} \tag{2.43}$$

Donde P es Carga, l es la longitud de la probeta a lo largo de los carriles y h el espesor de la probeta. La deformación en corte en el plano l-t es obtenida por dos galgas localizadas al centro de la parte expuesta del espécimen a 45° con respecto al eje de los carriles, como se expresa en la ecuación 2.44.

$$\gamma_6 = 2(\epsilon_x)_{\theta=45^\circ} \tag{2.44}$$

En algunas ocasiones una roseta de tres galgas con elementos adicionales en las direcciones x y y , es usada para asegurar que el estado de corte al centro de la probeta sea puro. El estado de corte cerca de los bordes no es puro, y las concentraciones de esfuerzos en esos puntos pueden resultar en fallas prematuras.

Se han propuesto modificaciones al dispositivo de tres rieles que permiten el uso de probetas para pruebas de tensión (Figura 2.20 (b)). La deformación en corte es

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

determinada principalmente por medio de un extensómetro, que mide el movimiento relativo del riel central con respecto a los exteriores.

La teoría clásica de vigas como la descrita por Timoshenko [22] es usada para considerar los efectos flexionantes en la determinación del modulo cortante [23], mediante la ecuación 2.42

$$G_{12} = \frac{6PbE_1w^2}{10\delta E_1hw^3 - 5Pb^3} \quad (2.42)$$

Donde δ es la deflexión medida por el extensómetro, w la Altura del espécimen (o ancho de la probeta), h el espesor del espécimen y b el ancho de la sección de prueba.

En realidad, es difícil maquinar las probetas con las tolerancias requeridas y en muchos casos el contacto con los apoyos produce fallas prematuras a lo largo de la línea de tornillos, en vez de suceder al centro del espécimen. Adicional a esto, es muy común que se produzcan delaminaciones durante el taladrado de los agujeros.

Las dos configuraciones son convenientes solo para la determinación del modulo cortante. A pesar de que la prueba con tres carriles de corte provee una mejor aproximación al esfuerzo cortante puro, los problemas asociados con el método de los dos carriles no se eliminan.

2.4.3.4 Corte en torsión de un tubo de pared delgada

La prueba de torsión a tubos ha sido normalizado por ASTM desde 1959 mediante el Método de Prueba E 143 [24] extenso en su alcance, y técnicamente no exclusivo para compuestos, este método de prueba se desarrolló principalmente para metales. Sin embargo el concepto también se ha aplicado a los compuestos, donde el desafío es aplicar la carga al espécimen sin producir una falla inducida en la zona de las mordazas. Consiste en un tubo hueco de diámetro nominal de cuatro pulgadas que se sujeta a cada extremo y es sometido a torsión, mediante una máquina para tal fin, hasta que se presente la falla. Esta prueba ha mostrado producir buenos resultados y ha sido el ideal teórico para determinar la resistencia al corte y módulo cortante en el plano.

El método de torsión a un tubo circular de pared delgada, es un método de aplicación directa de carga cortante a un compuesto plástico reforzado con fibras. Y desde un punto de vista de la mecánica aplicada es el método más deseable para la caracterización en corte [25]. En esta prueba un estado aproximado de corte puro es inducido mediante la aplicación de un par alrededor del eje longitudinal del espécimen. El esfuerzo cortante es uniformemente distribuido alrededor de la circunferencia y a lo largo del eje longitudinal del espécimen. Debido a que el espesor de la pared es pequeño comparado con el radio principal del tubo, el gradiente a través del espesor es despreciable.

La probeta, como se muestra en la figura 2.21, utiliza unos refuerzos pegados en los extremos de donde se sujeta y son montados de manera concéntrica en la máquina de pruebas. Un momento monotónico es aplicado a una velocidad angular constante de 2°/min. Para evitar los esfuerzos axiales se permite el libre desplazamiento axial de la probeta.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

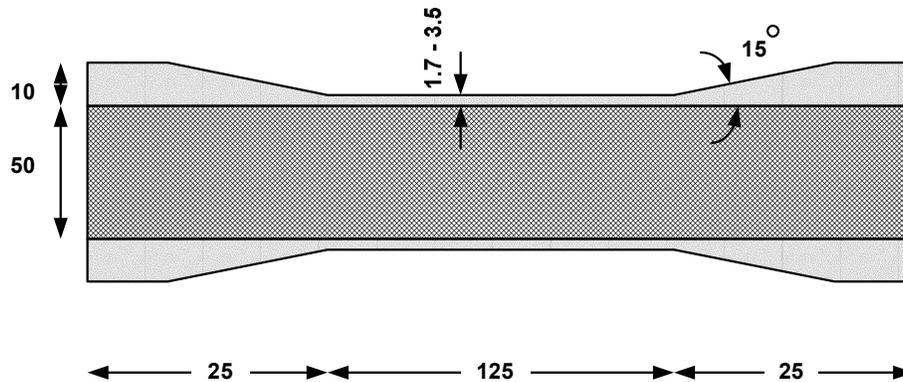


Figura2.21 Especimen cilíndrico de pared delgada con enrollado filamentario [25]

El esfuerzo puede medirse principalmente con dos galgas triaxiales colocadas diametralmente opuestas una con respecto a la otra. Las galgas deben tener una longitud efectiva de 6mm. La galga longitudinal y transversal son monitoreadas para asegurar que no hay fuerzas de flexión significantes aplicadas en la preparación de la prueba y no hay cargas flexionantes durante la prueba. El esfuerzo cortante en el plano τ_{xy} y el módulo cortante G_{xy} son calculados usando las ecuaciones 2.45 y 2.46

$$\tau_{xy} = \frac{2TR_0}{\pi(R_0^4 - R_i^4)} \quad (2.45)$$

$$G_{xy} = \frac{\Delta\tau_{xy}}{\Delta\gamma_{xy}} = \frac{\Delta\tau_{xy}}{\Delta(\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})} \quad (2.46)$$

Donde T es el par aplicado, R_0 es el Radio exterior y R_i el Radio interior.

La deformación al corte es determinada del promedio de deformaciones medidas usando galgas colocadas a $\pm 45^\circ$. La falla inicia en el radio exterior, con el esfuerzo cortante de falla, $\tau_{xy\max}$ se calcula sustituyendo el esfuerzo aplicado al momento de la falla en la ecuación (2.45).

La principal desventaja de este método es el costo y la dificultad asociada con la fabricación y prueba de la probeta tubular. Sin embargo este método es frecuentemente usado para generar datos de referencia para comparar con otros métodos de prueba, ya que el estado de esfuerzo dentro de la circunferencia de los cilindros sometidos a torsión se aproxima a un estado ideal de corte uniforme.

2.4.3.5 Dispositivo losipescu

Este método originalmente desarrollado por losipescu para caracterizar las propiedades en corte de metales, fue subsecuentemente adaptado para su uso con compuestos plásticos reforzados con fibra, como se especifica en la norma ASTM D 5379[26]. Este método de prueba, utiliza una probeta rectangular con dos muescas de 90° en forma de V, y un radio

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

de 1.3mm a la mitad de las caras de las muescas que deben estar orientadas a $\pm 45^\circ$ del eje longitudinal, con una profundidad del 20% con respecto al ancho de la probeta, como se muestra a continuación, en la figura 2.22.

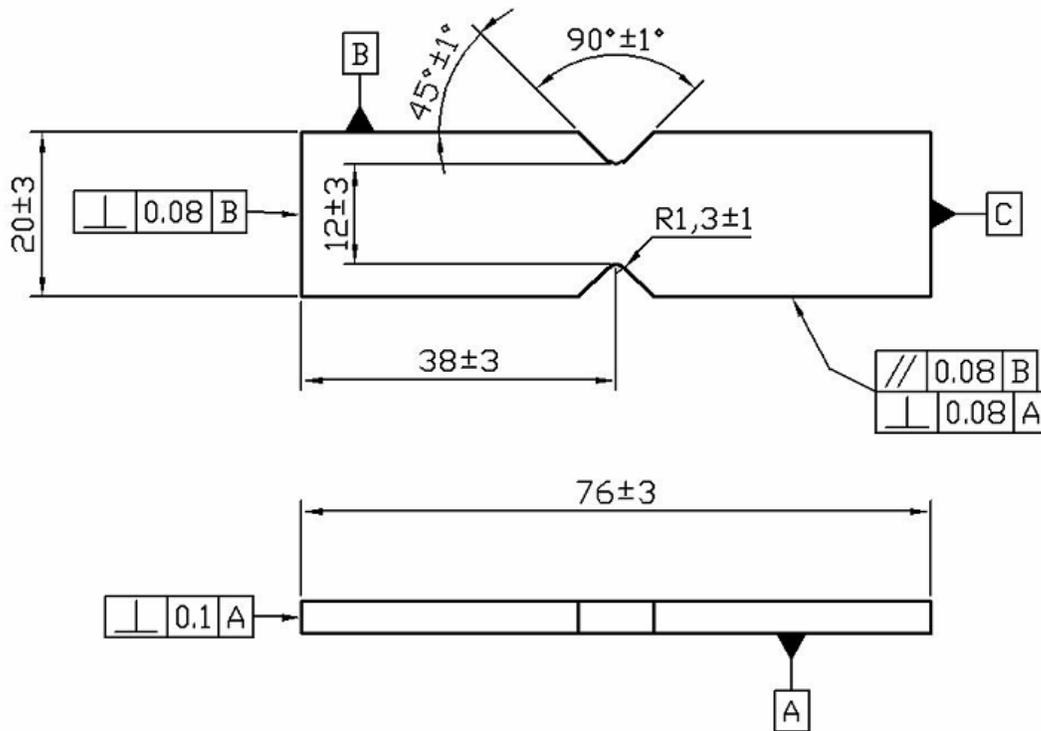


Figura 2.22 Dimensiones estandarizadas de la probeta en mm [25].

El espesor de la probeta debe estar entre 3 y 4 mm, aunque es posible hacerlo con mayores espesores; cuando el espesor de la probeta es menor de 3mm se requiere el uso de lengüetas pegadas en la zona de sujeción, comúnmente de 1.5mm de espesor para evitar la flexión o torcimiento, que puede provocar una falla prematura o incluso puede evitar aplastamientos locales cerca de las zonas de carga. Los esfuerzos en corte son medidos mediante dos galgas extensométricas en las dos caras de la probeta de manera opuesta justo al centro de la misma en el área entre las muescas. Las galgas deben tener una longitud efectiva de 1 o 2mm, para que se mantenga dentro de la región de esfuerzo uniforme y deben estar alineadas a $\pm 45^\circ$ del eje longitudinal del espécimen. Aunque se requiere de un dispositivo especial, la prueba es relativamente sencilla y directa.

En principio, este procedimiento induce un estado de esfuerzo cortante puro a la mitad de la longitud de un espécimen mediante la aplicación de dos pares de fuerzas. Un estado de fuerza cortante constante es provocado a través de la sección media de la probeta, con los momentos inducidos cancelándose exactamente a la mitad de la longitud, por consiguiente produciendo un estado de corte puro en esa zona (Véase la figura 2.23).

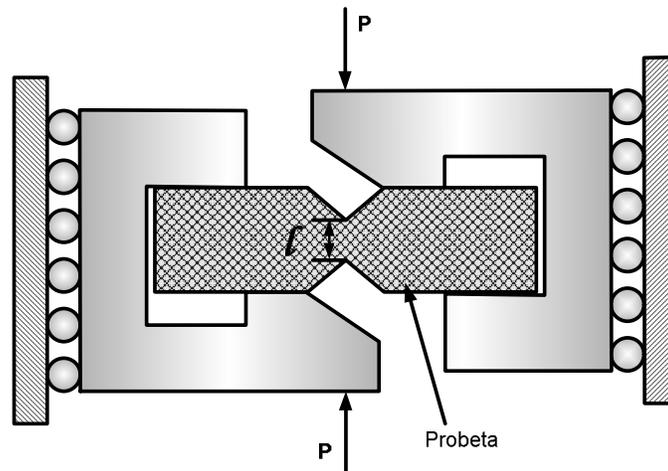


Figura 2.23 Esquemático de la aplicación de carga al dispositivo losipescu para pruebas de corte

Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que la distribución del esfuerzo cortante en la sección de prueba para especímenes tanto isotrópicos como anisotrópicos no es uniforme. Además, la distribución de esfuerzo cortante y normal ha demostrado ser altamente dependiente de la geometría de la muesca y de las condiciones de aplicación de carga. La resistencia al corte promedio y de modulo cortante puede ser calculado usando las ecuaciones 2.47 y 2.48:

$$S_{xy} = \frac{P_{\max}}{wh} \quad (2.47)$$

$$G_{xy} = \frac{\Delta\tau_{xy}}{\Delta\gamma_{xy}} = \frac{\Delta P}{wh\Delta(\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})} \quad (2.48)$$

Donde, S_{xy} es el esfuerzo cortante máximo, P_{\max} es la carga última, w es la distancia entre las muescas y h es el espesor de la probeta. Las variables ΔP , $\Delta\varepsilon_{45}$ y $\Delta\varepsilon_{-45}$ son los cambios en la carga aplicada y las deformaciones a $\pm 45^\circ$ en la región lineal inicial de la curva esfuerzo-deformación.

Como se muestra en la figura 2.24, se ha encontrado que el proceso de falla es altamente dependiente de la microestructura del material. La concentración de esfuerzo cortante en la raíz de la muesca es la principal responsable del inicio de falla. La grieta crece en el plano principal de esfuerzo y su crecimiento es arrestado por la alineación de las fibras. La ruptura axial de la probeta produce un relajamiento de los esfuerzos en la raíz de las muescas, resultando en una distribución de esfuerzos más uniforme y simétrica en el eje de las muescas.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

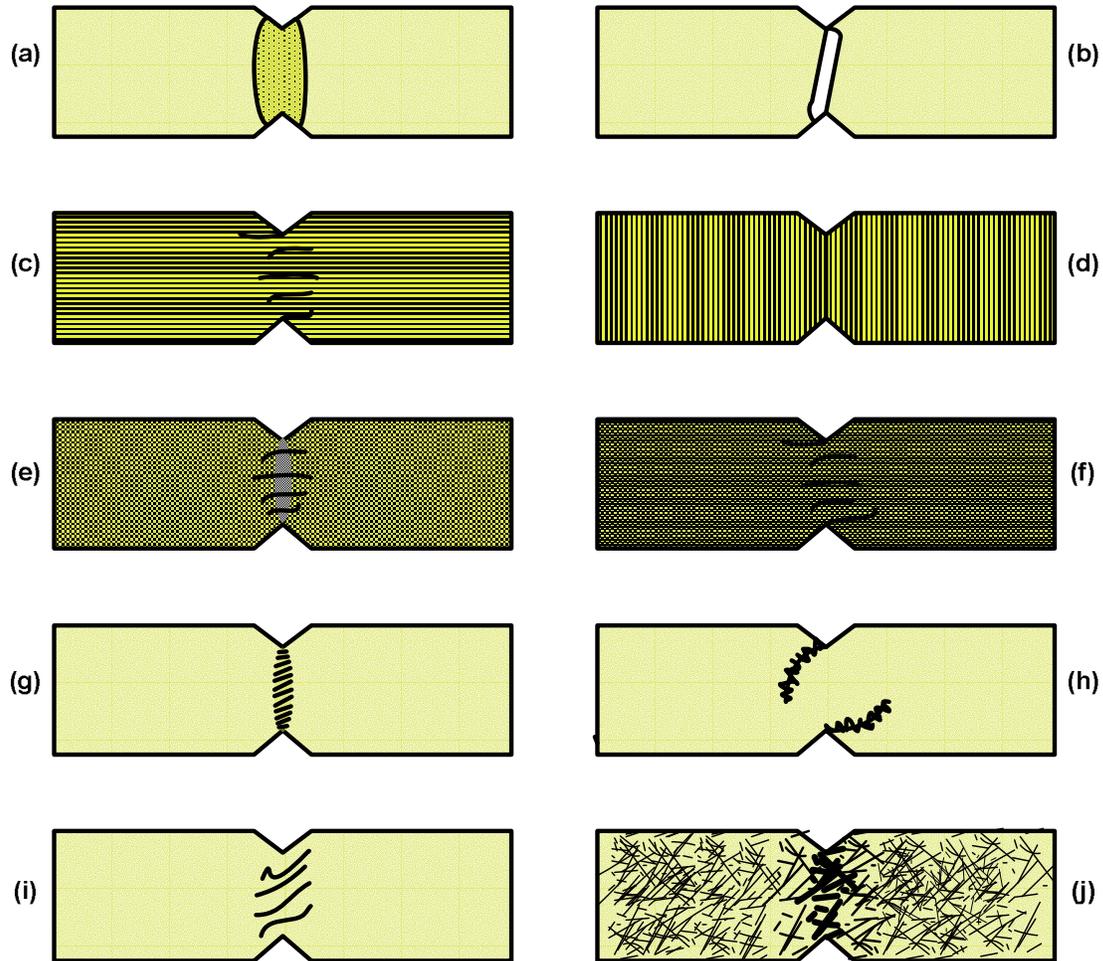


Figura 2.24 Modos típicos de falla para el método de prueba obtenidos mediante el dispositivo losipescu (*modos inaceptables). (a) Corte en termoplástico no reforzado, (b) Termofijo no reforzado frágil*, (c) 0° continuo unidireccional, (d) 90° continuo unidireccional*, (e) tejido intralaminar, (f) Tejido interlaminar, (g) Termoplástico reforzado con fibras largas, (h) Termoplástico reforzado con fibras largas*, (i) sheet moulding compound, (j) Colchoneta[25]

Un estado de esfuerzos más adecuado se puede lograr en las probetas con orientación transversal de las fibras 0°- 90°. El valor de esfuerzo cortante es mínimo en las raíces de las muescas y se incrementa a lo largo del eje de las mismas hasta un valor máximo al centro de la probeta. Sin embargo estos especímenes fallan prematuramente debido a que la fractura inicia por una combinación de esfuerzos cortantes y de tensión. El modo de falla para especímenes con orientación de fibras transversal no es representativo así que esos especímenes no son convenientes para medir esfuerzo cortante, es por eso que se recomienda usar especímenes con alineación de fibras en dirección longitudinal.

Las ventajas y desventajas de los principales métodos de prueba en corte son resumidas en la tabla 2.5 que se muestra a continuación.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 2.5 Ventajas y desventajas de las principales pruebas de caracterización en corte [25].

Prueba	Ventajas	Desventajas
Prueba a $\pm 45^\circ$	Son obtenibles el modulo cortante y la resistencia al corte	El límite de esfuerzo es frecuentemente requerido para determinar la resistencia
	La preparación de la probeta es directa y fácil	Sólo es adecuado para fibras continuas alineadas
	No requiere de un aparato especial	Se requiere un arreglo de capas especial para el laminado
	Es posible reducir los datos	La resistencia depende del numero de capas
	Se puede usar con condiciones ambientales y cíclicas	Se requiere de galgas o extensómetros
	Normas ASTM y CEN/ISO	
Prueba a 10° fuera del eje	Son obtenibles el modulo cortante y la resistencia al corte	Modo de falla mixto y de manera prematura.
	Se obtienen propiedades elásticas adicionales	Solo es adecuado para fibras continuas alineadas y laminados unidireccionales
	La preparación de la probeta es económica y fácil	Se requiere de galga roseta de tres elementos
	No requiere de un aparato especial	Se obtienen resultados sobreestimados
	Esfuerzo uniforme en el plano	Sensible a desalineaciones probeta/galgas
	Se puede usar con condiciones ambientales y cíclicas	No existen normas
Prueba con carriles de corte	Son obtenibles el modulo cortante y la resistencia al corte	Preparación extensa de la probeta
	Compatible con muchos tipos de material	Probeta susceptible a defectos de preparación
	El estado de esfuerzo es bastante uniforme cerca del centro de la probeta	Dificultad para unir el espécimen a los carriles de carga
	Es posible reducir los datos	Se requiere e un dispositivo especial
	Se puede usar con condiciones ambientales y cíclicas	Se requieren galgas extensométricas
	Solo existe una guía ASTM	Existen muchas dispersiones en los datos de resistencia
Torsión a tubos de pared delgada	Son obtenibles el modulo cortante y la resistencia al corte	Probetas cilíndricas grandes y caras
	Compatible con muchos tipos de material	Extensa preparación de la probeta y la prueba
	El estado de esfuerzo es bastante uniforme a lo largo de la probeta	Se requiere de facilidad de torsión y adhesividad de los arreglos para sujetar la probeta
	Es posible reducir los datos	Aparato de alineación para la preparación del espécimen

Tabla 2.5 Continuación		
Torsión a tubos de pared delgada	Se puede usar con condiciones ambientales y cíclicas	Se requiere de galgas
	Solo existe la norma ASTM	No existe esfuerzo uniforme a través del espesor de la probeta
Dispositivo losipescu	Son obtenibles el modulo cortante y la resistencia al corte	Se requiere de un maquinado preciso para la probeta
	Compatible con muchos tipos de material	Se requiere de un aparato especial
	Pequeña cantidad de material requerido	Se requiere de galgas extensométricas
	Es posible reducir los datos	Esfuerzo cortante no uniforme
	Adecuado para el uso bajo condiciones ambientales	Dispositivo especificado en las normas no satisfactorio
	Tiene un buen módulo de acuerdo con otros métodos de prueba que han sido reportados.	Se obtienen resultados subestimados en un 1.3%
	La probeta es sencilla y barata de fabricar.	Esta limitado a materiales con una probeta completamente balanceada y simétrica.
	No se requiere de herramienta especial para llevar a cabo el ensayo.	No logra un estado de corte puro.
	Flexibilidad de usar cualquier extensómetro o galga	El buen resultado depende del número de capas.
Se puede utilizar tanto en materiales unidireccionales como en tejidos.	No puede ser utilizado bajo cargas cíclicas	

2.5 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE MATERIALES COMPUESTOS

Para conocer las propiedades físicas de la probeta, las cuales influyen de una manera considerable en el comportamiento mecánico del material, en este caso su densidad y sus fracciones volumétricas, se utilizaran procedimientos normalizados. A continuación se describen los métodos para obtener la densidad y las fracciones volumétricas.

2.5.1 Densidad

La densidad del material compuesto, puede obtenerse mediante el procedimiento hidrostático descrito por la norma ASTM D792 [27], en el cual se toman las siguientes consideraciones:

- Las unidades utilizadas para hacer la medición deben ser representativas según los datos requeridos.
- Se consideran condiciones de prueba de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $50 \pm 5\%$.
- Se deberá utilizar un espécimen de 1 a 50 gr.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

- Se utilizará agua destilada o desmineralizada para realizar la inmersión.
- El volumen del espécimen no deberá ser menor a 1mm^2 ni tener menos de 1 gr de peso por cada mm.

El procedimiento descrito por este método de prueba se detalla a continuación:

Se pesa la probeta en el aire. Posteriormente se sumerge la probeta en agua destilada y sujeta a un alambre y éste a una balanza y se procede a registrar el peso aparente que se muestra en la balanza. Este peso queda expresado por la ecuación 2.49. Este peso es igual a:

$$W_b = W_p - E \quad (2.49)$$

En donde W_b es el peso registrado en la balanza, W_p representa el peso de la probeta en el aire, E es la fuerza de flotación ó empuje. Según el principio de Arquímedes el empuje hidrostático es igual al peso del volumen del fluido desplazado, esto se representa mediante la ecuación 2.50.

$$E = v g \rho_{\text{agua}} \quad (2.50)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación 2.49 y despejando el volumen se obtiene la ecuación 2.51.

$$v = \frac{W_p - E}{\rho_{\text{agua}} g} \quad (2.51)$$

La densidad de la probeta se obtiene dividiendo la masa de la probeta en el aire entre el volumen designado por la ecuación anterior, con lo cual queda la ecuación 2.52.

$$\rho = \frac{W_p \rho_{\text{agua}}}{W_p - E} \quad (2.52)$$

Para la determinación de las fracciones volumétricas de los constituyentes de la probeta consideran dos tipos de procedimientos: el de calcinación y el de digestión de resina, los cuales se explicaran a continuación.

2.5.2 Calcinación

Este procedimiento se utiliza para conocer los porcentajes de los constituyentes del material compuesto y se encuentra descrito en la norma ASTM D2584 [15]. Como su nombre lo indica, es un proceso que mediante la combustión de la resina contenida en la probeta. Se puede obtener el peso de la fibra y por diferencia de volúmenes y pesos, obtener las fracciones volumétricas. El procedimiento se describe a continuación

- 1.- Se debe obtener el peso de la probeta, el cual se ha designado como W_p .
- 2.- Se calienta un crisol (para este caso se utilizó uno de alta alúmina) a una temperatura promedio entre 500°C y 600°C durante aproximadamente 30 min, posteriormente se enfría hasta alcanzar una temperatura ambiente dentro de un desecador.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

- 3.- Una vez enfriado se registra el peso del crisol (W_c).
- 4.- Se coloca la probeta dentro del crisol, y éste dentro de un horno a una temperatura de 650° durante aproximadamente unos 60 min para permitir que la resina se consuma por completo, quedando dentro del crisol únicamente fibra.
- 5.- Se registra el peso de la fibra en conjunto con el crisol (W_{c+f}), que por diferencia de los pesos conocidos anteriormente se puede determinar exclusivamente el peso de la fibra (W_f).
- 6.- Una vez conocido el peso de la fibra, se obtiene el peso de la resina que fue quemada
- 7.- Conociendo las densidades y masa de cada uno de los componentes como fibra y resina, es posible determinar su volumen mediante las ecuaciones 2.53 y 2.54.

$$v_f = \frac{m_f}{\rho_f} \quad (2.53)$$

$$v_r = \frac{m_r}{\rho_r} \quad (2.54)$$

- 8.- El volumen de la porosidad contenida en la probeta es posible de obtener, restando del volumen total de la probeta, obtenido mediante inmersión, el volumen de la fibra y resina, tal como queda expresado por la ecuación 2.55.

$$v_{poros} = v_p - (v_f + v_r) \quad (2.55)$$

- 9.- Para determinar entonces las fracciones volumétricas del material es necesario utilizar las ecuaciones 2.56:

$$V_f = \frac{v_f}{v_p} \quad V_r = \frac{v_r}{v_p} \quad V_{poros} = \frac{v_{poros}}{v_p} \quad (2.56)$$

2.5.3 Disolución de resina

El método consiste en disolver una porción de resina de un espécimen de material compuesto en un medio de disolución acida en caliente. El residuo es filtrado, lavado, secado y pesado. El porcentaje de peso de fibra puede ser convertido a un porcentaje volumétrico si se conocen las densidades de la fibra y el compuesto. Una corrección para el cambio de peso en el compuesto se puede hacer si el cambio es suficientemente reproducible bajo las condiciones de prueba y tiene el mismo valor de porosidad como de fibra en el compuesto. En la norma ASTM D3171 [28] se especifican tres procedimientos de los cuales el que se utiliza en este trabajo es el primero, debido a que está destinado a resinas digeribles en ácido nítrico, como en este caso que se trata de una resina epóxica.

Existen ciertos tipo de cuidados que se deben tomar en cuenta en este procedimiento, como almacenar 50% de peróxido de hidrógeno dentro de un frasco seguro y fresco con capucha dentro del contenedor original con una tapa, con orificios de ventilación y un vaso de precipitados colocado holgadamente encima a modo de protector de polvo. Bajo estas condiciones el reactivo permanece bastante estable. No se debe permitir el contacto con

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

ningún material orgánico. Se enjuagan los derrames con cantidades abundantes de agua, es esencial que se usen guantes de caucho y protección visual mientras se esté usando el reactivo. El procedimiento se describe a continuación.

- 1.- Determinar la densidad del espécimen con la técnica de desplazamiento de líquidos como se describe en la norma ASTM D792.
- 2.- Pesar el espécimen en una balanza analítica redondeando al 0.0001gr más próximo.
- 3.- Colocar el espécimen en un frasco separado conteniendo 80ml al 70% de ácido nítrico.
- 4.- Colocar sobre el frasco un condensador de flujo y colocarlo a un baño con agua o aceite a una temperatura constante de 75 ± 1 °C.
- 5.- Después de 5 hrs, o que la digestión esté completa, registrar el tiempo total de digestión. Filtrar el contenido del frasco en un filtro de vidrio sinterizado bajo un vacío de 16.9kPa o más. Enjuagar la fibra tres veces con agua destilada y una vez con acetona.
- 6.- Colocar el filtro y el espécimen en un horno a 100°C por una hora para remover el residuo de agua y acetona.
- 7.- Enfriar el frasco que contiene el residuo de fibra.

REFERENCIAS

- [1] Muñoz Esquer, Pedro. “La evolución de los materiales compuestos en aviación”. Ingeniería de producción Airbus, España. 2004.
- [2] Jean-Marc Béguin et. Al. “L’industrie française des matériaux composites: des enjeux prioritaires pour un développement durable”. SESSI, Service de la Direction générale de l’industrie, des technologies de l’information et des postes (DiGITIP). Febrero 2002.
- [3] Rodriguez Ramos, Reinaldo, et. Al. “Modelación de materiales compuestos y sus aplicaciones”. Facultad de matemática y computación. Facultad de la Habana, Cuba.
- [4] Asociación española de materiales compuestos. Disponible en www.aemac.org
- [5] Vargas Erik, “Desarrollo de un tablero lateral en material compuesto para la estructura de un microsatélite”, Tesis para obtener el título de Ingeniero en Aeronáutica, IPN-ESIME unidad Ticomán, México, 2004.
- [6] K.K. Chawla “Composite Materials: Science and Engineering”. Springer-Verlag. New York. 1987).
- [7] Verri Kozlowski, Alejandro. Universidad de Buenos Aires. “Mecánica de Laminados Compuestos” Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Naval.
- [8] Martín S. Blank y Walter B. Castelló. “Materiales compuestos”.Barcelona, España, 2001.
- [9] Olivares Santiago, C. Galán Marín, J. Roa Fernández.” Los compuestos: características y aplicaciones en la edificación”. M Dpto. Construcciones Arquitectónicas. Escuela T. Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla.
- [10] Escudero López, Domingo, “Materiales compuestos. Aplicaciones” España. Instituto Eduardo Torroja-CSIC.2001.
- [11] J. C. Anderson, et al. “Materials science”, Imperial College of science, technology and medicine. Ed. Chapman and Hall.1990.USA.
- [12] E. Donoso, C. “materiales de ingeniería, Materiales compuestos” España. 2001
- [13] Daniel, Isaac. Ishai, Ori. “Engineering Mechanics of Composite Materials.” 1994. Oxford University Press. New York. 299– 318.
- [14] Vargas, E. et al. “Dispositivos para caracterización mecánica de laminados fabricados con materiales compuestos de matriz plástica”.
- [15] ASTM Standards and Literature References for Composite Materials, 2nd Ed. 1990. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA.
- [16]. L. Han and M. R. Piggott “Tension–compression and losipescu tests on laminates” Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Advanced Composites Physics and Chemistry Group, University of Toronto, 200 College Street, Toronto, Ont., Canada M5S 3E5
- [17] Dandayudhapani, Satish K. “characterization of in-plane shear properties of laminated composites at high strain rates”. Madras University, India, 2003.
- [18] MIL-HDBK-17-1E. 6.7.6.2 “In plane shear methods”. Department of defense handbook.Polymer matrix composites. Vol. 1 guidelines for characterization of structural materials.
- [19]. ASTM D 3518: “Standard test methods for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate”. Annual book of ASTM standards, PA, USA.
- [20] BS EN ISO 14,129. “Fibre-reinforced plastic composites - Determination of in-plane shear modulus and strength by $\pm 45^\circ$ tension test method, 1997.

- [21]. ASTM D 4255: “Standard guide for testing in-plane shear properties of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate”. Annual book of ASTM standards, PA, USA.
- [22] Timoshenko, Stephen, D. H. Young. “Elements of strength of materials” 1878-1972. 5a ed. Princeton, N.J., Van Nostrand, 1968.
- [23] Daniel, I. Tsai, C.-L. “The Behavior of Cracked Crossply Composite Laminates Under Simple Shear Loading. Composites Engineering” Vol. 1. 1991. 3 – 11.
- [24] ASTM Test Method E 143-87, “In-Plane Shear Properties of Hoop Wound Polymer Matrix Composite Cylinders,” Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [25] J. M. Hodgkinson “Mechanical Testing of advanced fibre composites” CRC press LLC. New York, Washington, DC.
- [26] ASTM D 5379/D 5379M-93:” Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.” Annual book of ASTM standards, PA, USA.
- [27] ASTM D 3171-76:” Standard Test Method for Fiber Content of Resin-matrix Composites by Matrix Digestión.” Annual book of ASTM standards, PA, USA.
- [28] ASTM Guide D 4255-83, “Testing Inplane Shear Properties of Composite Laminates,” Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [29] Joseph M.Moriarty, et al. “ The V-notched rail shear test” Department of mechanical engineering, University of Utah, Salt Lake city, UT,USA.
- [30] E. Dowling, Norman. “Mechanical behavior of materials”, College of engineering, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg Virginia. Ed. Prentice Hall 1993.
- [31] U. S. Department of Defense, Handbook Polymer Matrix Composites Vol. 1, “Guide lines for characterization of structural materials”, MIL-HDBK-17-1E, DOD, 1997.
- [32] Méndez Ramos, M., “Determinación de la Matriz de Rigidez de un Material Compuesto Laminado de Fibra de Vidrio y Resina Poliéster”. Tesis de maestría. IPN ESIME UPALM. México, 2004.
- [33] Vargas Rojas, E. “Caracterización Mecánica de Tubería Metálica Reforzada con Material Compuesto Fabricado por el Proceso de Enrollado de Filamento”. 2007. Tesis de maestría, SEPI ESIME UPALM. México.
- [34] R. Askeland, Donald. Pradeep P. Phulé. “Ciencia e ingeniería de los materiales”. Cuarta edición. Editorial Thomson. Mexico, D.F. 2005.
- [35] Miravete, Antonio. “Materiales compuestos”. Cuarta edición. Zaragoza, España. 2000. (vol. 1 y 2).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

Este capítulo muestra la manera en que se desarrolló el presente trabajo, es decir, la metodología en la que se basó el desarrollo de todas y cada una de las actividades llevadas a cabo.

Posteriormente se presenta, de la misma manera, la metodología utilizada para el diseño mecánico del dispositivo en cuestión; se explica de manera breve en que consiste el método del despliegue de las funciones de calidad (QFD), el análisis de jerarquía analítica (AHP), los cuales sirvieron como herramientas para lograr cumplir con el objetivo planteado.

3.1 METODOLOGIA GENERAL

Caracterizar mecánicamente un material significa obtener valores cuantificables mediante pruebas mecánicas, que puedan dar una idea de su comportamiento bajo la aplicación de cierto tipo de cargas.

Para cumplir con el objetivo planteado del presente trabajo es necesario determinar las propiedades en corte de un material compuesto: Módulo cortante y resistencia al corte.

Es por tanto necesario conocer, antes que nada, la definición de material compuesto, comportamiento mecánico en general de este e identificar las propiedades principales del tipo de material al cual se está enfocando el trabajo; es decir, material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras.

Primeramente se propone un estudio bibliográfico con respecto a las generalidades que presentan los materiales compuestos, haciendo énfasis en los materiales compuestos poliméricos, para después identificar los diferentes métodos de prueba para caracterizar materiales compuestos en corte, identificando las ventajas y desventajas de cada uno, evaluando el que mejor cumpla con los requerimientos planteados en la justificación (capítulo 1) con el propósito de elegir el indicado, así como desarrollar el dispositivo necesario que la prueba requiera.

Partiendo del método elegido, se implementará una metodología de diseño para el desarrollo del dispositivo, se analizará con detenimiento todos los datos respecto al método de prueba designado, con el propósito de reconocer los requerimientos y los que dicten las normas a utilizar, para después ser evaluados, jerarquizados y traducidos a términos mensurables, como parte de la metodología del “Despliegue de las Funciones de Calidad” [1] de manera a traducir los requerimientos a metas de diseño.

A continuación se llevará a cabo el diseño conceptual del dispositivo, con base en un análisis funcional, a partir del cual se determinan las funciones que deben cumplir el dispositivo en relación a su entorno y se propondrán soluciones tecnológicas (conceptos) que serán evaluadas de acuerdo a criterios (requerimientos de diseño) como son el de fabricación, ensamble, costos, materiales, disponibilidad tecnológica, etc. Para

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

posteriormente ser jerarquizados mediante la metodología AHP (Analytic Hierarchy process) [2], que permitirá analizar cada una de las opciones por medio de comparaciones, encontrar su importancia relativa de manera numérica.

Una vez que se cuente con el concepto ganador, se procederá a dimensionarlo recurriendo a la ayuda de software para diseño asistido por computadora; utilizando como criterio principal las dimensiones del espécimen normalizado (de acuerdo con el método de prueba seleccionado) y con herramientas de diseño mecánico como la acotación funcional, el uso de tolerancias de forma y posición, los estados superficiales, y los procesos de fabricación disponibles. Se elegirá el material de acuerdo a las funciones del dispositivo y a los tratamientos térmicos requeridos. En esta etapa se generarán los dibujos de ensamble y de detalle necesarios para la fabricación. Además, Se coordinará la fabricación de los elementos del dispositivo verificando que se cumplan los requerimientos planteados en los dibujos de definición.

Con el dispositivo y los especímenes fabricados se procederá evaluar el funcionamiento de un primer prototipo. Se correrán las pruebas, se adquirirán los datos experimentales, se procesarán y con esta información se determinarán el módulo cortante, la resistencia al corte y la deformación última. De esta manera se validará el correcto funcionamiento del dispositivo diseñado.

Se presenta en la figura 3.1 el diagrama que expone de manera general la metodología que se ha empleado en el desarrollo del trabajo, así como en la tabla 3.1 el cronograma empleado para el desarrollo de esta tesis.

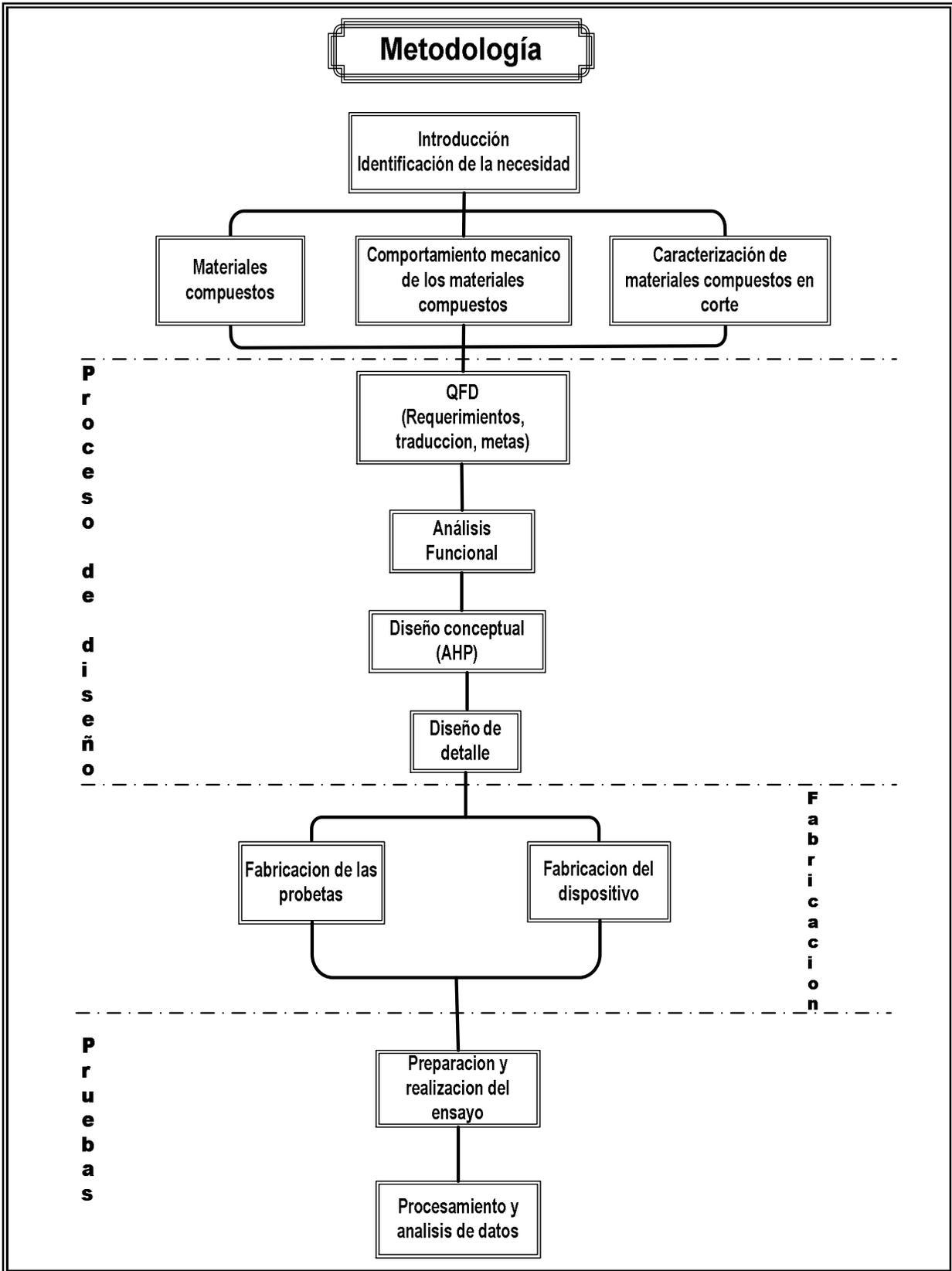


Figura 3.1 Diagrama esquemático de la metodología general.

Tabla 3.1. Cronograma de actividades

Etapa	No.	Tarea	Mes											
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
Comprensión del problema	1	Revisar literatura científica especializada, procedimientos normalizados y bases de patentes para hacer ensayos en corte	■											
Identificación de la necesidad	2	Determinar los requerimientos dictados por la prueba mecánica a realizar según la(s) norma(s) que aplique(n).		■										
Diseño conceptual	3	Proponer soluciones tecnológicas en función de las dimensiones de la probeta, seleccionar el material y los tratamientos térmicos.			■	■								
Diseño de detalle	4	Dimensionar la probeta a ensayar					■							
		Dimensionar el dispositivo en función de las dimensiones de la probeta, seleccionar el material y los tratamientos térmicos.					■	■						
Fabricación	5	Coordinar la fabricación del dispositivo y de las probetas								■				
Experimentación	6	Poner a punto la prueba de caracterización mecánica									■			
Procesamiento de datos	7	Procesar la información experimental para determinar las constantes elásticas de interés.									■	■		
Redacción	8	Redactar la tesis y preparar el examen profesional										■	■	

3.2 PROCESO DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO

El diseño se define como: “El arte de imaginar y crear cosas útiles capaces de satisfacer necesidades, manifiestas o latentes, del individuo o de la comunidad” [3].

Todo proyecto de ingeniería tiene fines ligados a la obtención de un producto o servicio; actualmente el diseño es el proceso creativo, tecnológico y multidisciplinar que se puede utilizar como herramienta con la cual llegar a conocer las necesidades de un cliente cada vez más exigente [3].

Partiendo de esto, un producto va a tener que pasar por un largo recorrido para que sea aceptado por el consumidor. Al conjunto de las fases empleadas para lograr el desarrollo del producto se le denomina “ciclo de vida del producto” [4], un esquema explicativo se presenta en la figura 3.2.

La definición y estudio de un ciclo de vida del producto, facilita el control sobre los tiempos en que es necesario aplicar recursos de todo tipo al proyecto; por eso, es particularmente importante para las tomas de decisiones.



Figura 3.2 Ciclo de vida del producto

Al inicio del proceso de diseño se tiene la mayor flexibilidad para efectuar cambios en las decisiones que se van tomando, pero las bases para sustentarlos son con frecuencia insuficientes. Conforme avanza el proyecto se va reuniendo información con la que el problema se va comprendiendo cada vez mejor, pero esa flexibilidad inicial se va reduciendo hasta el grado en que los únicos cambios que se permiten son aquellos que tienen repercusiones económicas mínimas. Al final del proceso, cuando se tiene el mayor conocimiento del problema, la libertad para efectuar cambios es prácticamente nula.

En el diseño mecánico, la metodología que se aplica deberá responder a los siguientes objetivos:

- Lograr la satisfacción de los requerimientos del cliente.
- Que el tiempo de desarrollo del producto sea mínimo
- Que el costo del proyecto de desarrollo sea mínimo

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

- Que el costo de manufactura del proyecto sea mínimo.

La metodología de diseño empleada en este trabajo es la del QFD, como se mencionó anteriormente, se seleccionó esta metodología, debido a que en trabajos anteriores, realizados en ESIME Unidad Ticomán, se han obtenido resultados bastante satisfactorios. Para estructurar la metodología de diseño se pueden contemplar tres etapas [5], comprensión del problema, diseño conceptual y diseño de detalle, las cuales se describen en detalle a continuación.

3.2.1 Primera etapa: Comprensión del problema

La primera etapa, es decir, el proceso de comprensión del problema requiere la aceptación de que éste existe y que se requiere una solución. Para esta etapa se aplicará la metodología del despliegue de funciones de calidad (QFD). Se trata de un sistema organizado para diseñar o rediseñar productos, con dos objetivos fundamentales:

-Asegurar que el producto va a responder a las necesidades y expectativas de los clientes, identificando esas necesidades y a traduciéndolas en una lista de aspectos técnicos medibles en los que conviene concentrar el trabajo de diseño.

-Acortar el periodo de tiempo que va desde la concepción del producto (o de las modificaciones a realizar) hasta su lanzamiento, dedicando más tiempo a la definición de cuáles deben ser sus características técnicas, y hacerlo de una forma organizada.

El objetivo del despliegue de la función de la calidad consiste en definir las características que deberá tener el producto, expresada como una serie de metas de diseño, para que a partir de ahí el resto de diseño se enfoque en el logro de esas metas.

3.2.2 Segunda etapa: Diseño conceptual.

La etapa de conceptualización abarca aspectos como la exploración de las diferentes posibilidades existentes para llegar a un resultado o la redefinición del problema de partida. La creatividad es la característica fundamental, se aprovechará la información generada en la primera etapa del diseño para definir en primer lugar el modelo funcional del producto para después pasar a conceptualizar las posibles soluciones al problema. Se trata aquí de la identificación de todas las funciones que es necesario que desarrolle el producto, con las cuales se puede lograr satisfacer las expectativas del cliente para después generar una serie de alternativas de solución; después se evalúan estas alternativas de manera sistemática para llegar a una propuesta de solución. El objetivo de la etapa de diseño conceptual es lograr la mejor propuesta de solución posible para que en la siguiente etapa los esfuerzos de diseño se concentren en ella.

Existen muchos métodos de creatividad, entre los más sencillos se pueden destacar el método intuitivo y el “brainstorming” o tormenta de ideas.

3.2.3 Tercera etapa: Diseño de detalle

El diseño de detalle consiste en definir sin lugar a dudas el producto de tal manera que sea posible su manufactura, es decir en esta etapa se deben definir los materiales, las formas, las dimensiones, tolerancias, rugosidades, tratamientos térmicos, recubrimientos

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

superficiales y todo aquello que sea necesario definir para que el producto se pueda fabricar de modo que sus características puedan cumplir con las funciones previstas.

El proceso que sigue, va de lo general a lo particular, es decir se desarrolla la forma del conjunto, definiendo la interrelación entre los componentes, para posteriormente elaborar los dibujos de fabricación de las piezas de manera independiente, con excepción de las piezas comerciales que se pueden adquirir.

3.3 DESPLIEGUE DE LAS FUNCIONES DE CALIDAD

Un producto de calidad es aquel que satisface los requerimientos y expectativas de los clientes. Uno de los primeros pasos dentro del proceso de diseño del producto consiste en identificar claramente cuáles son estos requerimientos y expectativas. Con frecuencia el mayor problema consiste en interpretar esa información e integrarla en el proceso de diseño.

El QFD es una metodología para planificar el proceso de diseño eslabonando al cliente con la empresa, iniciando por obtener los datos de entrada del proceso de diseño que serán los requerimientos y expectativas de los clientes, estos deben traducirse en metas de diseño mensurables.

El QFD permite identificar las herramientas de diseño apropiadas al problema en proceso de solución además de proporcionar un marco excelente para la comunicación ordenada, buscando el consenso, la objetividad y la cuantificación de objetivos y prioridades. Utilizando esta metodología se minimizan errores como:

- El departamento de diseño se deje llevar por lo que cree que interesa al cliente.
- El personal de producción descubra errores, que tal como se ha realizado el diseño sea muy difícil (o imposible) cumplir con las especificaciones, cuando ya queda muy poco tiempo para la fecha prevista de lanzamiento.
- El personal de ventas se da cuenta de que hay aspectos del producto que no se han resuelto como los clientes desearían.

Para lograr su objetivo, el QFD sigue los siguientes puntos:

3.3.1 Identificación del cliente

La primera tarea es la identificación del cliente. Primero se debe definir quién o a quiénes deben ser considerados como clientes. Un cliente es todo aquel que sea impactado por el producto o por el proceso. Los clientes pueden ser internos o externos. Los clientes externos son impactados por el producto pero no son miembros de la compañía que lo produce; son quienes compran el producto. Los clientes internos son impactados por el producto y también son miembros de la compañía que lo produce.

3.3.2 Determinación de los requerimientos y expectativas del cliente

Los medios utilizados para recopilar la información que refleje los requerimientos de los clientes, pueden ser de diferente tipo: entrevistas directas, entrevistas telefónicas, encuestas, cuestionarios vía correo, registro de comentarios informales, registro de no conformidades de los productos actuales. Lo importante es que esta información

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

corresponda efectivamente, y con el lenguaje utilizado por los clientes, a sus requerimientos y expectativas.

Los requerimientos generados son de distinta naturaleza, pero de manera general, pueden ser clasificados como se presenta en la figura 3.3 [5]:

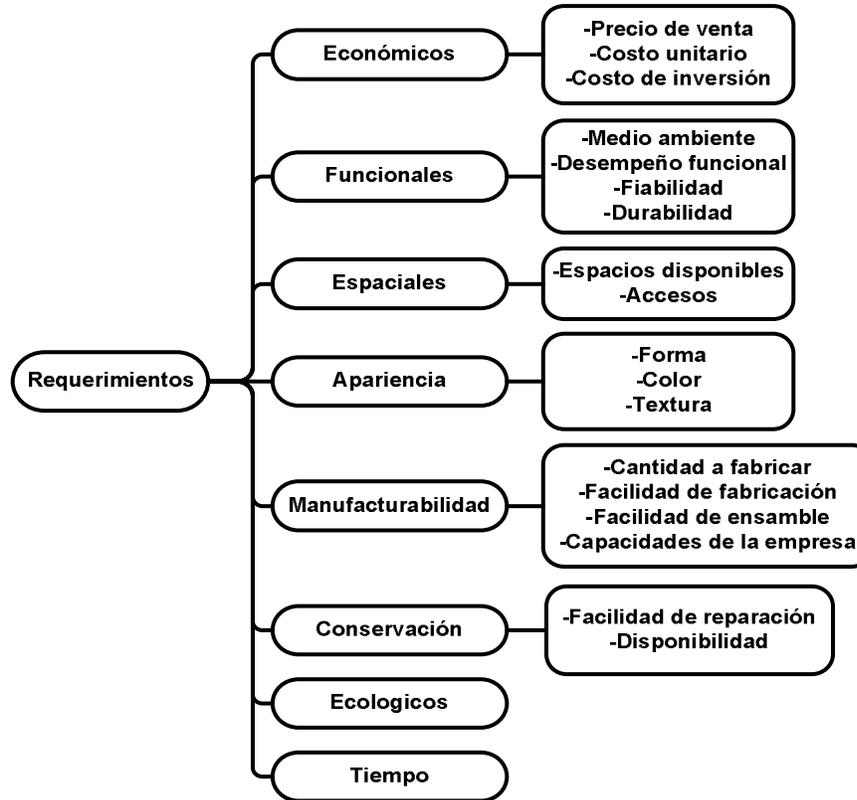


Figura 3.3 Clasificación de los requerimientos del cliente

3.3.3 Determinar la importancia relativa de los requerimientos del cliente

No todos los requerimientos y expectativas del cliente tienen el mismo grado de importancia. Hay algunos cuyo cumplimiento es indispensable, sin ellos el producto no podría considerarse satisfactorio en ningún grado. Esos requerimientos son considerados obligatorios.

Otros en cambio admiten cierta flexibilidad, de manera que su cumplimiento puede ser parcial. Si no se cumplen en su totalidad, el producto puede considerarse aún satisfactorio. Estos son los requerimientos deseables, los cuales deben ser ponderados para determinar su importancia relativa. Los requerimientos deseables se ponderan en este trabajo uno a uno contra sí mismos utilizando la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) [6].

Por ejemplo, para decidir el lugar a donde ir de vacaciones se colocan las opciones dentro de una matriz y se comparan entre sí, utilizando algún criterio, en este caso serán los costos, asignando un valor numérico de acuerdo a su importancia (utilizando la escala de referencia que se muestra en la tabla 3.2), el valor es entero cuando la comparación favorece a la opción colocada en la parte izquierda de la matriz, de lo

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

contrario, el valor será fraccionario debido a que se prefiere la opción colocada en la superior de la matriz, la matriz de este ejemplo se presenta en la tabla 3.3.

Tabla 3.2 Escala fundamental de comparación [7]

Escala fundamental de comparación	
Intensidad de importancia	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Importancia fuerte
7	Mucha importancia
9	Extremada importancia

Tabla 3.3 Ejemplo de matriz comparativa (Criterio: Costos)

	Ixtapa	Mazatlán	Cancún	Acapulco	Guanajuato
Ixtapa	1	3	9	1/3	1/5
Mazatlán	1/3	1	9	1/3	1/3
Cancún	1/9	1/9	1	1/9	1/9
Acapulco	3	3	9	1	1/3
Guanajuato	5	3	9	3	1
total	9.444	10.111	37	4.778	1.978

Posteriormente la matriz es normalizada dividiendo cada uno de los valores asignados entre el resultado total de cada columna y se coloca en cada celda, ese valor será calculado a manera de porcentaje considerando la unidad como el 100%, y a partir de ese valor porcentual, determinar la opción ganadora, como se presenta en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Ejemplo de matriz comparativa normalizada

	Ixtapa	Mazatlán	Cancún	Acapulco	Guanajuato	Porcentaje
Ixtapa	0.106	0.297	0.243	0.070	0.101	0.163
Mazatlán	0.035	0.099	0.243	0.070	0.169	0.123
Cancún	0.012	0.011	0.027	0.023	0.056	0.026
Acapulco	0.318	0.297	0.243	0.209	0.169	0.247
Guanajuato	0.529	0.297	0.243	0.628	0.506	0.441
total	1	1	1	1	1	1

3.3.4.- Traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería

Ahora se busca convertir, un lenguaje altamente subjetivo, en otro concreto y medible. En algunos casos los requerimientos del cliente están planteados en términos técnicos perfectamente mensurables, para los cuales no es necesario hacer traducción alguna. En otros casos, es necesario buscar en el significado del requerimiento, a fin de que se pueda expresar en uno o más términos mensurables de ingeniería, es decir, cada requerimiento tiene que poder evaluarse en alguna unidad de medida, sino se puede esto, entonces dividir el requerimiento en otros requerimientos hasta lograrlo.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Por ejemplo, el requerimiento pide que las piezas involucradas en el dispositivo sean de fáciles de adquirir, es necesario entonces definir qué criterios involucra la “facilidad” de adquisición para poder asignar un valor numérico que nos arroje una referencia de qué objetivos se tienen que cumplir, tal como aparece en el ejemplo de la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Niveles de traducción para el requerimiento “Que las partes involucradas sean de fácil adquisición”

Requerimiento	Primer nivel de traducción	Segundo nivel de traducción
Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	- Disponibilidad en el mercado nacional.	- No. De proveedores
	- Tiempo de entrega de las piezas.	- No aplica.
	- Costo de las piezas.	- No aplica.

3.3.5.- Establecimiento de metas de diseño

Cuando algunos requerimientos del cliente son suficientemente precisos, se convierten directamente en metas de diseño. Se trata de características mensurables que llevan asociadas magnitudes y unidades de medición.

En otros casos, los requerimientos del cliente deben someterse a un proceso de traducción para obtener los términos mensurables que dan lugar a la fijación de metas. Sin embargo, para asignar el valor a cada meta las referencias se obtienen de las características de los productos similares ya desarrollados. Esto puede implicar el adquirir ejemplares similares para efectuar pruebas bajo condiciones parecidas a las que se someterá el producto en desarrollo.

Tabla 3.6 Establecimiento de metas para el requerimiento “Que las partes involucradas sean de fácil adquisición”

Requerimiento	Meta de diseño	Tendencia
Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	3 Proveedores	No aplica.
	4 semanas	↓
	Costo de un dispositivo similar (IITRI) \$10,500 M. N.	↓

3.4 DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN GLOBAL

Esta etapa es esencial en el estudio de los sistemas, ya que se ocupa de delimitar, con precisión, el marco de análisis, para determinar, mediante el modelado del sistema, la función global o función mecánica; en donde se elabora una representación destinada a reemplazar el sistema real durante su estudio, en el cual existe un flujo de materia, energía o información que será transformada mediante la función global para obtener el producto deseado. El modelo de la función mecánica es una aproximación del tipo caja negra, la cual puede contener en su interior, las funciones secundarias que deberá realizar el dispositivo para permitir el cumplimiento de la función global, estas funciones serán expresadas como pequeñas cajas dentro de la principal unidas por líneas que marcaran la dirección del flujo de energía, materia o información (veáse la figura 3.4).

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

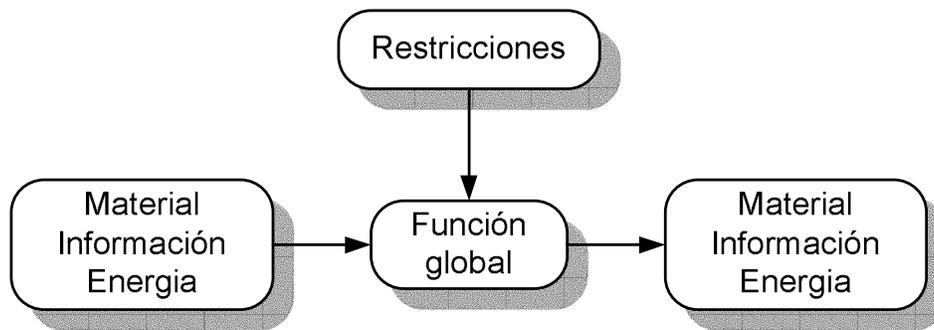


Figura 3.4 Modelo de la función mecánica [4]

3.5 DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DEL SISTEMA

La función global debe poder llevarse a cabo mediante el dispositivo, el cual es considerado un sistema. Como ningún sistema se diseña independientemente de su entorno, deben establecerse los límites entre el dispositivo y el entorno que le rodea o le restringe, en particular los efectos que tienen incidencia sobre la función global.

Es necesario establecer las relaciones entre el dispositivo y su entorno, mediante un diagrama conocido como “Diagrama de pulpo” para formar las funciones, que en base a su cumplimiento, determinarán el adecuado funcionamiento del dispositivo. Un ejemplo de estas relaciones con el entorno se presenta esquemáticamente en la figura 3.5.

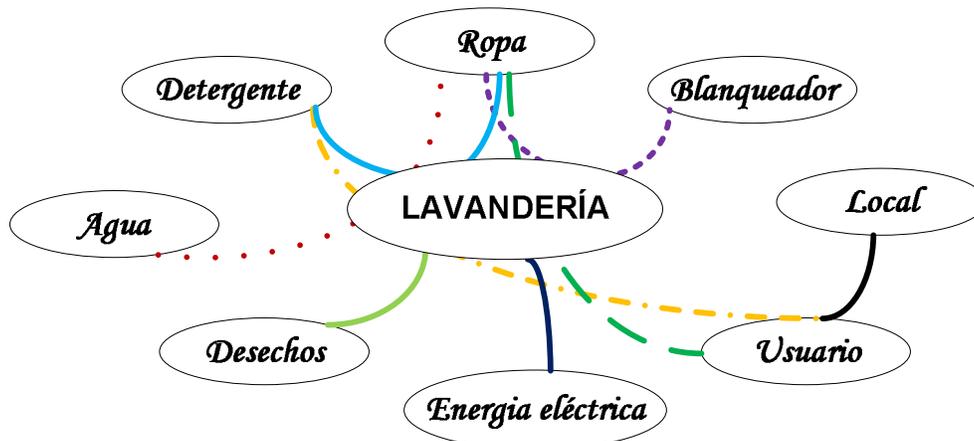


Figura 3.5 Ejemplo de diagrama de pulpo para una lavandería [5]

3.6 ANÁLISIS FUNCIONAL

Posterior al establecimiento de las relaciones entre el dispositivo y su entorno, es necesario establecer las funciones precursoras de la función global. Las funciones pueden ser primarias (que su cumplimiento es básico para el buen funcionamiento del dispositivo) o secundarias (que dependen directamente de las funciones primarias). A este conjunto de funciones y la dependencia de las mismas se le conoce como árbol de funciones y un ejemplo de cómo hacerlo para un mecanismo extractor de jugo de naranjas se muestra en el diagrama de la figura 3.6.

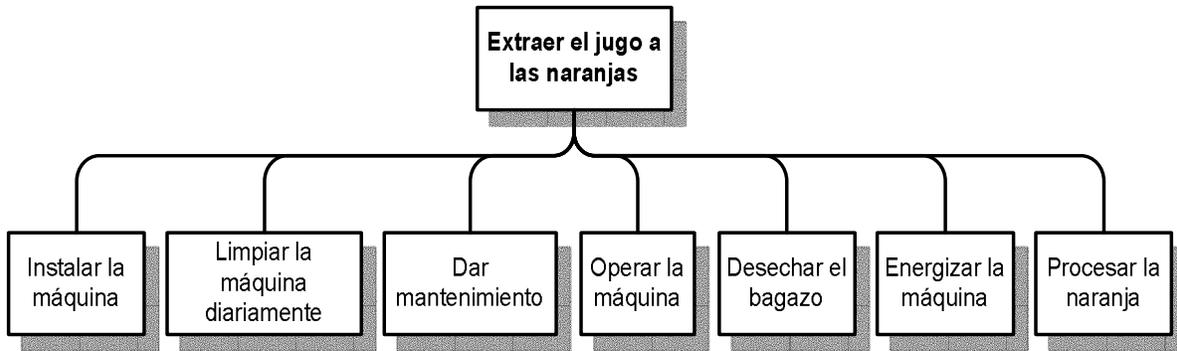


Figura 3.6 Ejemplo de árbol de funciones para un extractor de jugo de naranja [6]

3.7 GENERACIÓN CONCEPTUAL

Una vez establecidas las funciones se ha centrado la atención en definir exclusivamente las funciones necesarias para lograr cumplir con los requerimientos del cliente. La estrategia consiste en generar la mayor cantidad posible de conceptos, en este caso mediante el método escogido fue el de “brainstorming” o tormenta de ideas. Para no inducir los resultados los conceptos generados en esta etapa no se evalúan y donde la crítica no tiene lugar conforme se van generando. Este método también permite crear conceptos a partir de algunos ya existentes o bien, combinar conceptos para buscar obtener siempre la mejor solución. Los conceptos generados pueden ser ordenados de manera descriptiva en una matriz morfológica o bien por medio de dibujos y gráficos.

Por ejemplo, en una máquina, con base en el análisis con su entorno, se determinó una de sus funciones, para la cual se establecieron distintos conceptos que dan solución al problema, como se muestra a continuación, en la matriz morfológica (Tabla 3.7).

Tabla 3.7 Ejemplo de matriz morfológica para la función “limpiar la máquina”[6]

Función	Concepto					
	1	2	3	4	5	6
Limpiar la máquina	Con agua a presión	Con franela húmeda	Con fibra y materiales de limpieza	Con una brocha	Con aire comprimido	Con vapor de agua

3.8 EVALUACIÓN CONCEPTUAL

Una vez que se han generado la mayor cantidad de conceptos posibles, los conceptos que resulten de una función, se evalúan uno a uno tomando como referencia el cumplimiento que estos tienen con los requerimientos. Los conceptos generados en este trabajo se evalúan de acuerdo a su factibilidad y según su cumplimiento con los requerimientos necesarios.

Según su factibilidad los conceptos pueden ser evaluados como se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Ejemplo de evaluación conceptual según su factibilidad

Concepto	No Factible	Tal vez Factible	Factible	Observaciones
1	✓			Requiere demasiados materiales para su fabricación
2		✓		A consideración los mecanismos para lograr el movimiento de los rodillos
3			✓	Construcción sencilla

Para evaluarlos según su cumplimiento con los requerimientos, es necesario tomar un concepto de referencia y entonces los demás conceptos serán comparados uno a uno y se decidirá si cumple mejor con el requerimiento que el concepto de referencia entonces se pondrá un signo (+), en caso de ser lo contrario se designará un signo (-). Esto se puede hacer como se muestra en la tabla 3.8 de la siguiente manera [4].

Tabla 3.8 Ejemplo de evaluación conceptual

Función 1							
Requerimientos	Conceptos						
	%	1	2	3	4	5	6
1	0.09	0	-1	-1	-1	1	R E F .
2	0.08	0	-1	-1	0	0	
3	0.07	0	-1	-1	-1	0	
4	0.03	0	0	0	0	0	
5	1	0	-1	-1	-1	0	
	total	0	-3.24	-3.24	-3.16	0.09	

3.9 DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

A partir de los conceptos evaluados se eligen los que resultaron con el mayor puntaje, así se establece un concepto global (el modelo conceptual), mediante la integración de los conceptos de las diversas funciones, de tal manera a que se reúnan los atributos que más convienen.

3.10 DETERMINACIÓN DE LAS TOLERANCIAS GENERALES

La inevitable variación en la obtención de las dimensiones de piezas procesadas por medios mecánicos, hace indispensable el establecimiento de sistemas racionales que permitan fijar los valores tolerables entre los que debe estar comprendida la dimensión dada. Dada la situación, se consideró conveniente especificar tolerancias a las dimensiones, de acuerdo a las funciones que deberían cumplir.

De acuerdo con las funciones del conjunto, se pueden distinguir fácilmente ciertas superficies más importantes que otras, a estas más importantes que permiten el correcto funcionamiento del mecanismo se les llama superficies funcionales y las menos importantes son conocidas como no funcionales [7].

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Las tolerancias de las superficies no funcionales se determinan mediante tablas de tolerancias generales, mientras que para las superficies funcionales es necesario hacer un estudio para determinar cotas funcionales y ajustes.

3.11 DETERMINACIÓN DE AJUSTES.

El ensamble de dos piezas con la misma dimensión nominal, constituye un ajuste. Dependiendo de la posición de la tolerancia en cada una, el ajuste puede ser [7]:

- Con juego: Se asegura siempre un juego ya que la zona de tolerancia del agujero está enteramente por encima de la zona de tolerancia del árbol.
- Incierto: Es un ajuste que puede dará veces juego, a veces apriete ya que las zonas de tolerancia del agujero y el árbol se traslapan.
- Con apriete: Se asegura siempre un apriete ya que la zona de tolerancia del agujero está enteramente por debajo de la zona de tolerancia del árbol. Antes del ensamble, el árbol es más grande que el agujero.

La elección del ajuste se determina en base a tablas estandarizadas que muestran los ajustes requeridos para la función que el ensamble necesite realizar.

3.12 DETERMINACIÓN DE COTAS FUNCIONALES

Es necesario determinar los juegos funcionales que implica el funcionamiento del dispositivo para poder identificar, en primera instancia, las cotas de las cuales dependen y posteriormente distribuir las tolerancias de manera racional, a las cotas componentes. Para esto se identifican las cadenas de cotas para cada condición funcional, tal como se muestra en la figura 3.7

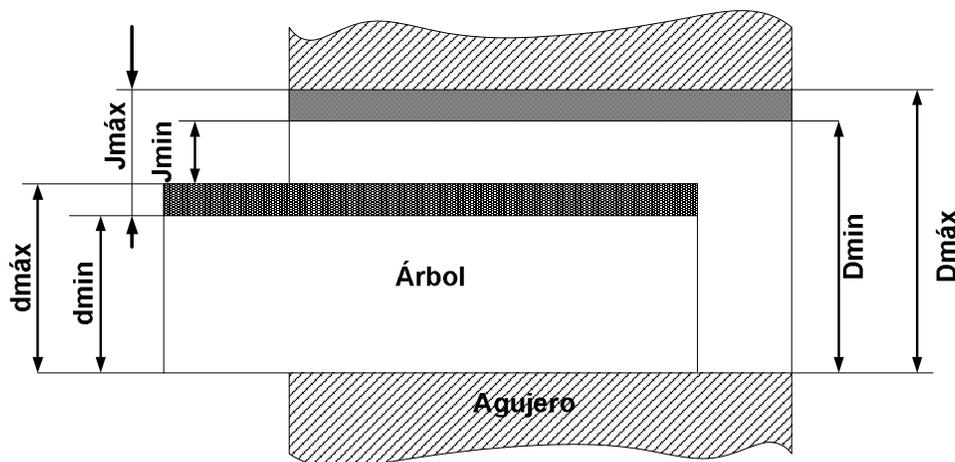


Figura 3.7 Representación de la determinación de cotas funcionales [7]

Al designar un ajuste, se indica primero la dimensión nominal (común a las dos piezas), después la tolerancia para el agujero y finalmente la tolerancia para el árbol.

3.13 DETERMINACIÓN DE TOLERANCIAS DE FORMA Y POSICIÓN

En el dibujo de fabricación de cada una de las piezas, es necesario indicar las formas, dimensiones, tolerancias, acabados, tratamientos térmicos, y materiales que la forman.

Además de las tolerancias dimensionales, otro tipo de tolerancias indicadas en el dibujo son:

- Tolerancias de forma: Representa una indicación sobre la forma de las superficies y puede ser de: Rectitud (—), planicidad (▭), circularidad (○), cilindricidad () , forma de una línea cualquiera () ó forma de una superficie cualquiera () .
- Tolerancias de posición: Representa una indicación sobre la posición de una superficie o cara de la pieza con respecto a otra de referencia y puede ser de: Paralelismo (//), perpendicularidad () , inclinación () , concentricidad () , coaxialidad () , simetría () ó localización () .
- Rugosidad () : Representan el grado de irregularidad de la superficie que son función del material y del proceso de maquinado.

Las tolerancias que se designen dependen de la funcionalidad de la pieza, y serán elegidas en base a tablas normalizadas mostradas en el siguiente capítulo.

3.14 DIBUJOS DE FABRICACIÓN

En el dibujo de fabricación, se deben definir las piezas de tal manera, que se indiquen todos los detalles que hagan posible su manufactura.

Para realizar los dibujos de fabricación, se utilizó el software de diseño asistido por computadora NX 5.0

REFERENCIAS

- [1] Ramos Watanave, J. “Curso de Diseño Mecánico”. Vol. 3. 2000. Apuntes, SEPI ESIME UPALM. México.
- [2] Saaty, Thomas L. “Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process”. RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)
- [3] Altemir Grasa, José Maria “El Diseño Mecánico”.Internacional Council of Societies of Industrial Design (I.C.S.I.D.); desde 1959.
- [4] Hernández Moreno Hilario “Teoría de diseño” Apuntes. ESIME Ticoman. 2008.
- [5] Bourthoumieu, Camus, Madier. “*Estudio de un distribuidor automático*” Limusa, Noriega editores. Colección la microempresa. Serie Un proyecto Técnico. México, D. F.
- [6] Vargas Rojas Erik et al. “Diseño mecánico”. Apuntes de Maestría de diseño mecánico. Esime Zacatenco.
- [7] Ramos Watanave, Villanueva Pruneda. “*Manual de métodos de fabricación metalmecánica*” A.G.T. Editor, S.A. 4ª. Edición. México D. F.
- [8] Vargas Rojas Erik et al. “Establecimiento de las metas de diseño para un dispositivo de caracterización mecánica con presión hidráulica de probetas cilíndricas”
- [9] Kanwal Rai (Enero 2004). “Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process”. London: Springer-Verlag. ISBN 1-8523375-6-7.
- [10] Ramos, J., Diseño de un Soporte Hidráulico para Sostener Techos de Minas de Carbón con Capacidad de 25 Toneladas. Tesis de maestría, SEPI ESIME UPALM. México, 1996.
- [11] Instituto de innovación y calidad gubernamental “Despliegue de la función de calidad. QFD” Gobierno del estado de Oaxaca.
- [12] Cross, N. Métodos de Diseño: Estrategias para el diseño de productos. México. Limusa Wiley, 2005. pp. 100 – 114.
- [13] Dym, C., Little, P. El proceso de diseño en ingeniería. México. Limusa, 2002.
- [14] Drake, P.R. (1998). "Using the Analytic Hierarchy Process in Engineering Education". International Journal of Engineering Education 14 (3): 191–196.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO

En este capítulo, se explica el desarrollo del proceso de diseño del dispositivo de corte, utilizando la metodología que se trató en el capítulo anterior.

Se analiza el problema y se reúnen los requerimientos del cliente con el objetivo de obtener características cuantificables y establecer metas de diseño.

Se hace un análisis funcional del dispositivo, para que con esa información se propongan soluciones mediante una generación conceptual y hacer una evaluación posterior utilizando a metodología AHP. Una vez definidas las soluciones, se genera un modelo conceptual, el cual se desarrollará y será descrito como el diseño de detalle pasando por cada una de las etapas que hacen posible la fabricación del dispositivo.

4.1 PRIMERA ETAPA: COMPRENSIÓN DEL PROBLEMA

Como se explica en el primer capítulo, la problemática consiste en obtener las propiedades en corte de una lamina delgada fabricada en material compuesto, para lo cual es necesario desarrollar la tecnología necesaria, es decir, el diseño y fabricación del dispositivo necesario para la prueba, además de que previamente se realizó un estudio sobre el estado del arte en lo que se refiere a ensayos mecánicos para la obtención de propiedades en corte, el cual arrojó que uno de los métodos actuales que se aproxima bastante bien a los valores reales es el de corte mediante dispositivo losipescu por lo que en esta sección se tomará como base este método para el diseño del dispositivo.

A continuación, se explicara la metodología a seguir para el desarrollo del proceso de diseño del dispositivo para realizar pruebas de corte en materiales compuestos, pasando por las primeras cinco etapas del ciclo de vida del producto que se estableció anteriormente, posteriormente se desarrollarán cada una de las mismas.

4.2 DESPLIEGUE DE LAS FUNCIONES DE CALIDAD

4.2.1 Identificación del cliente

En nuestro caso, el cliente interno que estará directamente relacionado con el producto, será el laboratorio de ensaye de materiales de la ESIME Unidad Ticomàn.

4.2.2 Determinación de los requerimientos y expectativas del cliente

Los requerimientos identificados del dispositivo así como las pruebas a desarrollar con el mismo son los siguientes:

- Que sea fácilmente transportable
- Que las partes involucradas sean de fácil adquisición
- Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones y de forma estandarizada
- Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas
- Que se considere la extensometría eléctrica para medir deformaciones en las probetas
- El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil
- Que se opere fácilmente
- Inducir al material deformaciones pequeñas
- Evaluar las propiedades según la orientación del sistema de coordenadas del material relativa al eje de aplicación de carga
- Incluir arreglo que permita centrar la probeta en el aparato
- El material se asumirá homogéneo.
- No debe existir torcimiento durante la prueba
- Las galgas no deben ser tan grandes para extenderse significativamente fuera del área de esfuerzo uniforme
- Que se tenga una adecuada manufactura de las probetas
- Que se considere el uso de galgas con 1 ó 2 voltios y resistencia de 350 ohms o más, además de las galgas convencionales de 120 ohms.
- Utilizar por lo menos 5 probetas por tipo de prueba
- Que se mida la densidad, la fracción volumétrica de fibra resina y porosidad
- Que no haya ondulaciones o distorsiones a lo largo de las fibras

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

- Que sea fácil de instalar en la máquina de ensayos universales.
- La sección de prueba se define como la zona de la probeta donde el esfuerzo cortante es constante y el momento flector nulo.
- Que se obtengan las propiedades en corte reales del material
- Evitar el excesivo corte de las fibras debido a grandes elongaciones
- Que el tamaño de la galga vaya de acuerdo al criterio de homogeneidad del material
- Que la prueba mecánica se haga de acuerdo a procedimientos normalizados
- Que se puedan hacer ensayos con secuencias de apilamiento variadas.
- Que se consideren los procesos de fabricación de la aeronave Stela M1
- Considerar el uso de galgas extensométricas de respaldo para medir el grado de torcimiento durante la prueba
- Caracterizar mecánicamente la resina a utilizar
- Que no se dañe la probeta durante el pegado de las galgas
- Que el sistema de unidades a utilizar en el dimensionamiento y maquinado de la pieza sea el Internacional.
- Que sea fácil de manufacturar

4.2.3 Determinación de la importancia relativa de los requerimientos del cliente

Los requerimientos obligatorios, cuyo cumplimiento es indispensable, sin ellos el producto no podría considerarse satisfactorio en ningún grado son:

- Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones estandarizadas
- Que se considere la extensometría eléctrica para medir deformaciones en las probetas
- Inducir al material deformaciones pequeñas
- Evaluar las propiedades según la orientación del sistema de coordenadas del material relativa al eje de aplicación de carga
- Incluir arreglo que permita centrar la probeta en el aparato
- El material se asumirá homogéneo.
- No debe existir torcimiento durante la prueba
- Las galgas no deben ser tan grandes para extenderse significativamente fuera del área de esfuerzo uniforme
- Que se mida la densidad, la fracción volumétrica de fibra resina y porosidad
- Que no haya ondulaciones o distorsiones a lo largo de las fibras
- La sección de prueba se define como la zona de la probeta donde el esfuerzo cortante es constante y el momento flector nulo.
- Que se obtengan las propiedades en corte reales del material
- Evitar el excesivo corte de las fibras debido a grandes elongaciones
- Que el tamaño de la galga vaya de acuerdo al criterio de homogeneidad del material
- Que la prueba mecánica se haga de acuerdo a procedimientos normalizados
- Considerar el uso de galgas extensométricas de respaldo para medir el grado de torcimiento durante la prueba
- Caracterizar mecánicamente la resina a utilizar
- Que no se dañe la probeta durante el pegado de las galgas

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Otros requerimientos en cambio admiten cierta flexibilidad, de manera que su cumplimiento puede ser parcial. Si no se cumplen en su totalidad, el producto puede considerarse aún satisfactorio. Estos son los requerimientos deseables, los cuales deben ser ponderados para determinar su importancia relativa. Los requerimientos deseables se ponderan uno a uno contra sí mismos por medio de la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) [1], formando la matriz que se presenta en la tabla 4.1, la cual se normaliza posteriormente para obtenerse la matriz de la tabla 4.2.

Tabla 4.1 Ponderación de requerimientos

	Que sea fácilmente transportable	Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas	El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	Que se opere fácilmente	Que se tenga una adecuada manufactura de las probetas	Que se considere el uso de galgas con 1 ó 2 voltios y resistencia de 350 ohms o más	Utilizar por lo menos 5 probetas por tipo de prueba	Que sea fácil de instalar en la máquina de ensayos universales marca Instron.	Que se puedan hacer ensayos con secuencias de apilamiento variadas.	Que se consideren los procesos de fabricación en la aeronave Stela M1	Que el sistema de unidades a utilizar en el dimensionamiento y maquinado de la pieza sea el Internacional.
Que sea fácilmente transportable	1	1/6	1/5	1/3	1/5	1/8	5	1/6	1/7	1/6	1	3
Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	6	1	3	2	2	1/6	5	1/6	1/7	3	4	6 1/2
Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas	5	1/3	1	1/5	1/4	1/7	5	1/7	1/7	1/5	3	5
El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	3	1/2	5	1	6	1/6	7	1/6	1	1/3	7	8
Que se opere fácilmente	5	1/2	4	1/6	1	1/6	7	1/5	1/2	1/4	6	8
Que se tenga una adecuada manufactura de las probetas	8	6	7	6	6	1	7	1	6	4	7	8
Que se considere el uso de galgas con 1 ó 2 voltios y resistencia de 350 ohms o más	1/5	1/5	1/5	1/7	1/7	1/7	1	1/7	1/7	1/6	1/3	1
Utilizar por lo menos 5 probetas por tipo de prueba	6	6	7	6	5	1	7	1	3	3	5	7
Que sea fácil de instalar en la máquina de ensayos universales	7	7	7	1	2	1/6	7	1/3	1	1	7	7
Que se puedan hacer ensayos con secuencias de apilamiento variadas.	6	1/3	5	3	4	1/4	6	1/3	1	1	6	6
Que se consideren los procesos de fabricación en la aeronave Stela M1	1	1/4	1/3	1/7	1/6	1/7	3	1/5	1/7	1/6	1	3
Que el sistema de unidades a utilizar en el dimensionamiento y maquinado de la pieza sea el Internacional.	1/3	1/6	1/5	1/8	1/8	1/8	1	1/7	1/7	1/6	1/3	1
	48.53	22.44	39.93	20.11	26.88	3.60	61.00	4.00	13.36	13.45	47.67	63.50

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.2 Matriz normalizada de requerimientos

	Que sea fácilmente transportable	Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas	El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	Que se opere fácilmente	Que se tenga una adecuada manufactura de las probetas	Que se considere el uso de galgas con 1 ó 2 voltios y resistencia de 350 ohms o más	Utilizar por lo menos 5 probetas por tipo de prueba	Que sea fácil de instalar en la maquina de ensayos universales marca Instron.	Que se puedan hacer ensayos con secuencias de apilamiento variadas.	Que se consideren los procesos de fabricación en la aeronave Stela M1	utilizar en el dimensionamiento y maquinado de la pieza sea el	Porcentaje de importancia relativa
Que sea fácilmente transportable	0.021	0.007	0.005	0.017	0.007	0.035	0.082	0.042	0.011	0.012	0.021	0.047	0.026
Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	0.124	0.045	0.075	0.099	0.074	0.046	0.082	0.042	0.011	0.223	0.084	0.102	0.084
Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas	0.103	0.015	0.025	0.010	0.009	0.040	0.082	0.036	0.011	0.015	0.063	0.079	0.041
El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	0.062	0.022	0.125	0.050	0.223	0.046	0.115	0.042	0.075	0.025	0.147	0.126	0.088
Que se opere fácilmente	0.103	0.022	0.100	0.008	0.037	0.046	0.115	0.050	0.037	0.019	0.126	0.126	0.066
Que se tenga una adecuada manufactura de las probetas	0.165	0.267	0.175	0.298	0.223	0.278	0.115	0.250	0.449	0.297	0.147	0.126	0.233
Que se considere el uso de galgas con 1 ó 2 voltios y resistencia de 350 ohms o más	0.004	0.009	0.005	0.007	0.005	0.040	0.016	0.036	0.011	0.012	0.007	0.016	0.014
Utilizar por lo menos 5 probetas por tipo de prueba	0.124	0.267	0.175	0.298	0.186	0.278	0.115	0.250	0.225	0.223	0.105	0.110	0.196
Que sea fácil de instalar en la maquina de ensayos universales marca Instron.	0.144	0.312	0.175	0.050	0.074	0.046	0.115	0.083	0.075	0.074	0.147	0.110	0.117
Que se puedan hacer ensayos con secuencias de apilamiento variadas.	0.124	0.015	0.125	0.149	0.149	0.070	0.098	0.083	0.075	0.074	0.126	0.094	0.099
Que se consideren los procesos de fabricación en la aeronave Stela M1	0.021	0.011	0.008	0.007	0.006	0.040	0.049	0.050	0.011	0.012	0.021	0.047	0.024
Que el sistema de unidades a utilizar en el dimensionamiento y maquinado de la pieza sea el Internacional.	0.007	0.007	0.005	0.006	0.005	0.035	0.016	0.036	0.011	0.012	0.007	0.016	0.014

De esta ponderación, se obtuvieron las calificaciones para los requerimientos deseables con los siguientes resultados:

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

- 0.23 Que se tenga una adecuada manufactura de las probetas
- 0.20 Utilizar por lo menos 5 probetas por tipo de prueba
- 0.12 Que sea fácil de instalar en la maquina de ensayos universales
- 0.10 Que se puedan hacer ensayos con secuencias de apilamiento variadas.
- 0.09 El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil
- 0.08 Que las partes involucradas sean de fácil adquisición
- 0.07 Que se opere fácilmente
- 0.04 Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas
- 0.03 Que sea fácilmente transportable
- 0.02 Que se consideren los procesos de fabricación en la aeronave Stela M1
- 0.01 Que se considere el uso de galgas con 1 ó 2 voltios y resistencia de 350 ohms o más, además de las galgas convencionales de 120 ohms.
- 0.01 Que el sistema de unidades a utilizar en el dimensionamiento y maquinado de la pieza sea el Internacional.

4.2.4 Traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería

Ahora se busca convertir un lenguaje altamente subjetivo en otro concreto y medible. En algunos casos los requerimientos del cliente están planteados en términos técnicos perfectamente mensurables, para los cuales no es necesario hacer alguna traducción. En otros casos es necesario buscar en el significado del requerimiento a fin de que se pueda expresar en uno o más términos mensurables de ingeniería, la traducción en términos mensurables para el diseño del dispositivo de prueba se presenta en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Traducción de requerimientos

Requerimiento	Primer nivel de traducción	Segundo nivel de traducción
Que sea fácilmente transportable	- Peso.	- No aplica.
	- Superficies de agarre.	- No aplica.
	- No. de piezas.	- No aplica.
Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	- Disponibilidad en el mercado nacional.	- No. De proveedores
	- Tiempo de entrega de las piezas.	- No aplica.
	- Costo de las piezas.	- No aplica.
Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones y de forma estandarizada	- Dimensiones estandarizadas, ver figura 1.	- No aplica.
Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas	- Dimensiones no estandarizadas: espesor (h), radio (r), profundidad de la muesca (Pm), distancia entre muescas (Dm).	- No aplica.
Que se considere la extensometría eléctrica para medir deformaciones en las probetas	- Que no se dañe la probeta durante la colocación de las galgas extensométricas.	- Tamaño de grano de la lija para la preparación de la superficie.
	- Que se utilicen dos galgas extensométricas por lado orientadas a $\pm 45^\circ$ respecto al eje medio de la probeta. Ver figuras 2 y 3.	- No aplica.
	- Que el centro de la malla quede localizado en el eje de aplicación de carga. Ver figura 3.	- Localización del centro de malla con respecto a la longitud media de la probeta. - Localización de la probeta en el dispositivo. - Localización del dispositivo en la máquina de pruebas Instron. Ver figura 4.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.3 Continuación		
El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	- No. de elementos.	- No aplica.
	- No. de herramientas a usar.	- No aplica.
	- No. de personas para ensamblar.	- No aplica.
	- Tamaño de los elementos.	a) 2L b) diámetro del plato de compresión
	- Peso de los elementos.	- No aplica.
Que se opere fácilmente	- Uso adecuado de las tolerancias.	- Tolerancias de ajuste con juego, exacto y con apriete.
	- No. de personas para operar el dispositivo.	- No aplica.
	- No. de herramientas a usar.	- No aplica.
Inducir al material deformaciones pequeñas	- No. de operaciones para tener lista la prueba.	- No aplica.
	- Deformaciones menores al 20%.	- No aplica.
Evaluar las propiedades según la orientación del sistema de coordenadas del material relativa al eje de aplicación de carga	- Orientación de las fibras con respecto al eje de aplicación de carga. Ver figura 5.	Localización de la muesca en la probeta. Ver figura 1.
		Localización de la probeta en el dispositivo.
		Localización del dispositivo en la máquina de pruebas Instron.
Incluir arreglo que permita centrar la probeta en el aparato	- Posición de la muesca de la probeta con respecto al eje de aplicación de carga.	Localización de la muesca en la probeta. Ver figura 1.
		Localización de la probeta en el dispositivo.
		Localización del dispositivo en la máquina de pruebas Instron.
El material se asumirá homogéneo.	- Tamaño de la celda unitaria del tejido del material compuesto con respecto al tamaño de la zona calibrada.	Tamaño de la celda unitaria representativa, CUR. Ver figura 7.
		Área calibrada, AC = longitud calibrada × ancho de la probeta.
No debe existir torcimiento durante la prueba	- Desviación de la alineación de la probeta con respecto al eje de carga.	- Fabricar el dispositivo dentro de tolerancias.
		- Espesor de las probetas.
		- Colocación de la probeta.
		- Determinación del torcimiento. Ver figura 6
Las galgas no deben ser tan grandes para extenderse significativamente fuera del área de esfuerzo uniforme	- Dimensión de las galgas, Lg.	- No aplica.
	- Dimensión del área de esfuerzo uniforme, Leu.	- No aplica.
Que se tenga una adecuada manufactura de las probetas.	- Las fibras del refuerzo no deben ser dañadas.	- No. de operaciones de acabado.
		- Velocidad de corte.
		- Tipo de herramienta de corte (material y geometría de la herramienta de corte).
		- Dimensión del corte.
	- No. de defectos superficiales	- Volumen de porosidad en las probetas
		- Rugosidad
		- Mala impregnación

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.3 Continuación		
Que se considere el uso de galgas con 1 ó 2 voltios y resistencia de 350 ohms o más	- Resistencia	- No aplica.
	- Voltaje	- No aplica.
Utilizar por lo menos 5 probetas por tipo de prueba	- No. de probetas por prueba	- No aplica.
Que se mida la densidad, la fracción volumétrica de fibra resina y porosidad	- Densidad (ρ)	- No aplica.
	- Obtención de Vf, Vm, Vp mediante Pruebas de digestión de resina.	- No aplica.
Que no haya ondulaciones o distorsiones a lo largo de las fibras	- Linealidad de las fibras respecto al eje de carga. Ver figura 8	- Que la ondulación de una mecha no sea mayor que su ancho (para telas bidireccionales).
Que sea fácil de instalar en la maquina de ensayos universales marca Instron.	- Dimensiones	- No aplica.
	- No. de piezas	- No aplica.
	- Peso	- No aplica.
	- No. de herramientas a usar	- No aplica.
	- personas para instalar	- No aplica.
	- No. de personas para operar el dispositivo	- No aplica.
La sección de prueba se define como la zona de la probeta donde el esfuerzo cortante es constante y el momento flector nulo.	- Estado de esfuerzos de corte puro en la zona de prueba	- No aplica.
Que se obtengan las propiedades en corte reales del material	- Módulo de cizallamiento, G; deformación angular última, $\gamma_{\text{última}}$.	- No aplica.
	- Resistencia al corte, τ_{max} ; esfuerzo cortante de ruptura, $\tau_{\text{último}}$.	- No aplica.
Evitar el excesivo corte de las fibras debido a grandes elongaciones	- Deformaciones menores al 20%	- No aplica.
Que el tamaño de la galga vaya de acuerdo al criterio de homogeneidad del material	- tamaño de celda unitaria representativa respecto al tamaño del área de prueba	- No aplica.
	- Longitud de malla efectiva	- No aplica.
Que la prueba mecánica se haga de acuerdo a procedimientos normalizados	- Dimensiones de las probetas.	Ver figura 1.
	- Tiempo de prueba	La falla se debe presentar entre 1 y 10 minutos después de iniciada la prueba.
	- Modo de control de la prueba: carga, desplazamiento o deformación.	Si el control es por desplazamiento; que este sea de 2 mm/min. Si el control es por deformación; que se tenga una razón de deformación de 0.01 1/min.
Que se puedan hacer ensayos con secuencias de apilamiento variadas.	- Espesor	
	- No. de capas	- No aplica.
	- Orientación de las capas.	- No aplica.
Que se consideren los procesos de fabricación en la aeronave Stela M1	- proceso de manufactura	- Proceso de tendido a mano y bolsa de vacío.
	- temperatura de curado	
	- proceso de curado en horno solar	- No aplica.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.3 Continuación		
Considerar el uso de galgas extensométricas de respaldo para medir el grado de torcimiento durante la prueba	- Torcimiento de la probeta. Ver figura 7.	- No aplica.
Caracterizar mecánicamente la resina a utilizar	- Módulo de cizallamiento, G; deformación angular última, $\gamma_{\text{última}}$.	- No aplica.
	- Resistencia al corte, τ_{max} ; esfuerzo cortante de ruptura, $\tau_{\text{último}}$.	- No aplica.
Que no se dañe la probeta durante el pegado de las galgas	- Implementar un proceso adecuado para evitar el rompimiento de fibras de refuerzo debido al lijado.	
	- Tamaño del grano de la lija.	
Que el sistema de unidades a utilizar en el dimensionamiento y maquinado de la pieza sea el Internacional.	- Utilizar la probeta normalizada acotada en mm. Ver figura 1.	- No aplica.
Que sea fácil de manufacturar	-Tiempo de fabricación	- No aplica
	-Costo de fabricación	- No aplica
	-Intervalos de tolerancias	- No aplica

4.2.5 Establecimiento de metas de diseño

Cuando algunos requerimientos del cliente son suficientemente precisos, se convierten directamente en metas de diseño. Se trata de características mensurables que llevan asociadas magnitudes y unidades de medición, con esto las metas de diseño resultantes se presentan en la tabla 4.4

Tabla 4.4 Establecimiento de metas de diseño

Requerimiento	Meta de diseño	Tendencia
Que sea fácilmente transportable	15 Kg.	↓
	30 cm ²	↑
	15	↓
Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	3	No aplica.
	4 semanas	↓
	Costo de un dispositivo similar (IITRI) \$10,500 M. N.	↓
Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones y de forma estandarizada	Ver figura 1	No aplica.
Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas	No aplica.	No aplica.
Que se considere la extensometría eléctrica para medir deformaciones en las probetas	Usar lijas a partir del no. 320; de preferencia a partir del no. 600.	↓
	Desviación angular cero $\theta = 45^\circ$ $n = 4$	No aplica.
	No aplica.	No aplica.
	No aplica.	No aplica.
	No aplica.	No aplica.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.4 Continuación		
El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	15	↓
	2 llaves Allen	↓
	2	=
	a) 152 b) 152.4	a) ↓ b) ↓
	15 kg	↓
Que se opere fácilmente	1	=
	2 llaves Allen	↓
	7	↓
Inducir al material deformaciones pequeñas	$\epsilon < 20\%$	↓
Evaluar las propiedades según la orientación del sistema de coordenadas del material relativa al eje de aplicación de carga	Esta traducción se definirá en la etapa de la generación conceptual, porque las metas aquí consideradas se prefieren considerarlas como funciones del dispositivo.	
Incluir arreglo que permita centrar la probeta en el aparato	Esta traducción se definirá en la etapa de la generación conceptual, porque las metas aquí consideradas se prefieren considerarlas como funciones del dispositivo.	
El material se asumirá homogéneo.	$CUR/AC \approx 0$	=
	209.899mm ²	=
No debe existir torcimiento durante la prueba	No aplica.	↓
	3 mm < e < 4 mm	=
	Uso de muesca	No aplica.
	$[(Ga - Gb) / (Ga + Gb)] \times 100 < 3\%$	↓
Las galgas no deben ser tan grandes para extenderse significativamente fuera del área de esfuerzo uniforme	$Lg \ll Leu$	↓
Que se tenga una adecuada manufactura de las probetas (ver figura 8)	De un solo corte.	↓
	Mismas que para el aluminio 80, 100, 120 mm/min.	=
	Cortador de punta plana con recubrimiento superficial de dos gavilanes de $\varnothing 3$ mm para la probeta. Cortador de punta plana con recubrimiento de dos gavilanes de $\varnothing 2.6$ mm para la muesca.	=
	Dado el espesor reducido, de un solo corte.	↓
	$Vp < 10\%$	↓
	Ra 0.8	↓
	$Vp < 10\%$	↓
	Que se considere el uso de galgas con 1 ó 2 voltios y resistencia de 350 ohms o más	$R = 350 \Omega$
$V = 1 \text{ ó } 2$		=
Utilizar por lo menos 5 probetas por tipo de prueba	$E \geq 5$	↑
Que se mida la densidad, la fracción volumétrica de fibra resina y porosidad	Resultado a determinar experimentalmente.	
	Resultados a determinar experimentalmente.	
	$Vf \approx 60\%$	↑
	$Vp \approx 10\%$	↓
Que no haya ondulaciones o distorsiones a lo largo de las fibras	No aplica.	No aplica.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.4 Continuación		
Que sea fácil de instalar en la máquina de ensayos universales	a) 2L b) diámetro del plato de compresión Ø6.000"	a) ↓ b) ↓
	15	↓
	15 kg	↓
	2 llaves Allen	↓
	2	↓
	1	↓
La sección de prueba se define como la zona de la probeta donde el esfuerzo cortante es constante y el momento flector nulo.	$\sigma = 0$ $\tau = \text{cte.}$	=
Que se obtengan las propiedades en corte reales del material	Resultado a determinar experimentalmente	
Evitar el excesivo corte de las fibras debido a grandes elongaciones	$\epsilon < 20\%$	=
Que el tamaño de la galga vaya de acuerdo al criterio de homogeneidad del material	Depende del tejido (bidireccional). Nota: en este trabajo se van a ensayar laminados unidireccionales.	No aplica.
	6.09mm	↓
Que la prueba mecánica se haga de acuerdo a procedimientos normalizados	No aplica.	=
	$1 < T < 10$	=
	Vel= 2 mm/min	=
	$\epsilon/T = 0.01$ 1/min	=
Que se puedan hacer ensayos con secuencias de apilamiento variadas.	$h < 10$ mm	↓
	No aplica.	No aplica.
	No aplica.	No aplica.
Que se consideren los procesos de fabricación en la aeronave Stela M1	Presión atmosférica promedio en SLP durante 5 días del mes de octubre del 2008 = 1024.21 mbar o 14.855psi	↑
	50 °C	=
	No aplica.	No aplica.
Considerar el uso de galgas extensométricas de respaldo para medir el grado de torcimiento durante la prueba	$[(G_a - G_b) / (G_a + G_b)] \times 100 < 3\%$	=
Caracterizar mecánicamente la resina a utilizar	A determinar experimentalmente.	
Que no se dañe la probeta durante el pegado de las galgas	No aplica.	No aplica.
	Usar lijas a partir del no. 320; de preferencia a partir del no. 600.	↑
Que el sistema de unidades a utilizar en el dimensionamiento y maquinado de la pieza sea el Internacional.	No aplica.	No aplica.
Que sea fácil de manufacturar	-3 semanas	↓
	- Costo de un dispositivo similar (IITRI) \$10,500 M. N.	↓

En las figuras 4.1 a 4.8 se presentan esquematizaciones de algunos de los requerimientos de diseño, así como dimensiones de la probeta normalizada.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

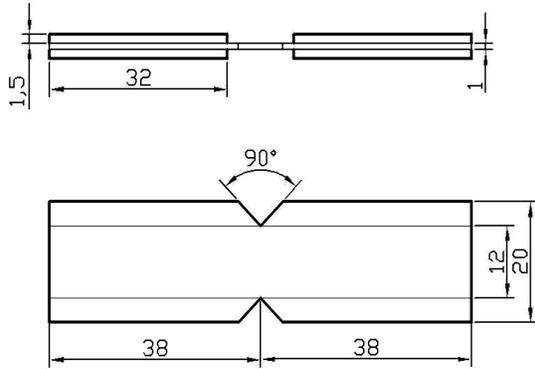


Figura 4.1 Dimensiones generales

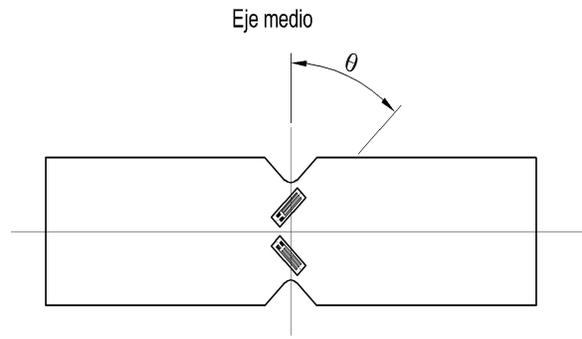


Figura 4.2 Orientación de las galgas extensométricas

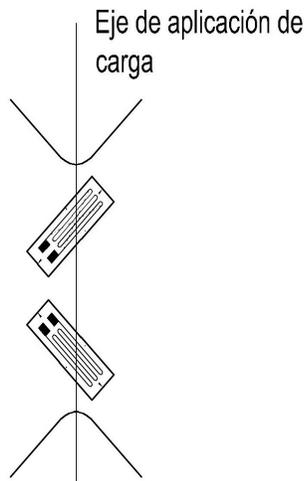


Figura 4.3 Centro de la malla respecto al eje de aplicación de carga



Figura 4.4 Máquina servohidráulica Instron de ensayos universales

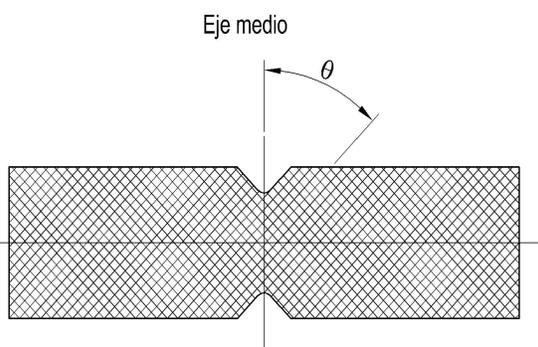


Figura 4.5 Orientación de las fibras respecto al eje de aplicación de carga

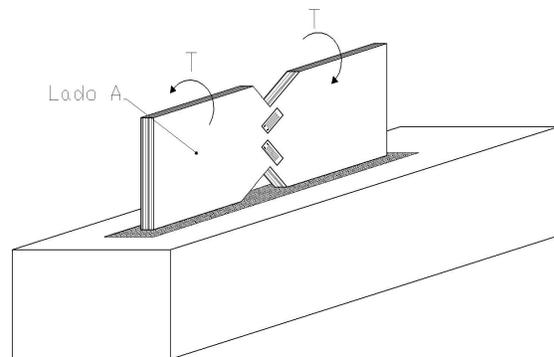


Fig. 4.6 Representación del torcimiento en la probeta

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

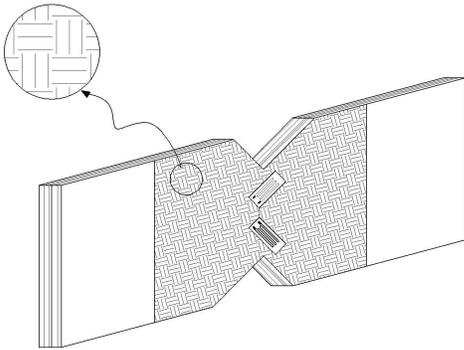


Figura 4.7 Tamaño de la celda unitaria representativa

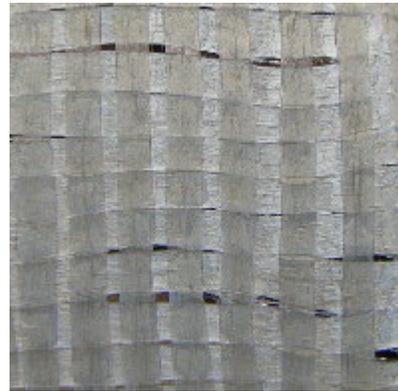


Figura 4.8 Ondulaciones de las fibras

4.3 SEGUNDA ETAPA: DISEÑO CONCEPTUAL

En el diseño conceptual se realiza primero un modelo funcional, después un modelo geométrico, y en la etapa de diseño de detalle se realiza un modelo de manufactura, en donde se especifican formas, materiales, tolerancias, tratamientos térmicos. Para el establecimiento del modelo funcional se trata primero de identificar la función global. Enseguida se identifican los límites del sistema. Posteriormente se identifican las funciones precursoras, de tal manera que al final se tenga un árbol de funciones.

4.3.1 Determinación de la función global.

Se determinó mediante un modelo, la función mecánica; es decir, una transformación que se describe en términos de flujos lógicos de materia, energía o de información del sistema en su conjunto utilizando una aproximación del tipo caja negra, tal como se establece en la figura 4.9

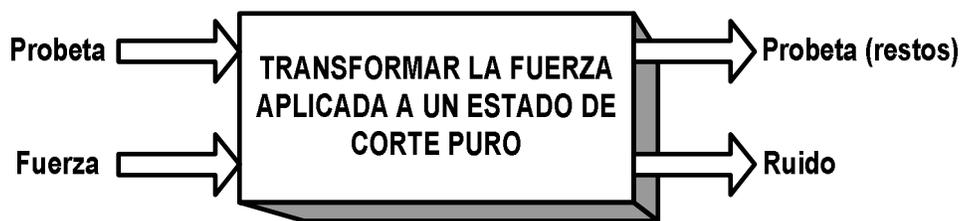


Figura 4.9 Modelo de la función mecánica

4.3.2 Determinación de los límites del sistema

El dispositivo es visto como un sistema, por medio del cual debe poder llevarse a cabo la función global prevista. Como ningún sistema se diseña independientemente de su entorno, deben establecerse los límites entre el dispositivo y el entorno que le rodea o le restringe, en particular los efectos que tienen incidencia sobre la función global.

Se determinan entonces las relaciones entre el dispositivo y el entorno formando así funciones tanto primarias como secundarias, que deben cumplirse para formar la función

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

global [2], estas relaciones con el entorno se presentan esquemáticamente en la figura 4.10.

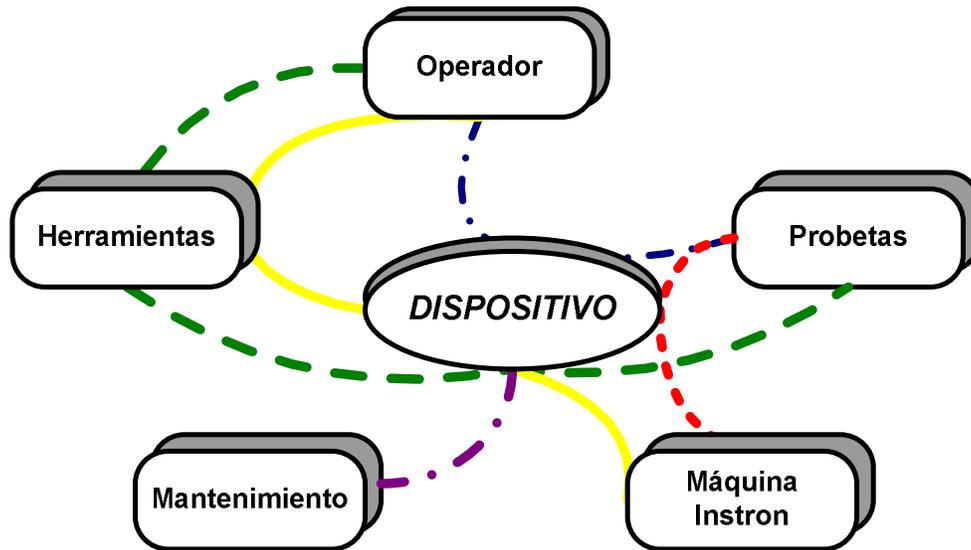


Figura 4.10 Diagrama de pulpo para el establecimiento de funciones.

4.3.3 Análisis funcional (Definición de las funciones)

Posterior al establecimiento de las relaciones entre el dispositivo y su entorno, es necesario establecer las funciones precursoras de la función global. Las funciones pueden ser primarias (que su cumplimiento es básico para el buen funcionamiento del dispositivo) o secundarias (que dependen directamente de las funciones primarias). A este conjunto de funciones y la dependencia de las mismas se le conoce como árbol de funciones y se muestra en el diagrama de la figura 4.11.

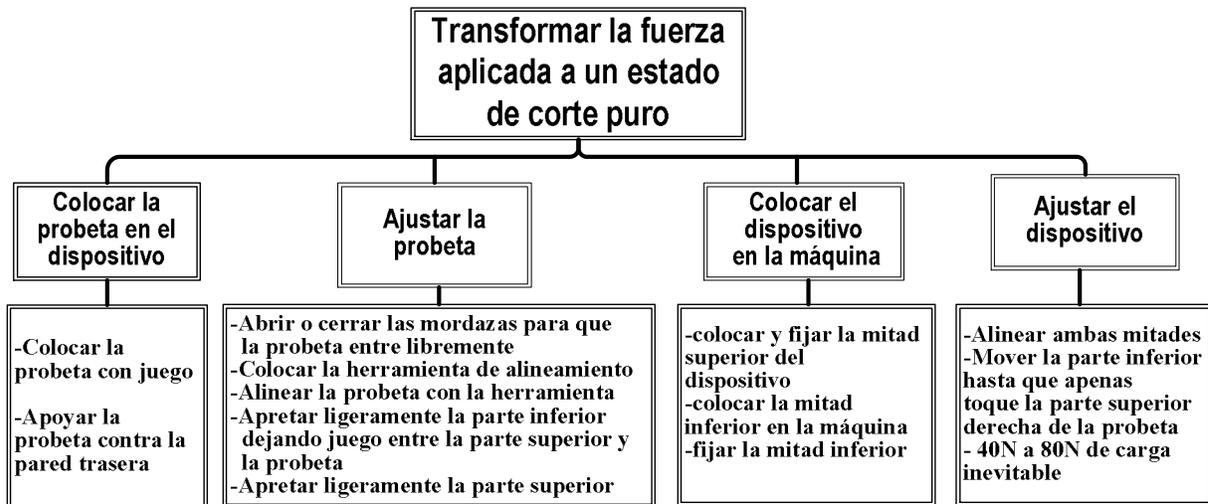


Figura 4.11 Árbol de funciones

4.3.4 Generación conceptual

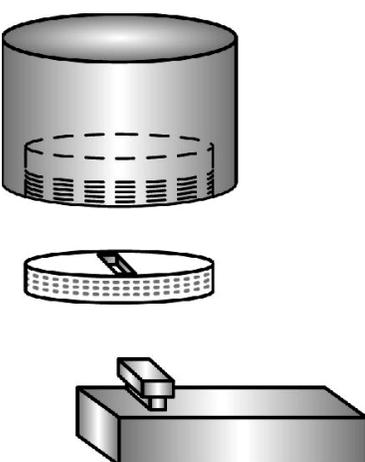
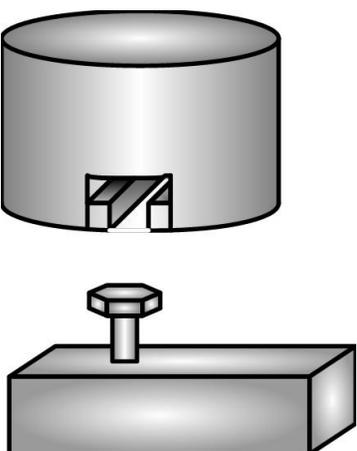
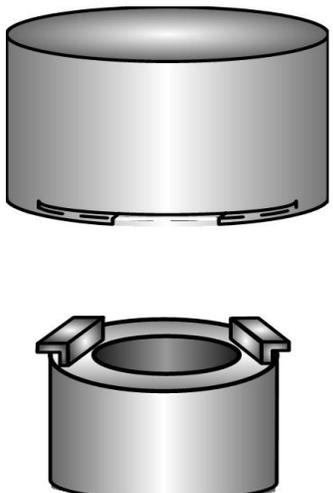
Una vez establecidas las funciones se ha centrado la atención en definir exclusivamente las funciones necesarias para lograr cumplir con los requerimientos del cliente. La estrategia consiste en generar la mayor cantidad posible de conceptos, en este caso mediante el método escogido fue el de “brainstorming” o tormenta de ideas. Para no inducir, los resultados los conceptos generados en esta etapa no se evalúan y además la crítica no tiene lugar conforme se van generando. Este método también permite crear conceptos a partir de algunos ya existentes o bien, combinar conceptos para buscar obtener siempre la mejor solución.

De acuerdo al análisis, las funciones a cumplir serán las siguientes:

1. Colocar y fijar la parte superior del dispositivo a la máquina de ensayos universales.
2. Colocar la mitad inferior del dispositivo en la maquina.
3. Alinear la parte inferior del dispositivo con respecto a la parte superior
4. Fijar la parte inferior del dispositivo a la maquina
5. Abrir y cerrar las mordazas
6. Colocar la herramienta de alineamiento
7. Guiar la parte móvil respecto a la parte fija

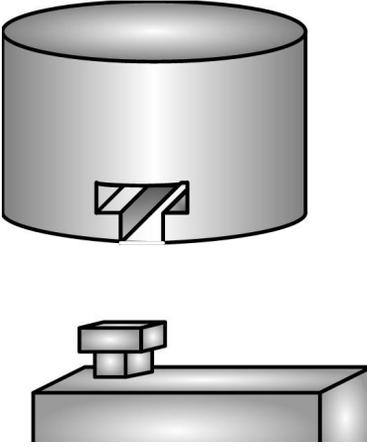
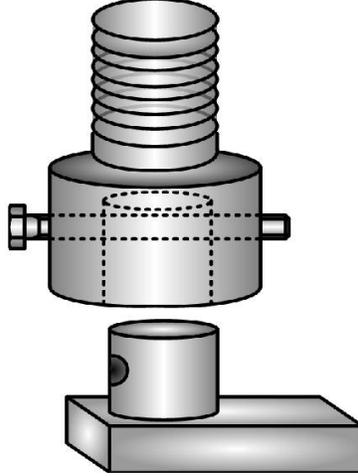
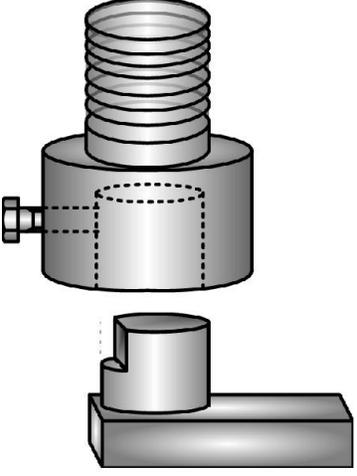
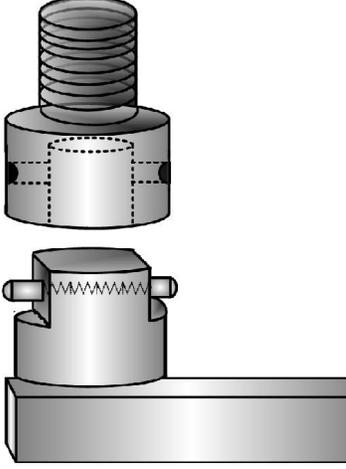
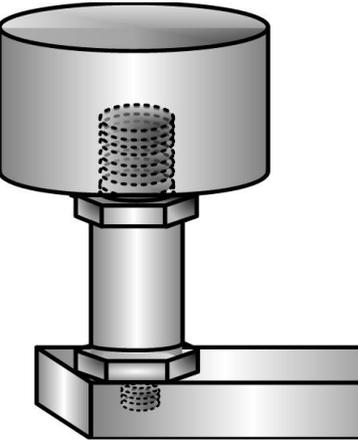
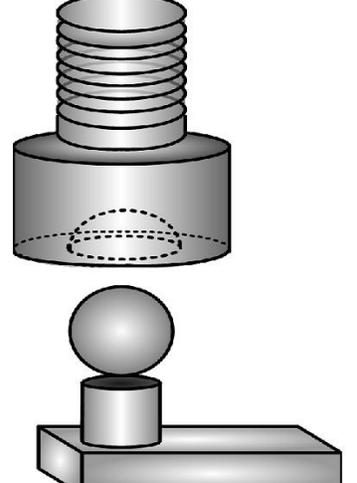
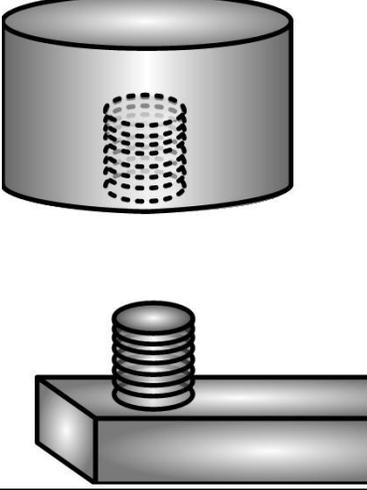
Los conceptos generados para las diferentes funciones listadas anteriormente, se presentan en las tablas 4.5 a 4.10

Tabla 4.5 Generación conceptual para la función 1

Función 1 Colocar y fijar la parte superior del dispositivo a la máquina de ensayos universales.		
		
<i>Concepto 1.1</i>	<i>Concepto 1.2</i>	<i>Concepto 1.3</i>

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.5 Continuación

		
<p><i>Concepto 1.4</i></p>	<p><i>Concepto 1.5</i></p>	<p><i>Concepto 1.6</i></p>
		
<p><i>Concepto 1.7</i></p>	<p><i>Concepto 1.8</i></p>	<p><i>Concepto 1.9</i></p>
		
<p><i>Concepto 1.10</i></p>		

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.6 Generación conceptual para la función 2 y 4

Función 2-4 Colocar y fijar la mitad inferior del dispositivo en la máquina.		
Concepto 2.1	Concepto 2.2	Concepto 2.3
Concepto 2.4	Concepto 2.5	Concepto 2.6
Concepto 2.7	Concepto 2.8	Concepto 2.9

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.7 Generación conceptual para la función 3

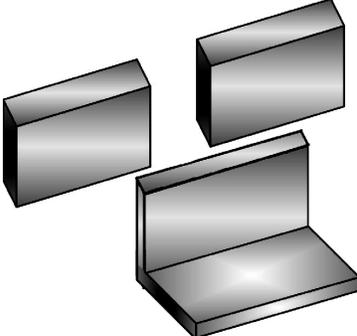
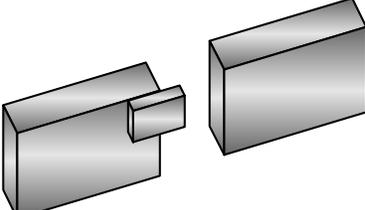
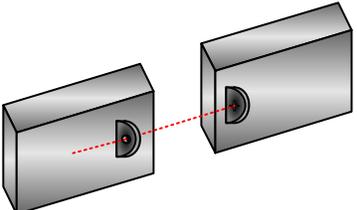
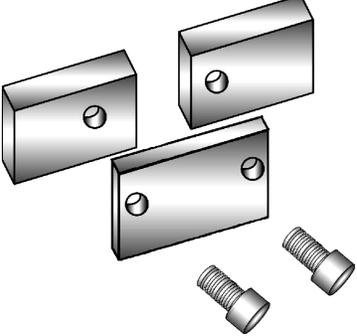
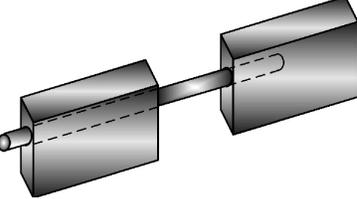
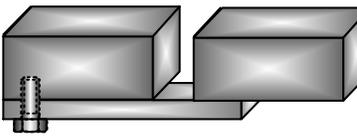
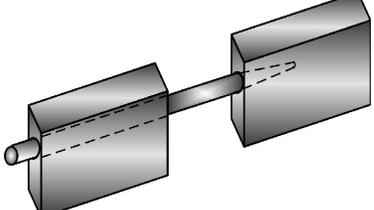
Función 3 Alinear la parte inferior del dispositivo con respecto a la parte superior		
		
Concepto 3.1	Concepto 3.2	Concepto 3.3
		
Concepto 3.4	Concepto 3.5	Concepto 3.6
		
Concepto 3.7		

Tabla 4.8 Generación conceptual para la función 5

Función 5 Abrir y cerrar las mordazas		
<i>Concepto 5.1</i>	<i>Concepto 5.2</i>	<i>Concepto 5.3</i>
<i>Concepto 5.4</i>	<i>Concepto 5.5</i>	<i>Concepto 5.6</i>
<i>Concepto 5.7</i>	<i>Concepto 5.8</i>	<i>Concepto 5.9</i>

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.8 Continuación

<p>Concepto 5.10</p>	<p>Concepto 5.11</p>	<p>Concepto 5.12</p>
<p>Concepto 5.13</p>		

Tabla 4.9 Generación conceptual para la función 6

Función 6 Colocar la herramienta de alineamiento

<p>Función 6 Colocar la herramienta de alineamiento</p>		
<p>Concepto 6.1</p>	<p>Concepto 6.2</p>	<p>Concepto 6.3</p>

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.9 Continuación

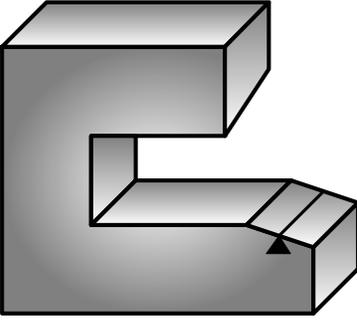
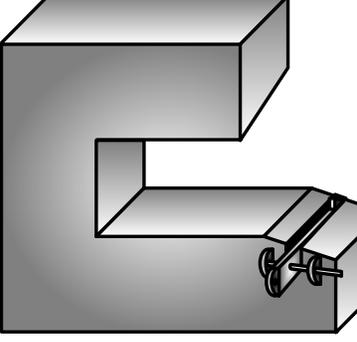
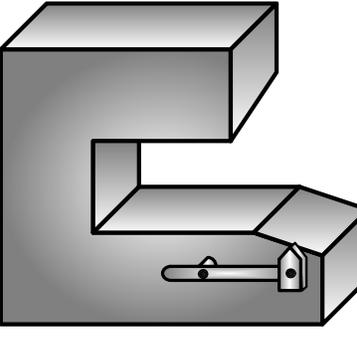
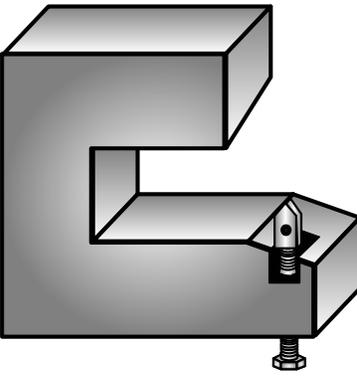
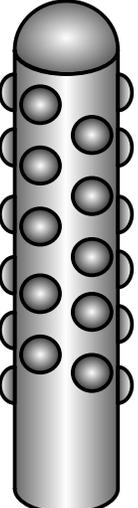
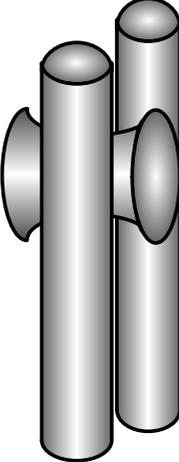
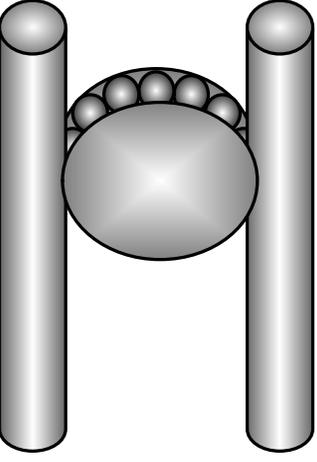
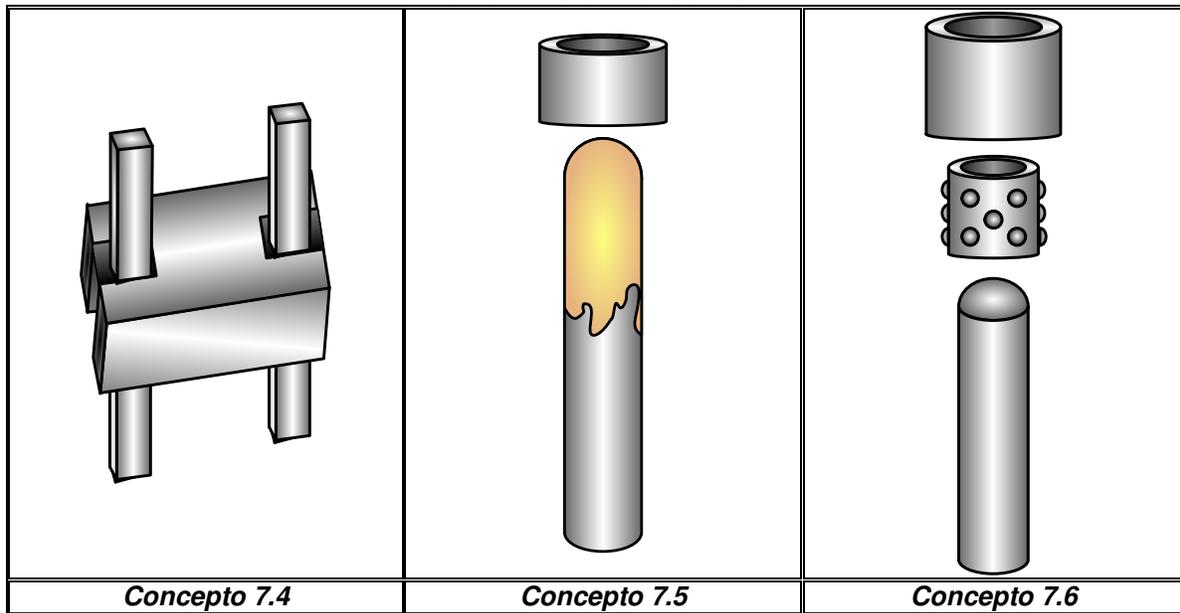
		
<i>Concepto 6.4</i>	<i>Concepto 6.5</i>	<i>Concepto 6.6</i>
		
<i>Concepto 6.7</i>		

Tabla 4.10 Generación conceptual para la función 7
Función 7 Guiar a parte móvil respecto a la parte fija.

		
<i>Concepto 7.1</i>	<i>Concepto 7.2</i>	<i>Concepto 7.3</i>

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.10 Continuación



4.3.5 Evaluación conceptual

Una vez que se han generado la mayor cantidad de conceptos posibles, sin limitación más que por la imaginación y la creatividad, los conceptos que resuelven una función, se evalúan uno a uno tomando como referencia el cumplimiento que estos tienen con los requerimientos. Estas evoluciones se presentan en las tablas 4.11 a 4.16. Las opciones con mayor puntaje fueron resaltadas para cada una de las funciones.

Tabla 4.11 Evaluación conceptual para la función 1

Función 1 Colocar y fijar la parte superior del dispositivo a la máquina de ensayos universales													
Requerimientos		Conceptos											
		%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	No debe existir torcimiento durante la prueba	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	REFERENCIA	1	0	
2	La sección de prueba se define como la zona de la probeta donde el esfuerzo cortante es constante y el momento flector nulo.	1	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
4	Que la prueba mecánica se haga de acuerdo a procedimientos normalizados	1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1		-1	0	
5	Que sea fácil de instalar en la maquina de ensayos universales marca Instron.	0.12	1	1	1	1	1	0	1		-1	-1	
6	El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	0.09	-1	-1	-1	1	0	0	1		-1	0	
7	Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	0.08	0	0	0	0	0	0	-1		-1	0	
8	Que se opere fácilmente	0.07	1	1	1	1	1	0	1		-1	-1	
9	Que se manufacture fácilmente	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1		-1	0	
total			-1.9	-1.9	-1.9	-1.72	-0.81	-1	-0.8			-0.36	-0.19

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.12 Evaluación conceptual para la función 2-4

Función 2 Colocar y fijar la parte inferior del dispositivo a la máquina de ensayos universales												
Requerimientos		Conceptos										
		%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	No debe existir torcimiento durante la prueba	1	-1	0	0	0	REFERENCIA	-1	-1	-1	-1	
3	Que la prueba mecánica se haga de acuerdo a procedimientos normalizados	1	La norma no define esta función									
4	Que sea fácil de instalar en la máquina de ensayos universales marca Instron.	0.12	0	-1	-1	-1		0	0	0	0	
5	El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	0.09	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	
6	Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	0.08	0	0	0	0		0	-1	0	0	
7	Que se opere fácilmente	0.07	0	-1	-1	-1		0	0	0	0	
8	Que sea fácilmente transportable	0.03	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	
9	Que se manufacture fácilmente	1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	
	total		-1.12	-0.31	-0.31	-0.31			-1.12	-1.2	-1.12	-1.12

Tabla 4.13 Evaluación conceptual para la función 3

Función 3 Alinear la parte inferior del dispositivo con respecto a la parte superior										
Requerimientos		Conceptos								
		%	1	2	3	4	5	6	7	
1	No debe existir torcimiento durante la prueba	1	-1	-1	-1	0	REFERENCIA	-1	1	
3	Que la prueba mecánica se haga de acuerdo a procedimientos normalizados	1	1	1	0	1		1	0	
5	El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	0.09	1	1	-1	-1		1	1	
6	Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	0.08	0	0	0	0		0	0	
7	Que se opere fácilmente	0.07	-1	-1	-1	0		-1	0	
8	Que se manufacture fácilmente	1	1	1	0	0		0	0	
	total		1.02	1.02	-1.16	0.91			0.02	1.09

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.14 Evaluación conceptual para la función 5

Función 5 Abrir y cerrar las mordazas															
Requerimientos		Conceptos													
		%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones estandarizadas	1	0	0	0	0	0	REFERENCIA	0	0	0	0	0	0	0
2	La sección de prueba se define como la zona de la probeta donde el esfuerzo cortante es constante y el momento flector nulo.	1	0	0	0	0	0		-1	-1	-1	-1	-1	1	1
4	Que la prueba mecánica se haga de acuerdo a procedimientos normalizados	1	-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	0	-1	-1	0	0
5	Que se puedan hacer ensayos con secuencias de apilamiento variadas.	0.1	0	0	0	0	0		0	-1	0	0	0	0	0
6	El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	0.09	-1	-1	-1	-1	0		-1	-1	0	-1	-1	-1	-1
7	Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	0.08	0	-1	-1	0	0		-1	0	0	0	0	0	0
8	Que se opere fácilmente	0.07	-1	0	0	-1	-1		-1	-1	0	-1	0	1	1
9	Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas	0.04	0	0	0	0	0		-1	0	0	-1	-1	0	0
10	Que se maquine fácilmente	1	-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	0	-1	-1	-1	-1
	total		-1.09	-1.17	-1.2	-1.09	-1			-2.17	-2.19	-1	-2.09	-2.09	0.91

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.15 Evaluación conceptual para la función 6

Función 6 Colocar la herramienta de alineamiento									
Requerimientos		%	Conceptos						
			1	2	3	4	5	6	7
1	Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones estandarizadas	1	0	REFERENCIA	0	0	0	0	0
2	Incluir arreglo que permita centrar la probeta en el aparato	1	0		0	-1	0	0	0
3	El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	0.09	-1		1	1	-1	-1	-1
4	Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	0.08	0		0	0	0	0	0
5	Que se opere fácilmente	0.07	0		1	-1			
6	Que se hagan ensayos en probetas de dimensiones no estandarizadas	0.04	-1		-1	1	-1	-1	-1
8	Que se manufacture fácilmente	1	-1		-1	1	-1	-1	-1
9	La sección de prueba se define como la zona de la probeta donde el esfuerzo cortante es constante y el momento flector nulo.	1	0		-1	0	0	0	0
		total	-0.13			-0.12	-0.94	-0.13	-0.13

Tabla 4.16 Evaluación conceptual para la función 7

Función 7 Guiar la parte móvil respecto a la parte fija								
Requerimientos		%	Conceptos					
			1	2	3	4	5	6
2	No debe existir torcimiento durante la prueba	1	0	-1	-1	-1	0	REFERENCIA
3	La sección de prueba se define como la zona de la probeta donde el esfuerzo cortante es constante y el momento flector nulo.	1	0	-1	-1	-1	0	
4	El ensamble de los componentes del dispositivo debe ser fácil	0.09	0	-1	-1	-1	1	
5	Que las partes involucradas sean de fácil adquisición	0.08	0	-1	-1	0	0	
6	Que se opere fácilmente	0.07	0	-1	-1	-1	0	
8	Que sea fácilmente transportable	0.03	0	0	0	0	0	
9	Que se manufacture fácilmente	1	0	-1	-1	-1	0	
		total	0	-3.24	-3.24	-3.16	0.09	

4.3.7 Definición del modelo conceptual

A partir de los conceptos que se eligieron de acuerdo a las evaluaciones hechas, se establece un concepto global (el modelo conceptual), mediante la integración de los conceptos de las diversas funciones, de tal manera a que se reúnan los atributos que mas convienen. El concepto global obtenido para el dispositivo, es el que se muestra en las figuras 4.12 a 4.19.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

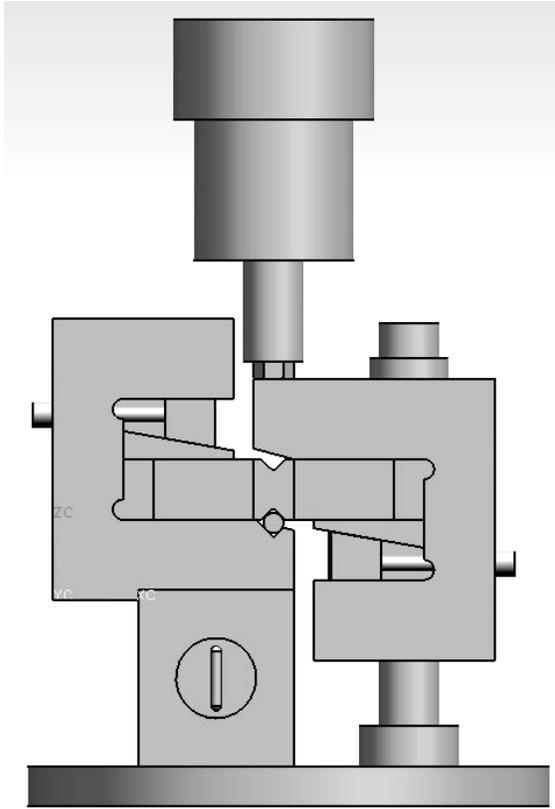


Figura 4.12 Vista frontal del modelo conceptual

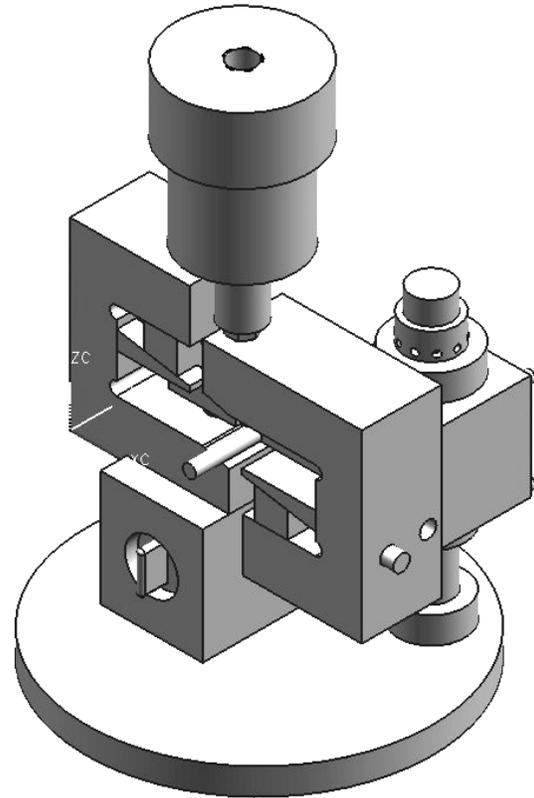


Figura 4.13 Vista isométrica del modelo conceptual

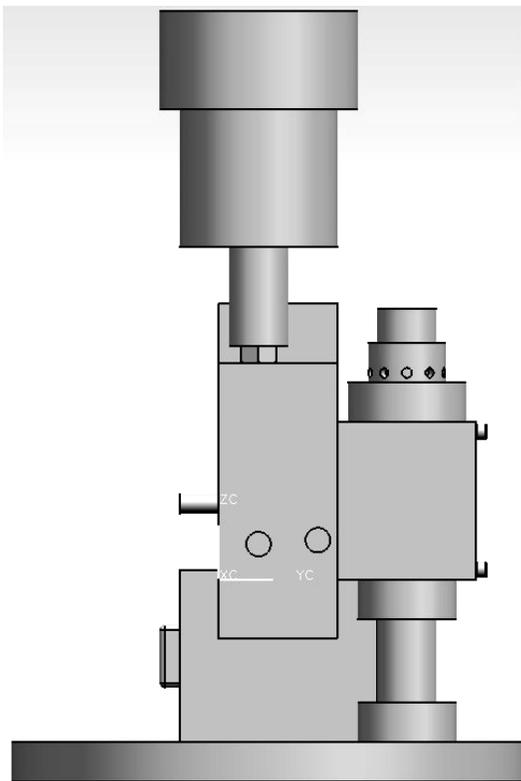


Figura 4.14 Vista lateral del modelo conceptual

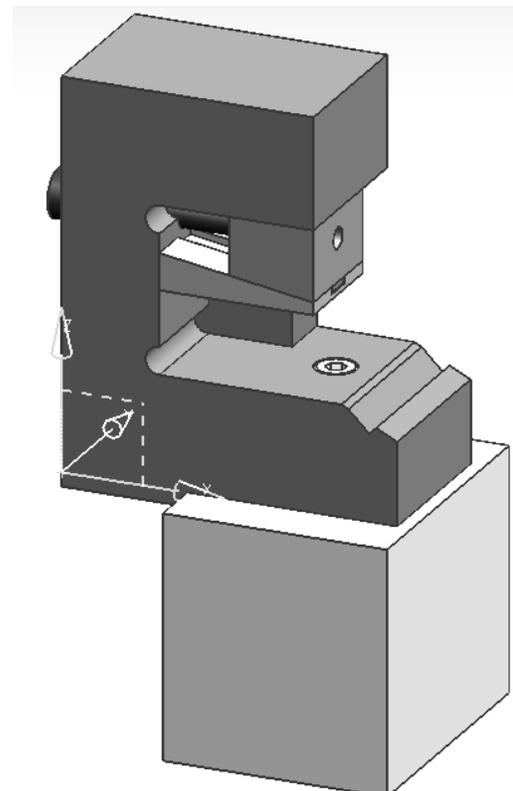


Figura 4.15 Detalle de la unión entre la parte inferior del dispositivo y la base magnética

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

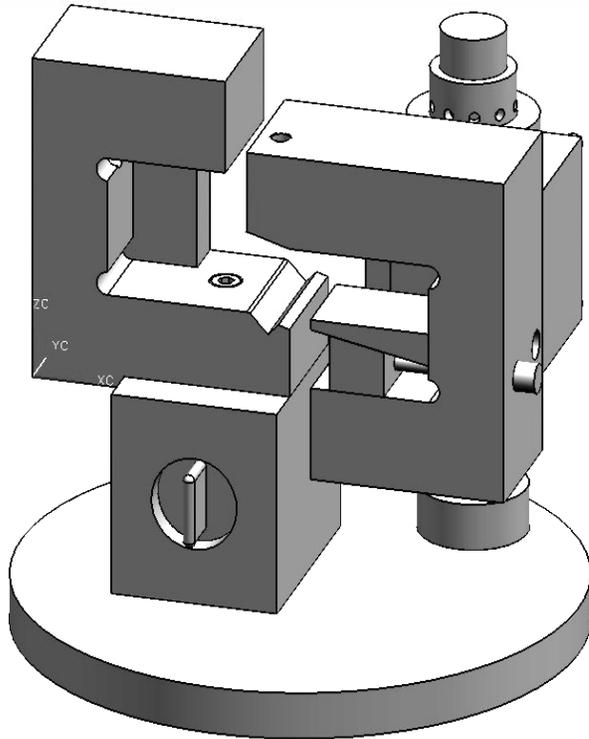


Figura 4.16 Dispositivo conceptual sin probeta

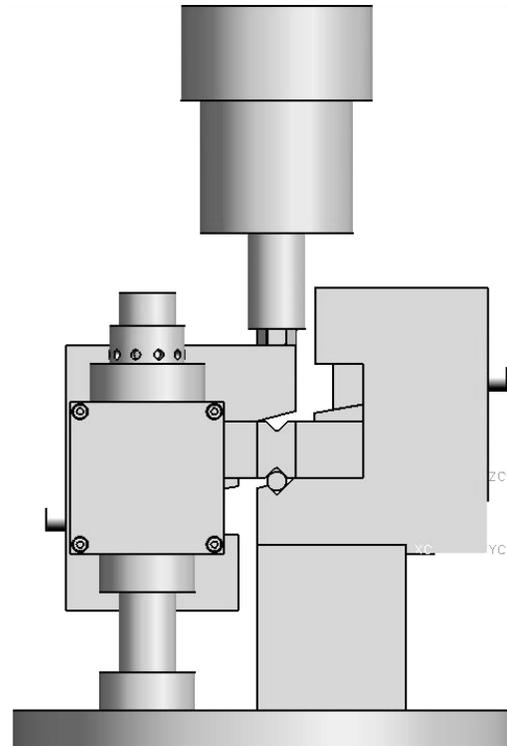


Figura 4.17 Vista trasera del modelo conceptual

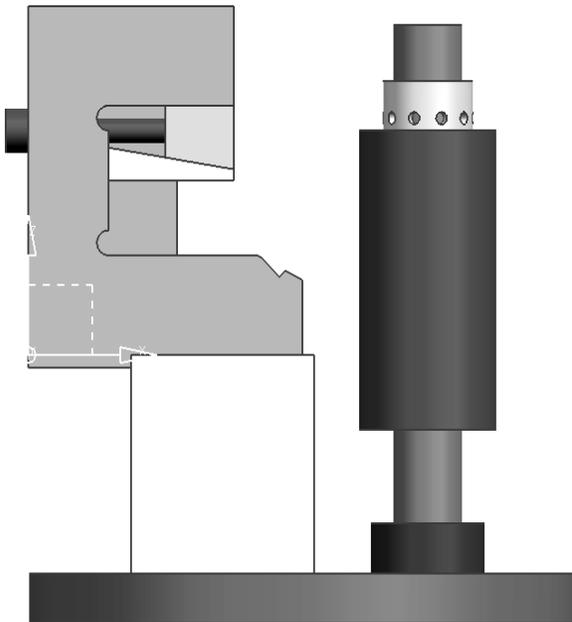


Figura 4.18 Detalle del ensamble de las partes inferiores del dispositivo

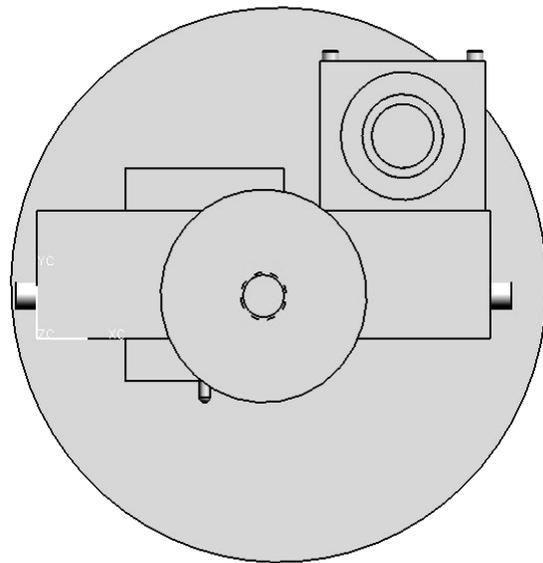


Figura 4.19 Vista superior del modelo conceptual

4.4 TERCERA ETAPA: DISEÑO DE DETALLE

Dentro de esta etapa se detallaran la solución conceptual (concepto global) al problema tecnológico, en términos de forma, materiales, procesos, dimensiones, tolerancias, tratamientos superficiales, de tal manera que sea posible su fabricación.

4.4.1 Determinación de tolerancias generales

La inevitable variación en la obtención de las dimensiones de piezas procesadas por medios mecánicos, hace indispensable el establecimiento de sistemas racionales que permitan fijar los valores tolerables entre los que debe estar comprendida la dimensión dada.

De acuerdo con las funciones del conjunto, se pueden distinguir fácilmente ciertas superficies más importantes que otras, a estas más importantes que permiten el correcto funcionamiento del mecanismo se les llama superficies funcionales y las menos importantes son conocidas como no funcionales [3].

Las especificaciones deben basarse en la obtención de:

El menor tiempo de fabricación

El menor costo de producción

Condiciones funcionales adecuadas y uniformes (intercambiabilidad)

Lo anterior implica, por un lado, que las tolerancias sean lo más amplias posible para que la fabricación sea fácil y rápida; por otro, tan cerradas que permitan ensamblar con cualquier pieza del lote y presenten condiciones de fijación similares. El equilibrio de los dos aspectos se oponen: facilidad de fabricación y uniformidad funcional, requiere del estudio y análisis cuidadoso del sistema propuesto, para poder determinar las superficies funcionales y con base en la labor que debe desempeñar, determinar las tolerancias requeridas.

Sin embargo, para otras superficies no se necesita especificar tolerancias de manera particular, dado que no cumplen con una función en específico o bien, que no se ven afectadas muy seriamente por las tolerancias, es decir, que son superficies no funcionales. Con el fin de uniformizar criterios, se usa la siguiente tabla para determinar las tolerancias generales (para superficies no funcionales), cuyo valor dependerá de la dimensión nominal, las cuales se presentan en la tabla 4.17.

Tabla 4.17 Tolerancias generales (Para dibujos acotados en pulgadas)[3]

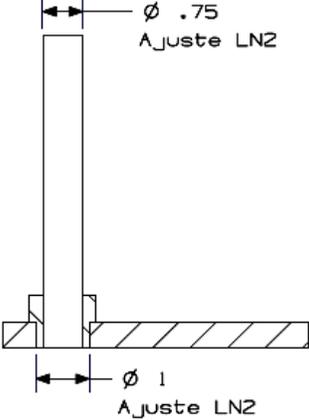
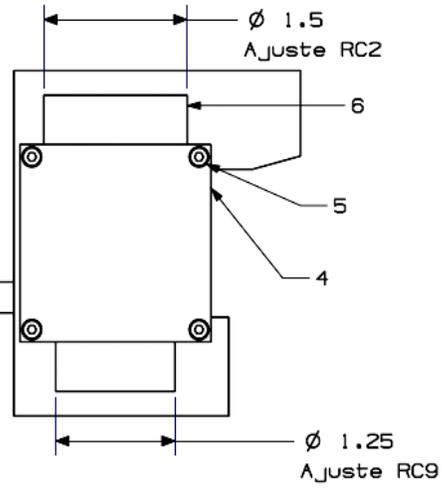
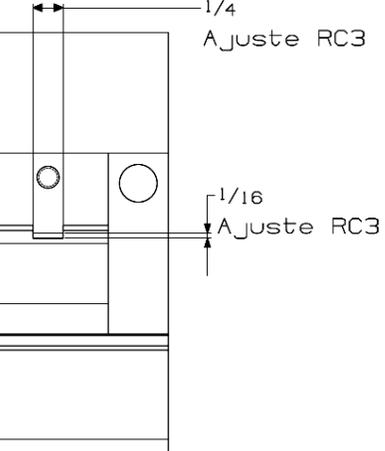
CLASE DE PRECISION		DIMENSIONES LINEALES EN PULGADAS					
		Hasta 1/4	>1/4 a 3/4	>3/4 a 2	>2 a 5	>5 a 10	>10 a 16
F	Fina	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.008
M	Media	0.004	0.006	0.008	0.012	0.016	0.020
A	Amplia	0.010	0.014	0.020	0.030	0.040	0.050
B	Burda	0.020	0.032	0.050	0.060	0.080	0.100

Las tolerancias se fijan estudiando el dibujo de proyecto para determinar que las tolerancias funcionales sean dimensionales, de forma, de posición o de estado de superficie. La tolerancia funcional se considera al resultado obtenido para mantener entre dos límites bien definidos, un juego entre las dos superficies terminales, de un conjunto de varias piezas en contacto unas con las otras.

4.4.2 Determinación de ajustes.

De acuerdo a las funciones que las partes del dispositivo necesitan realizar se analizaron y se determinaron tres tipos de ajustes, los cuales se muestran en la tabla 4.18.

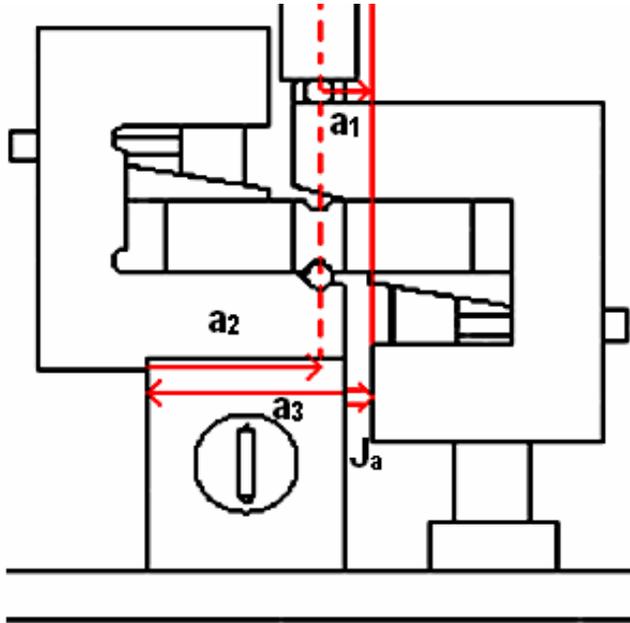
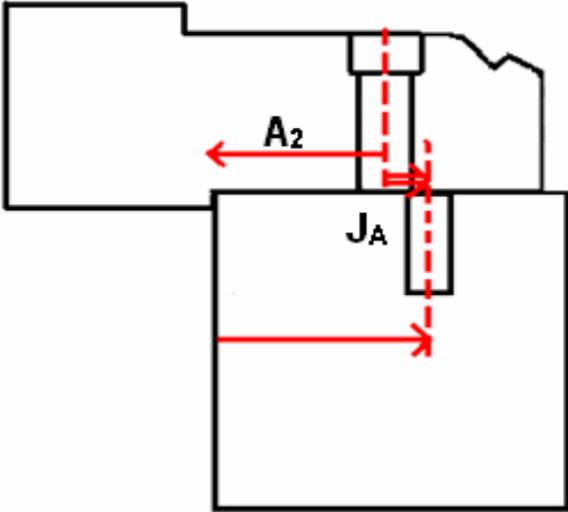
Tabla 4.18 Determinación de ajustes [4]

Tipo de ajuste	Descripción
	<p>Este tipo de ajuste es usado donde la exactitud de es de suma importancia y también para partes que requieren rigidez y alineamiento sin requerimientos especiales de presión, ni son utilizadas para transmisión de fuerzas de fricción, en nuestro caso se utilizó para mantener sujeto el poste de manera rígida y permitir el deslizamiento con la parte superior del dispositivo.</p>
	<p>El ajuste RC2 es utilizado debido a que se requiere una localización exacta, pero con este tipo de ajuste las piezas pueden moverse y girar pero no están pensadas para que las piezas corran libremente entre si, y en partes grandes este tipo de ajuste puede llegar a atorar las piezas con pequeños cambios de temperatura. El ajuste RC9 en cambio se eligió para que las piezas puedan correr libremente entre si.</p>
	<p>Entre las dos calzas que servirán para sujetar la probeta se utiliza un ajuste RC3, ya que este tipo de ajuste es para deslizamientos precisos, y es el ajuste mas cerrado que puede esperarse que corra libremente, están pensados para trabajos de precisión a bajas velocidades y a baja presión; pero no son recomendables cuando se encuentren diferencias apreciables de temperatura.</p>

4.4.3 Determinación de cotas funcionales

Es necesario determinar los juegos funcionales (condición funcional) que implica el funcionamiento del dispositivo para poder identificar, en primera instancia, las cotas de las cuales dependen y posteriormente distribuir las tolerancias de manera racional, a las cotas componentes. Para esto se identifican las cadenas de cotas para cada condición funcional, tal como se presenta en la tabla 4.19.

Tabla 4.19 Determinación de juegos funcionales

Juego funcional	Desarrollo
<p>1</p> 	$J_A = a_1 + a_2 - a_3$ $J_{A \max} = a_{1 \max} + a_{2 \max} - a_{3 \min}$ $J_{A \min} = a_{1 \min} + a_{2 \min} - a_{3 \max}$ $J_{A \max} = 0.503 + 1.629 + 1.921 = 0.211$ $J_{A \min} = 0.497 + 1.621 + 1.929 = 0.189$
<p>2</p> 	$J_A = A_1 - A_2$ $A_1 = A_2$ $A_2 = \frac{1.929}{2} = 0.9645^{+0.004}_0$

Continuación	
<p>3</p>	$J_b = l_6 - l_5 - dx$ $b_2 = b_7 + h(x)_6 + b_5$ $h(x)_6 = b_2 - b_7 - b_5$ $\tan \alpha = \frac{h(x)_6 - h_6}{dx}$ $dx = \frac{h(x)_6 - h_6}{\tan \alpha}$ $h_6 = b_6 - l_6 \tan \alpha$ $dx = \frac{b_2 - b_7 - b_5 - h_6}{\tan \alpha}$ $dx = \frac{b_2 - b_7 - b_5 - b_6 + l_6 \tan \alpha}{\tan \alpha}$ $J_b = l_6 - l_5 - dx$ $J_b = l_6 - l_5 - \left(\frac{b_2 - b_7 - b_5 - b_6 + l_6 \tan \alpha}{\tan \alpha} \right)$ $J_b = -l_5 - \left(\frac{b_2 - b_7 - b_5 - b_6}{\tan \alpha} \right)$ $J_b = -l_5 - \left(\frac{b_2 - b_7 - b_5 - b_6}{\tan \alpha} \right)$ $J_b = \frac{+b_7 + b_5 + b_6 - b_2}{\tan \alpha} - l_5$ $J_{b\max} = \left(\frac{+b_{7\max} + b_{5\max} + b_{6\max} - b_{2\min}}{\tan \alpha} \right) - l_{5\min}$ $J_{b\min} = \left(\frac{+b_{7\min} + b_{5\min} + b_{6\min} - b_{2\max}}{\tan \alpha} \right) - l_{5\max}$

4.4.4 Determinación de tolerancias de forma y posición

Para la determinación de tolerancias de forma y posición, se utilizan las tablas 4.20 y 4.21, que muestran las guías para su selección, así como los diferentes tamaños de irregularidades a considerar.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Tabla 4.20 Codificación de las diferentes funciones de las superficies [3]

Superficie	Función		
	Referencia	Designación	Abreviatura
Con desplazamientos relativos	01	Rozamiento por deslizamiento	RD
	02	Rozamiento por rodamiento	RR
	03	Resistencia al aplastamiento	RA
	04	Rozamiento lubricado	RL
	05	Hermeticidad dinámica	HD
Con ensamblado fijo	06	Hermeticidad estática	HE
	07	Ensamblado fijo	EF
	08	Ensamblado fijo sometido a esfuerzos	EE
	09	Adherencia (pegado)	AD
Sin esfuerzos	10	Depósito electrolítico	DE
	11	Verificación	VE
	12	Recubrimiento (pintura)	RE
Con esfuerzos	13	Resistencia a los esfuerzos alternos	EA
	14	Corte de viruta	CV

4.4.5 Elección de materiales

Para la selección de materiales no se utilizó un método determinado, sino que se consultó con distintos especialistas en la materia, los cuales coincidieron e opiniones al elegir un acero AISI 4140 TT o bien un acero AISI 9840, debido a las características que estos materiales presentan, mostradas en la tabla 4.22 y 4.23 respectivamente.

Tabla 4.22 Características del acero AISI 4140[5]

ACERO AISI 4140	
Tipo:	Acero de baja aleación al cromo-molibdeno.
Formas y Acabados:	Barra redonda, cuadrada, hexagonal y solera laminadas o forjadas en caliente, peladas o maquinadas, barra hueca, placa laminada caliente, discos.
Características:	Acero de baja aleación, con un espectro amplio de propiedades útiles, con relación a su bajo costo. Al templearlo se logra muy buena dureza con una gran penetración de la misma, teniendo además un comportamiento muy homogéneo, con buenas características de estabilidad en caliente hasta 400°C. Es un material sin fragilidad de revenido, muy versátil y apto para esfuerzos de fatiga y torsión. Tiene también una buena resistencia al desgaste.
Aplicaciones:	Se emplea en cigüeñales, engranes, ejes, mesas rotatorias, bielas, pernos, válvulas y ruedas dentadas, piezas forjadas, como herramienta, llaves de mano y destornilladores, espárragos, árboles de levas, flechas de mecanismos hidráulicos, etc. Se usa también para espárragos y tornillos que trabajan a temperatura entre 150°C y 300°C.

Tabla 4.23 Características del acero AISI 9840[5]

ACERO AISI 9840	
Tipo:	Acero de baja aleación al níquel-cromo-molibdeno.
Formas y Acabados:	Barra redonda, cuadrada, hexagonal y solera laminadas o forjadas en caliente, peladas o maquinadas, Placa laminada caliente.
Características:	Por tener un nivel de aleación más bajo que el 4340, tiene mayor tenacidad aunque alcanza al templearse durezas elevadas con una alta penetración, así como una magnífica resistencia a la fatiga.
Aplicaciones:	Ampliamente utilizado en la industria automotriz, en piezas sujetas a grandes esfuerzos, como flechas de transmisión y engranes, así como en pernos de alta resistencia y dispositivos de perforación. En la industria petrolera, es tratado con una resistencia de 105 kg /mm ² , para piezas que deban soportar fatiga.

4.4.6 Dibujos de fabricación

En la figura 4.20 es posible apreciar la manera en que se acoplan las piezas en el dispositivo, es decir, el ensamble del dispositivo de manera general. De esta manera es como el dispositivo será montado en la máquina de ensayos mecánicos.

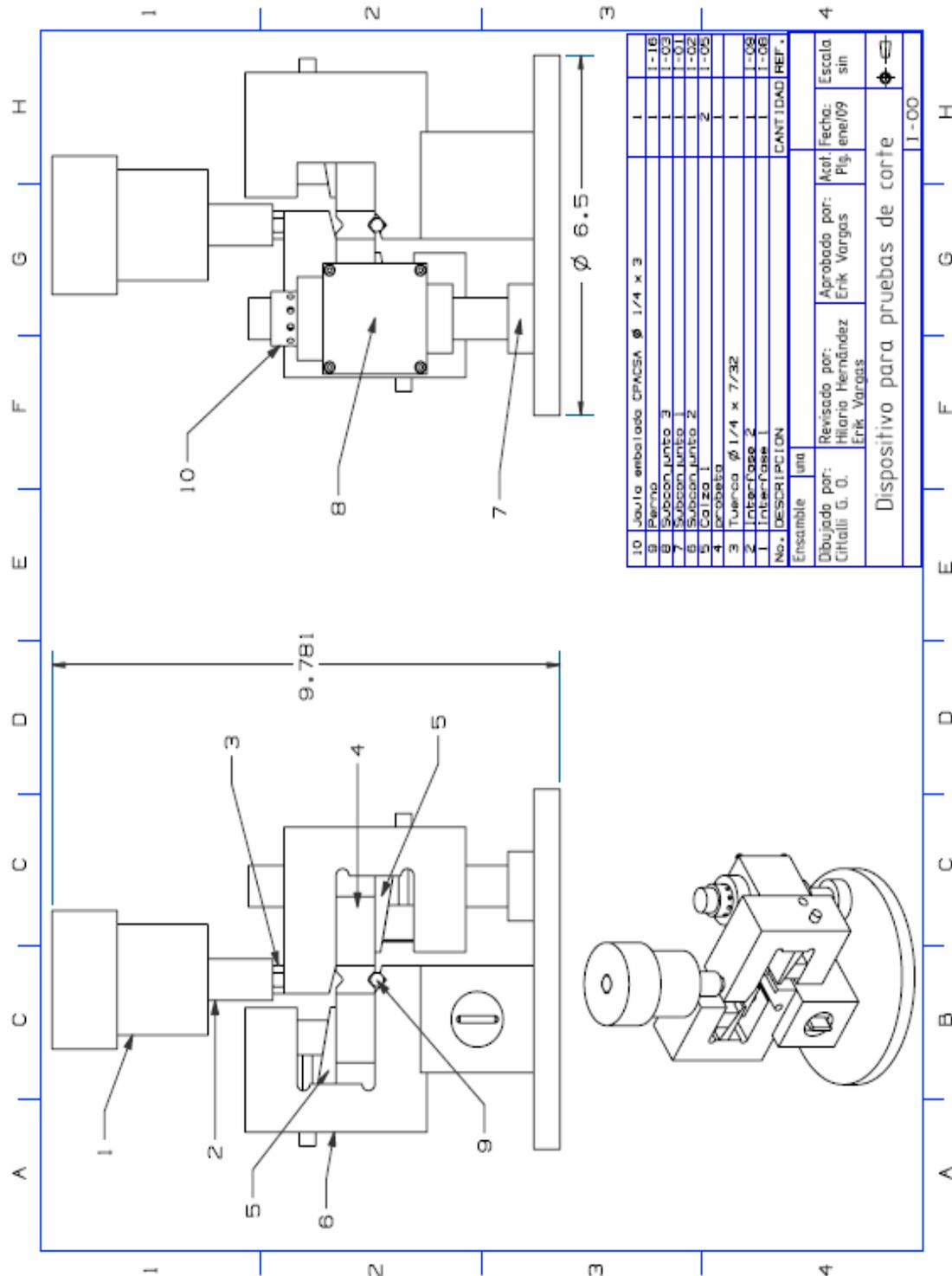


Figura 4.20 Ensamble del dispositivo

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

A continuación se muestra en la figura 4.21, el sub-ensamble número 1, el cual cumple la función de servir como guía a la parte superior del dispositivo al deslizar en el poste. Fue necesario añadir un componente que diera mayor apoyo al poste, así que fue agregada la pieza a la cual se llama ensamblador.

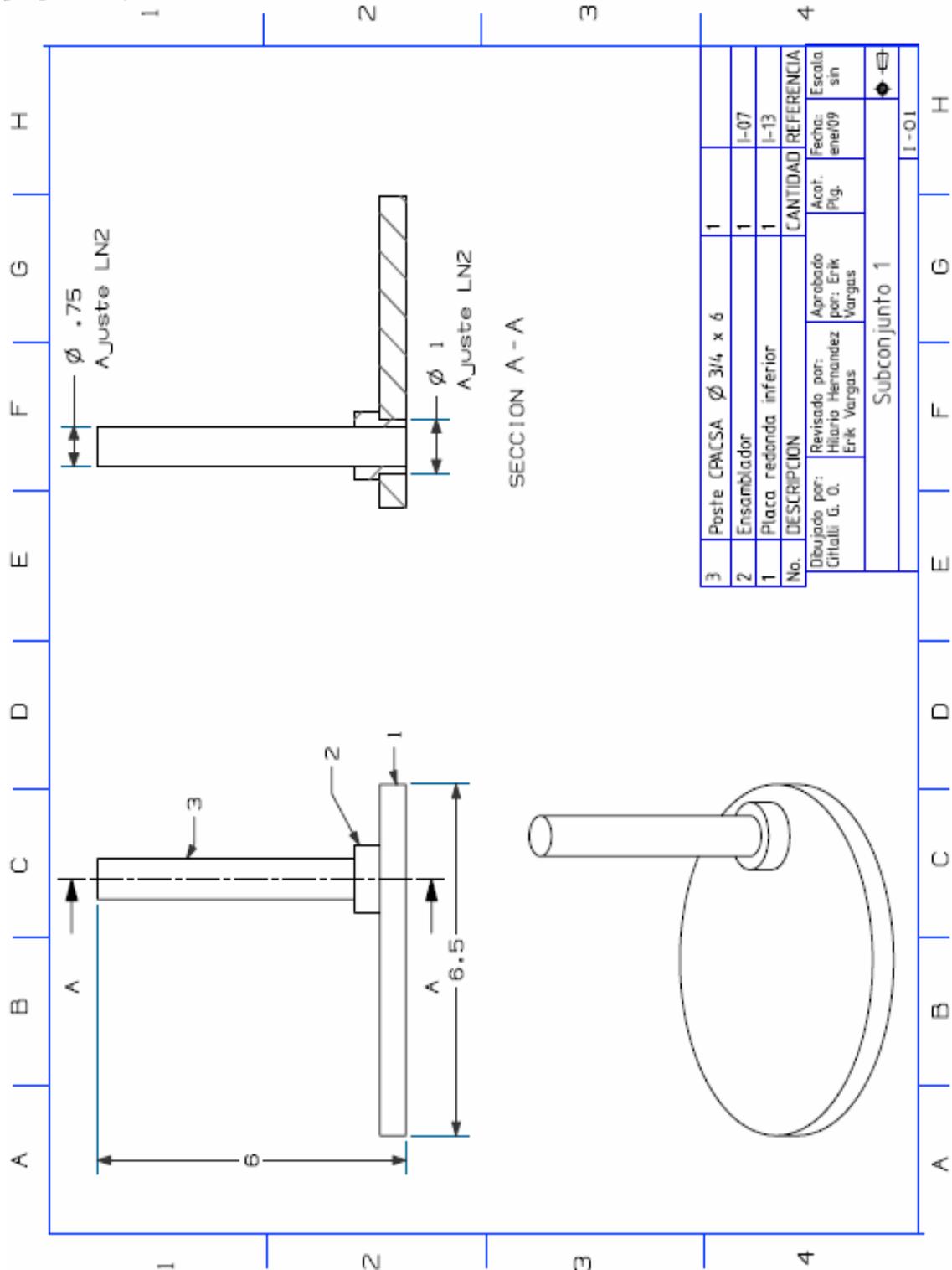


Figura 4.21 Sub-ensamble 1

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

En la figura 4.22, es mostrada la manera en que la base magnética y la parte inferior del dispositivo se unen, asimismo exhibe el ensamble entre las calzas encargadas de sujetar la probeta, las cuales están hechas de acero 4140 tratadas térmicamente y se mueven mediante un tornillo Allen que permite ajustar hasta obtener el apriete requerido.

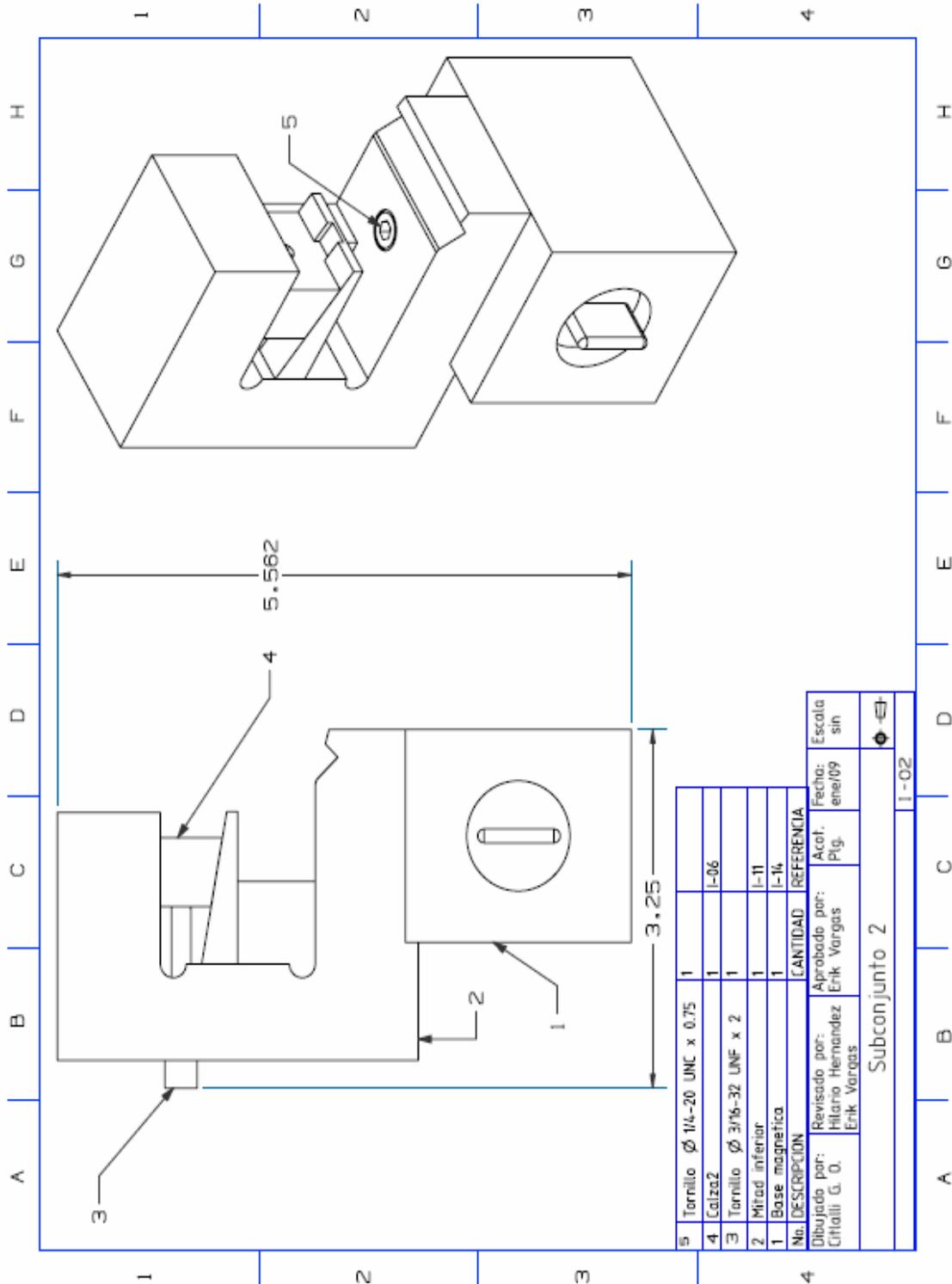


Figura 4.22 Sub-ensamble 2

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

A continuación, en la figura 4.23 se muestra, el tercer ensamble que incluye los elementos de la parte superior del dispositivo. En esta figura es posible observar el agujero lateral que sirve de referencia para alinear la parte superior del dispositivo con la parte inferior; mientras que el agujero roscado de la parte superior se une a la interfase que conectará el dispositivo con la máquina de ensayos universales.

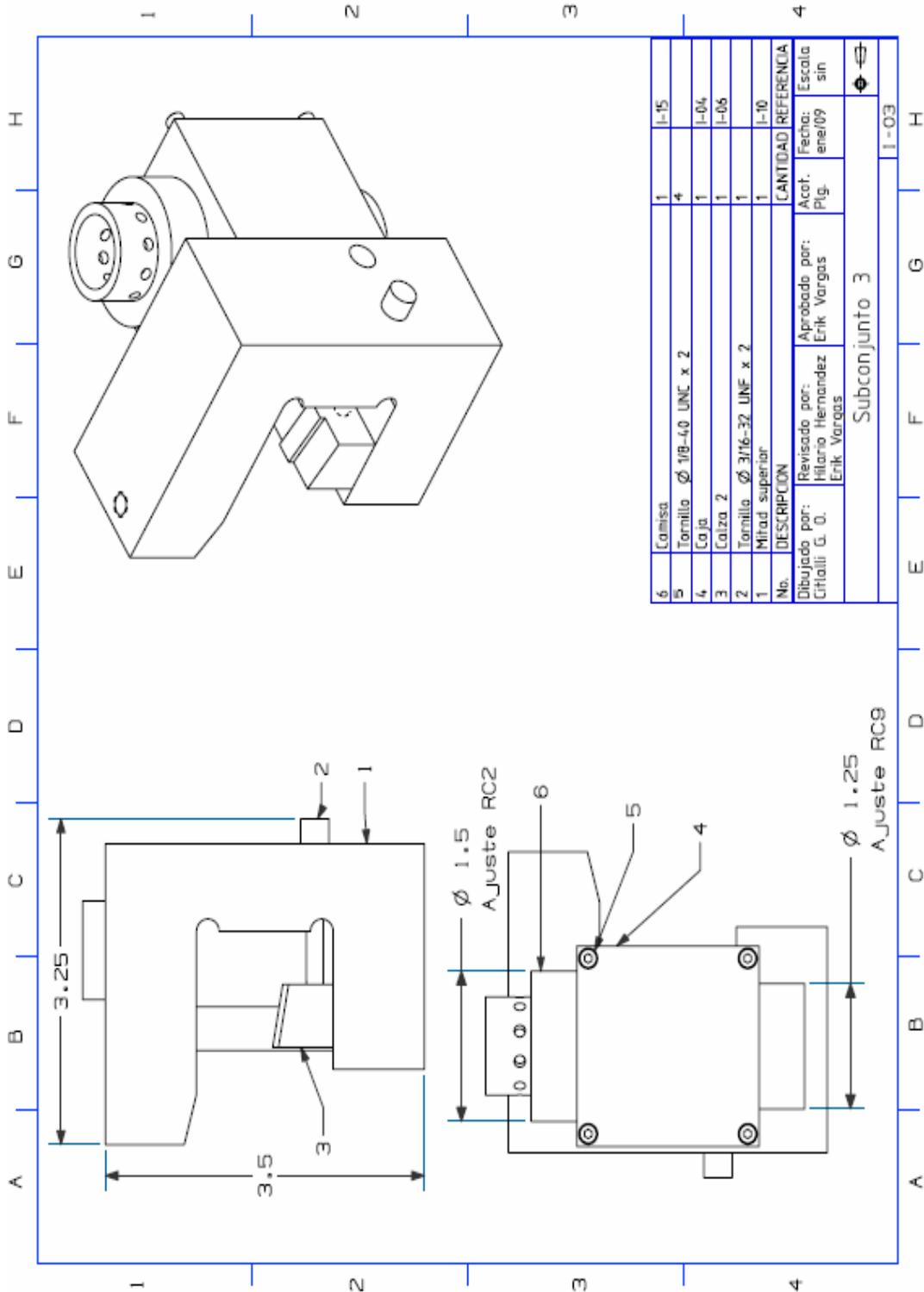


Figura 4.23 Sub-ensamble 3

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

En la figura 4.24, se muestra a detalle las especificaciones necesarias para que sea posible la fabricación de la pieza tal y como se desea, es decir, que se especifican tolerancias dimensionales, geométricas y condiciones de rugosidad que la pieza requiere para tener un correcto funcionamiento.

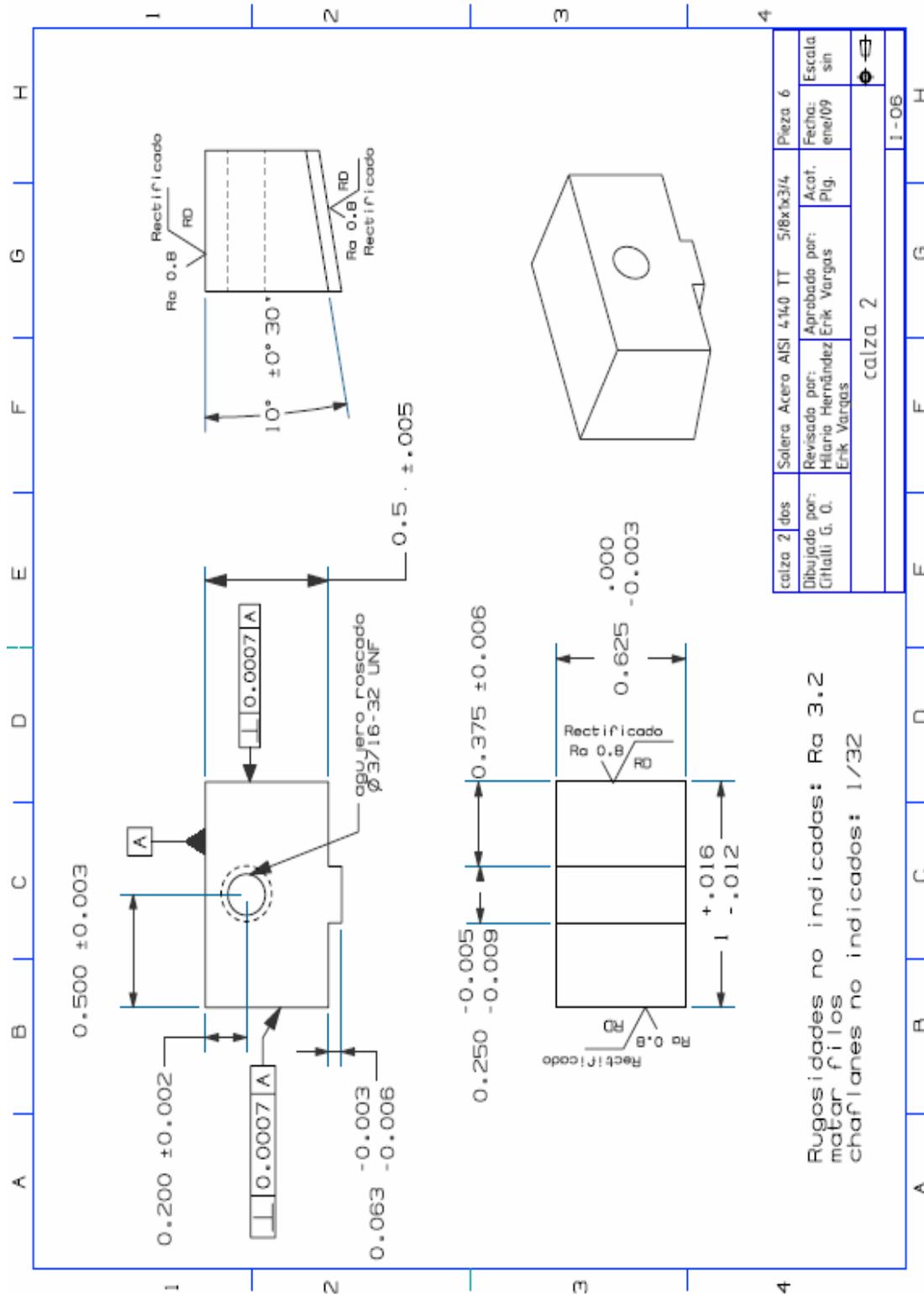


Figura 4.24 Pieza No. 06 "Calza 2"

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Al igual que en la imagen anterior, en la figura 4.25 se muestran especificaciones con respecto a la fabricación de la pieza, la cual formará parte del sub-ensamble no. 3. Esta pieza tiene una función primordial, ya que se desliza con respecto a la parte superior y es necesario que cumpla las condiciones geométricas especificadas y evitar torcimiento al momento de realización la prueba.

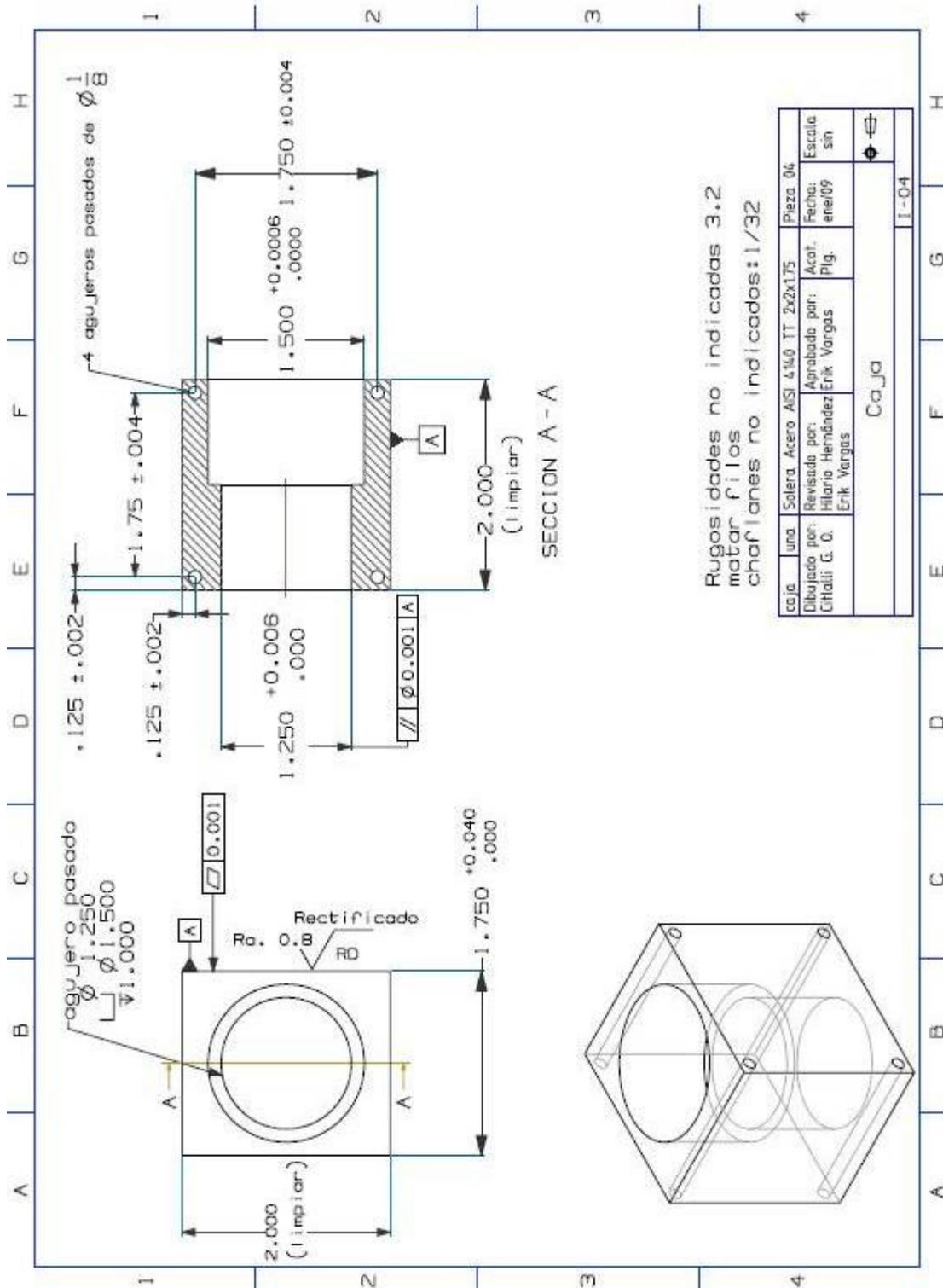


Figura 4.25 Pieza No. 04 "Caja"

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

La pieza mostrada en la figura 4.26, como se comentó anteriormente, se agregó para dar un mayor apoyo y rigidez al poste que servirá de guía durante el deslizamiento entre las dos partes del dispositivo, y de esta manera no tener que agregar una mayor cantidad de material innecesario a la base (Placa redonda inferior) mostrada en la figura 4.21.

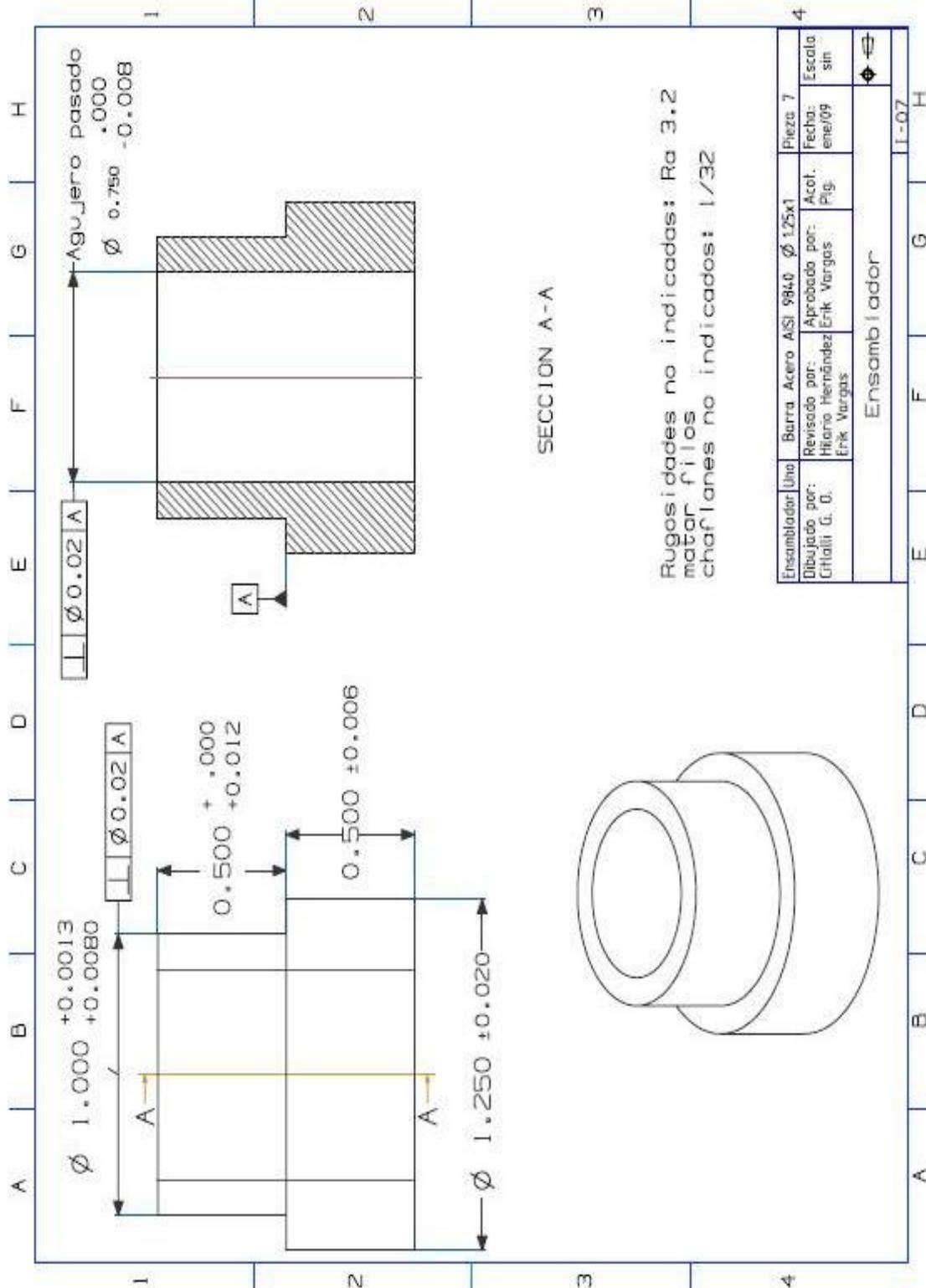


Figura 4.26 Pieza No. 07 “Ensamblador”

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

4.5 FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO

Las siguientes imágenes (Figura4.26 –Figura4.30) muestran algunas de las máquinas y herramientas utilizadas para la fabricación del dispositivo.



Figura 4.27 Vista general del torno utilizado para maquinarse las piezas de revolución del dispositivo.



Figura 4.28 Operario durante la fabricación de alguna de las piezas utilizando el torno.



Figura 4.29 Vista general del taller de fabricación de dispositivo.



Figura 4.30 Vista general de la parte trasera del taller de fabricación del dispositivo.



Figura 4.31 Operario durante la fabricación de alguna de las piezas en la fresadora.



Figura 4.32 Detalle de la pantalla digital que permite acabados con mayor precisión.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Después de varios cambios durante el proceso de diseño, es posible observar el resultado. Las siguientes figuras (4.33-4.39) muestran las diferentes vistas del dispositivo fabricado y es posible también observar los detalles del mismo.



Figura 4.33 Subconjunto 1



Figura 4.34 Subconjunto 2



Figura 4.35 Subconjunto 3



Figura 4.36 Vista frontal del dispositivo con probeta

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”



Figura 4.37 Vista isométrica del dispositivo



Figura 4.38 Vista trasera del dispositivo

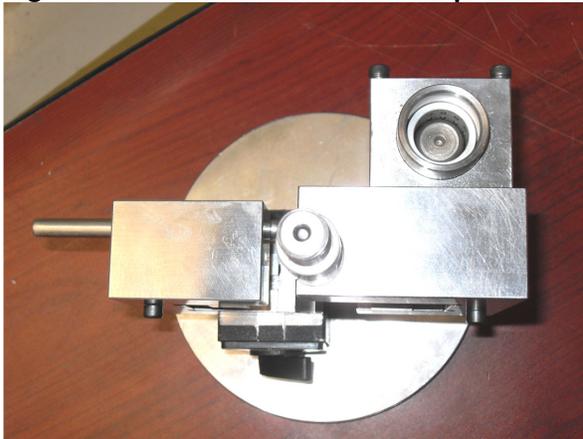


Figura 4.39 Vista superior del dispositivo

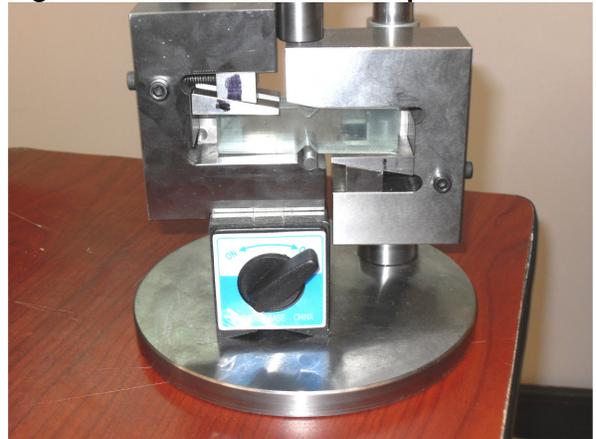


Figura 4.40 Detalle del perno utilizado para alinear la probeta

Referencias

- [1] Saaty, Thomas L. “Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process”. RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)
- [2] Bourthoumieu, Camus, Madier. “*Estudio de un distribuidor automático*” Limusa, Noriega editores. Colección la microempresa. Serie Un proyecto Técnico. México, D. F.
- [3] Ramos Watanave, Villanueva Pruneda. “*Manual de métodos de fabricación metalmeccánica*” A.G.T. Editor, S.A. 4ª. Edición. México D. F.
- [4] Oberg Erik, Jones Franklin, et. Al. “*Machinery’s Handbook*” 27th Edition. Industrial Press Inc. New York. 2004.
- [5] Grupo Palmexico. “Acero maquinaria-4140 y acero maquinaria-4140” disponible en [www. Acerospalmexico.com.mx](http://www.Acerospalmexico.com.mx)
- [6] Badel Pierre, Vidal-Sallé Emmanuelle, Boisse Philippe. “*Computational determination of in plane shear mechanical behavior of textile composite reinforcements*” France. 2007.
- [7] ASTM Standards and Literature References for Composite Materials, 2nd Ed. 1990. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA.
- [8] Vargas, E. et al. “Dispositivos para caracterización mecánica de laminados fabricados con materiales compuestos de matriz plástica”.
- [9] MIL-HDBK-17-1E. 6.7.6.2 “In plane shear methods”. Department of defense handbook. Polymer matrix composites. Vol. 1 guidelines for characterization of structural materials.
- [10] Nicolaie Iosipescu, et. Al. “*Method and apparatus for pure shear testing of rocks and other building materials*”. United States Patent Office. Bucharest, Rumania.
- [11] Neumeister, Jonas. Melin, Niklas. “*A modified Iosipescu test for anisotropic panels*”. Department of solids mechanics, Royal Institute of technology.
- [12] Vargas, E. et al. “Establecimiento de las metas de diseño para un dispositivo de caracterización mecánica con presión hidráulica de probetas cilíndricas”.

CAPÍTULO 5: DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se describe el proceso que se utilizó en el desarrollo de las pruebas de caracterización mecánica en corte, utilizando la metodología que se basa en los procedimientos de la norma ASTM 5379, con el dispositivo que se diseñó para este fin. Se describen los materiales y los instrumentos utilizados durante las pruebas.

Se analiza los datos obtenidos de las pruebas, se realizan las gráficas de esfuerzo-deformación con el objetivo de analizarlas, para posteriormente, obtener las propiedades en corte de las probetas ensayadas, validando de esta manera el funcionamiento del dispositivo de corte desarrollado.

5.1 DATOS GENERALES

Una vez diseñado y construido el dispositivo de corte, se realizan varias pruebas de funcionamiento, estas comprenden la instalación en el ambiente real de trabajo, es decir instalación en la máquina de ensayos mecánicos, comprobación cinemática de su correcto funcionamiento, ajustes finales a los elementos componentes. Una vez realizadas estas pruebas, se puede pasar a la realización de los ensayos de caracterización de los materiales previstos, estos se realizan siguiendo el método de prueba normalizado.

Las pruebas realizadas para la determinación de las propiedades en corte de las probetas de material compuesto, se hicieron bajo las especificaciones dadas en la norma ASTM D5379 [1], dentro del laboratorio de ensaye de materiales de la ESIME Ticomán. Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente (23 °C y 50% de humedad relativa).

Para tal efecto, fue necesario utilizar la máquina de ensayos universales Instron 8502. (Cuyas características son mostradas en la tabla 5.1). La prueba fue programada para realizarse a una velocidad de 2mm/min.

Tabla 5.1 Características de la máquina de ensayos universales Instron modelo 8502 [2-4]

Característica	Descripción
Medio de aplicación de carga	Control de deformación, carga o posición a velocidad constante usando un cilindro hidráulico
Capacidad de carga	500 KN en condiciones estáticas; 250 KN en condiciones cíclicas
Unidad de potencia hidráulica para el circuito de las mordazas	
Bomba hidráulica	OTC, bomba de dos velocidades
Presión hidráulica máxima	68 MPa (10 000 lb/plg ²)
Aceite hidráulico	Instron Part No. 105-1-1051 (reemplazo total Mobil DTE-26)
Cantidad de aceite	7.6 l (2 galones US)
Unidad de potencia hidráulica para el cilindro hidráulico	
Bomba hidráulica	De dientes de engrane, hidrodinámica, sumergida
Presión hidráulica máxima	20.7 MPa (3 000 lb/plg ²)
Gasto	10 g/min (37.85 l/min)
Aceite hidráulico	Mobil DTE-25
Cantidad de aceite	136 l (36 galones US)

Se realizaron dos pruebas para determinar las propiedades en corte; cabe mencionar que las probetas ensayadas fueron obtenidas a partir del corte de segmentos de fuselaje real de la aeronave STELA M1, los cuales fueron requeridos para el trabajo de tesis del Ing. Diego Camarena Arellano [5], Dichas probetas fueron obtenidas por corte utilizando la técnica de chorro de agua en las instalaciones de la empresa Polímeros y compuestos S.A. de C.V.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Las características de las probetas ensayadas son presentadas a continuación en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Características de las probetas ensayadas.

Característica	Probeta 1	Probeta 2
Material	Resina Epóxica y fibra de vidrio	Resina Epóxica y fibra de carbono
Ancho	20.01 mm	20mm
Largo	76.1mm	76mm
Espesor	1.6 mm	5.9mm
Distancia entre muescas	12mm	12mm
Área de la sección de prueba	17.6mm ²	70.8mm ²

Las probetas ensayadas se muestran en la figura 5.1 y 5.2 en donde es posible observar su configuración geométrica y el material con que están fabricadas. Se ensayaron dos materiales, el primero es epóxico con fibra de vidrio, el segundo material ensayado es de epóxico reforzado con fibra de carbono, el cual constituye el material real en la zona de fuselaje-montante-tren de aterrizaje de la aeronave STELA M1. Una fotografía de cada probeta se presenta en las figuras 5.1 y 5.2.



Figura 5.1 Probeta de fibra de vidrio



Figura 5.2 Probeta de fibra de carbono

Para la primer probeta se fabricó una lámina de material compuesto de fibra de vidrio tipo petatillo 600, tejida bidireccionalmente usando dos telas orientadas a 0°/90°, en las que se utilizaron 125 gr de resina epóxica con 10% de catalizador, teniendo como valor de densidad de la resina 1.197 gr/cm³, mientras que la densidad de la fibra de vidrio es de 2.6 gr/cm³ [6].

El laminado se fabricó de acuerdo al método de bolsa al vacío para simular los procesos utilizados en la fabricación de los componentes de la aeronave Stela M1. Inicialmente, se limpia una placa de vidrio para dar soporte al sistema y un acabado liso al laminado; a continuación se coloca una hoja de papel mylar que sirve como desmoldante sobre el que se colocan las láminas de fibra de vidrio que son posteriormente impregnadas de resina epóxica. Para permitir el paso de resina excedente se coloca una hoja de PVC agujerada, luego se acomoda algún material que absorba el exceso de resina y una hoja de mylar que impida el flujo de la resina. Finalmente se usa una capa de tela de fieltro y se cierra el sistema en la periferia por medio de una hoja de plástico transparente y un material sellante. Se conecta la bolsa por medio de una manguera a una bomba generadora de vacío; para este material el vacío se mantuvo por tres horas continuas [6].

La segunda probeta se obtuvo de la muestra de una parte de fuselaje de la aeronave Stela M1, proporcionada al LEM por parte de la empresa Aeromarmi, de acuerdo con

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

un estudio microscópico se determinó que el número de capas era de 7 orientadas a 0°/90°. Al igual que la primera probeta, se cortó de acuerdo a las dimensiones requeridas por la norma ASTM 5379, mediante el método de proyección de chorro de agua, debido a la complejidad de la geometría de la probeta, difícilmente bien lograda por medio de otros métodos de maquinado.

El corte mediante proyección de chorro abrasivo de agua está especialmente indicado para materiales no homogéneos que tienen naturaleza abrasiva y que por tanto tienden a dañar las herramientas de corte, o para aquellos materiales que no soportan las altas temperaturas cuando se usan métodos convencionales, además se tiene la ventaja de cortar formas complejas.

El principio de este tipo de corte parte de la proyección del flujo de agua a una presión superior a los 410 MPa, que se hace pasar a través de un orificio de entre 0.8 y 7.6 mm de diámetro para formar el chorro a presión que produce el corte del material. El sistema de corte abrasivo permite el corte de cualquier tipo de material pero es más frecuentemente usado para materiales de alta densidad, especialmente para cualquier material metálico y prácticamente cualquier material compuesto [7].

La caracterización física no fue efectuada, dado que esa actividad ya ha sido anteriormente realizada por Camarena [6].

5.2 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS

El procedimiento llevado a cabo para realizar las pruebas de caracterización mecánica en corte de las láminas es el siguiente:

5.2.1 Preparación preliminar

1. Es necesario medir las dimensiones principales de las probetas para verificar que se encuentran dentro de tolerancia según la norma ASTM 5379.
2. Se calcula el área de la sección de prueba considerando la distancia entre las muescas y el espesor de cada una de las probetas.
3. La falla de la probeta debe mostrarse de uno a diez minutos después de iniciada la prueba, para lo cual es necesario ajustar la velocidad del desplazamiento de los cabezales de la máquina universal de ensayos a 2mm/min.
4. Debido a que las condiciones ambientales eran adecuadas para realizar las pruebas, no fue necesario realizar la prueba dentro de alguna cámara o ambiente especial.

5.2.2 Instalación del dispositivo

Esta prueba se realiza configurando la máquina de ensayos mecánicos de la misma manera que para un ensayo de compresión. Para la instalación del dispositivo es necesario seguir el procedimiento descrito a continuación:

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

1. Es necesario verificar el dispositivo antes de realizar las pruebas a fin de corregir cualquier deficiencia o realizar ajustes antes de realizar la prueba.
2. La parte superior del dispositivo es colocada y fijada a la parte superior de la máquina, mediante una interface, descrita en el capítulo anterior, la cual se puede observar en la figura 5.3.
3. La base del dispositivo se coloca sobre el plato de compresión de la máquina, que debe tener su superficie de manera perpendicular a la línea de acción de carga. El cabezal de la máquina se mueve de tal manera que el poste de la parte inferior del dispositivo deslice a través de la parte superior.
4. La parte inferior del dispositivo es movida con el propósito de que la superficie trasera de ambas mitades del dispositivo (mordazas), queden colocadas de manera coplanar, con el fin de que la probeta se sujete de forma adecuada, es necesario mover los cabezales hasta que los agujeros ubicados en la parte lateral de las dos partes del dispositivo coincidan. Una vez hecho esto, se utiliza el perno de alineamiento que pasará a través de los agujeros para asegurar la correcta alineación de la parte inferior del dispositivo con respecto a la parte superior.

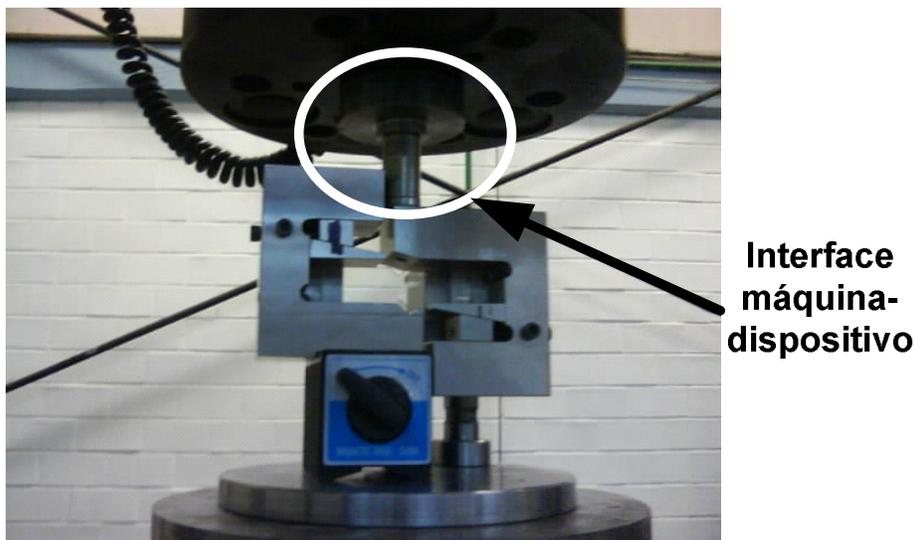


Figura 5.3 alineación de la parte superior e inferior del dispositivo

5. Una vez alineada la parte inferior, se fija su posición mediante la base magnética, únicamente activándola. Una vez hecho esto, el perno de alineamiento es retirado y la parte inferior se baja para permitir la colocación de la probeta.
6. Se verifica que la celda de carga se encuentre calibrada y la carga indique cero en la pantalla de la máquina.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

7. Las mordazas deben colocarse de tal manera que permita la inserción de la probeta de manera holgada y posteriormente, se coloca el perno de alineamiento de la probeta, el cual es un pequeño perno que se inserta en el espacio colocado en la muesca de la parte inferior del dispositivo (Véase la figura 5.3).

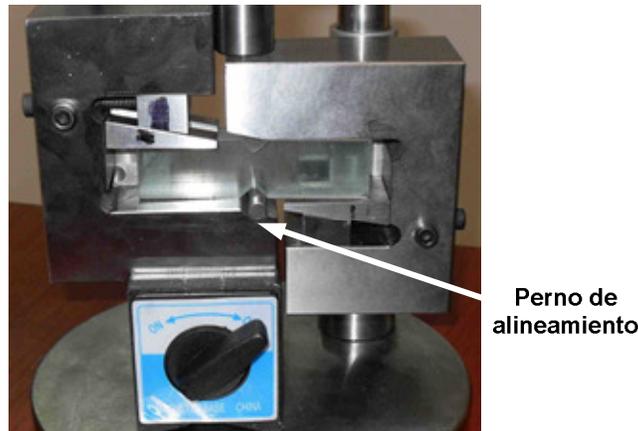


Figura 5.4 Detalle de la colocación del perno de alineamiento para la probeta

8. Posteriormente se coloca la probeta de manera holgada entre las dos partes del dispositivo, presionando la parte delantera de la probeta hasta que quede apoyada con la pared de referencia trasera de las mordazas, mientras permanece alineada con el perno de alineamiento de la probeta.
9. Mientras se mantiene la probeta centrada, se aprieta ligeramente la calza de la parte inferior, cuidando de no inducir carga o dañar el material. La parte superior del dispositivo y sus mordazas deben permanecer en una posición que permita tener un claro con respecto a la probeta.
10. La parte superior del dispositivo es movida hacia abajo, hasta que su superficie interna superior haga contacto con la superficie superior derecha de la probeta y se fija esa posición, cuidando no sobrecargar la probeta. La precarga de la probeta debe ser minimizada en lo posible, pero es inevitable la obtención de entre 40 y 80N, antes de iniciada la prueba.
11. Se verifica el posicionamiento de la probeta, la cual debe estar centrada en el dispositivo, de tal manera que la línea de acción de carga, actúa directamente a través del centro de las muescas del espécimen, hasta entonces la probeta esta lista para iniciar la prueba.
12. Se aplica la carga al espécimen a la velocidad indicada anteriormente, mientras se van registrando automáticamente los datos arrojados por la máquina de ensayos universales con una frecuencia de muestreo constante.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

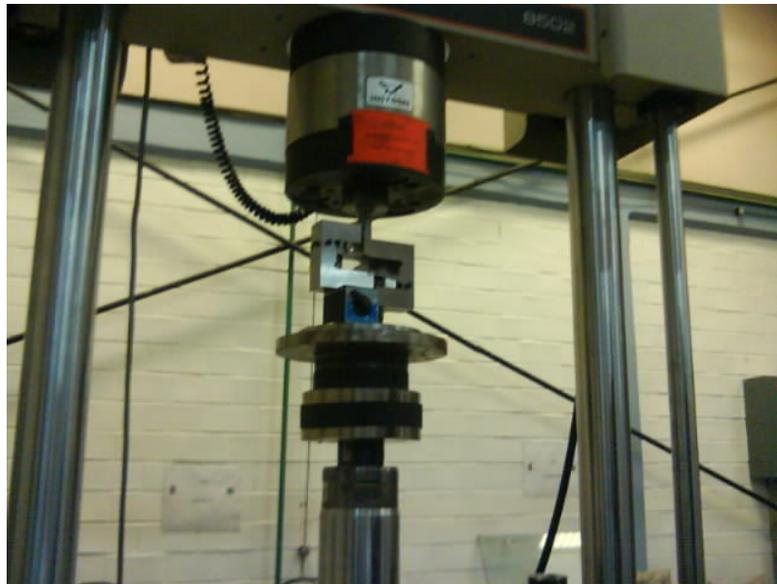


Figura 5.5 Dispositivo instalado en la máquina de ensayos universales Instron

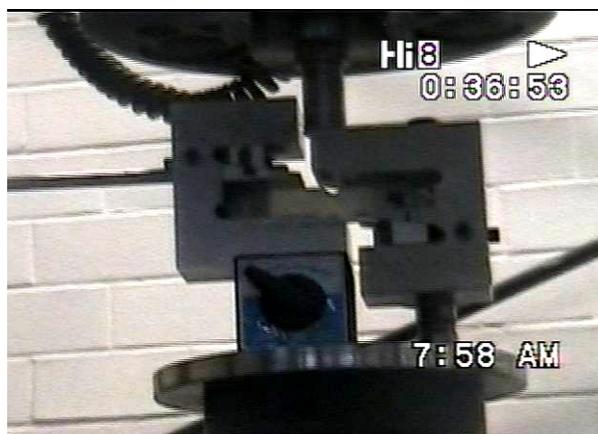


Figura 5.6 Ensayo de la probeta de fibra de vidrio

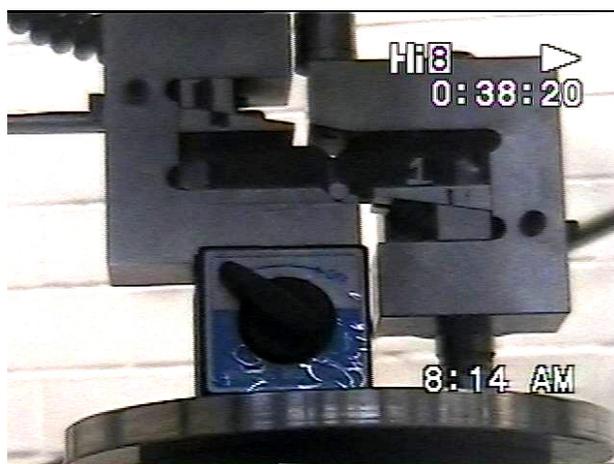


Figura 5.7 Ensayo de la probeta de fibra de carbono

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Durante la prueba de fibra de carbono fue posible observar el momento de la falla de la probeta debido a que el cambio de coloración del material, lo hizo más notorio, justo en el lugar en donde se esperaba que la probeta fallará, esto es, a través de la línea entre las muescas, como se puede apreciar en la figura 5.7. Es necesario observar el modo de falla y se comparan con los modos de falla tipo que se encuentran establecidos en la norma ASTM D 5379 [1] (Véanse las figuras 5.4-5.6).

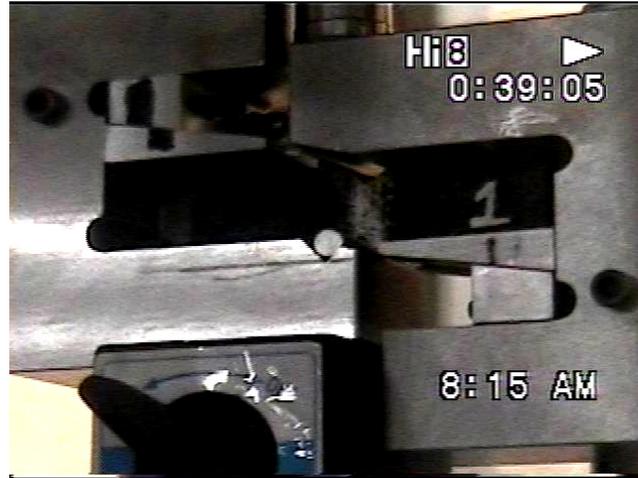


Figura 5.8 Detalle del momento de la falla de la fibra de carbono

5.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

De los datos arrojados por la máquina se obtuvo la grafica de la carga aplicada con respecto al, desplazamiento, para cada una de las probetas, las cuales se muestran en la figuras 5.8 y 5.9.

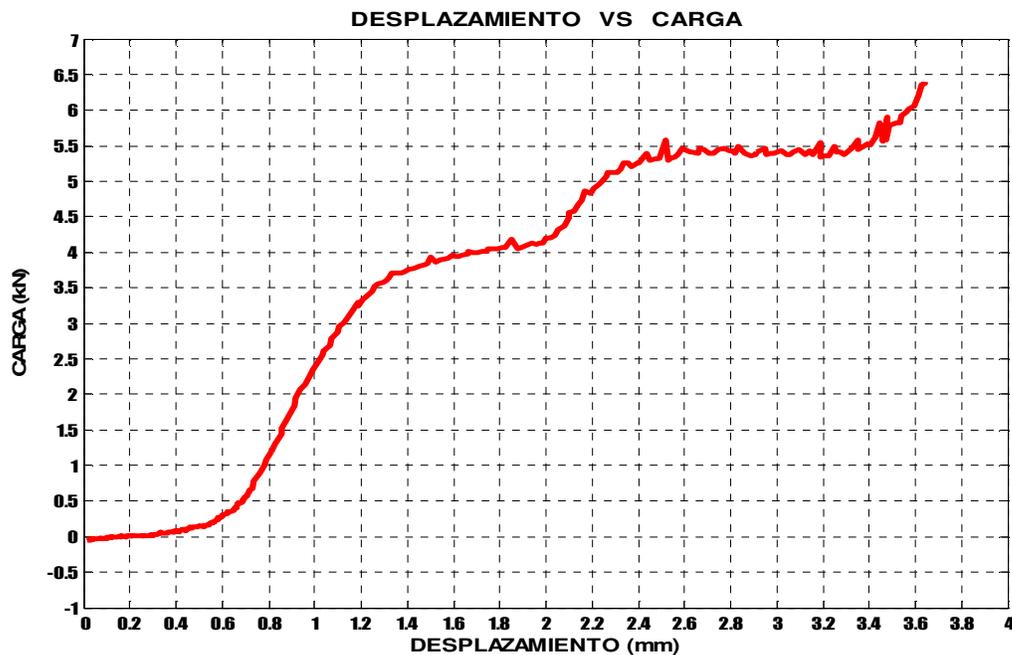


Figura 5.9 Gráfica carga vs desplazamiento para la probeta de fibra de carbono

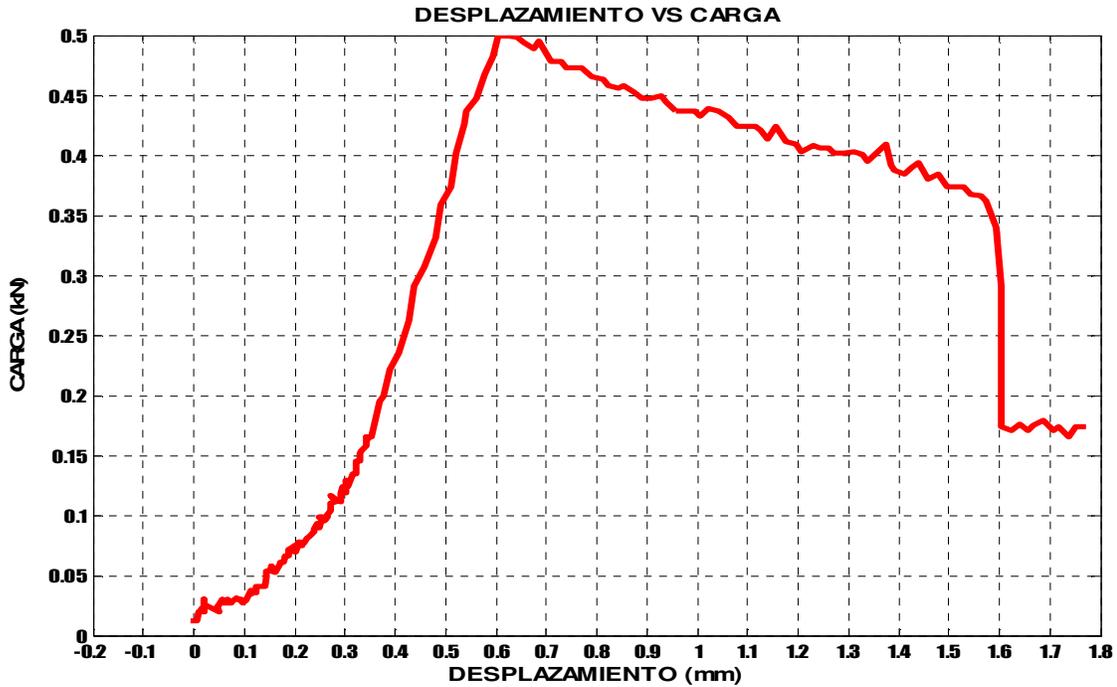


Figura 5.10 Gráfica carga vs desplazamiento para la probeta de fibra de vidrio

Se presentaron ciertos fenómenos al momento de realización de los ensayos, primeramente la probeta de fibra de vidrio tuvo un ligero torcimiento, mientras que la probeta de fibra de carbono se vio afectada por las limitaciones geométricas del dispositivo, esto último es completamente normal que se presente debido a las grandes deformaciones angulares que se presentan en la probeta y las cuales están ampliamente documentadas tanto en la norma de referencia [1] como en otras fuentes [8], Las grandes de formaciones angulares presentes provocan que se llegue al los límites cinemáticos del dispositivo, lo que tiene como efecto, un segundo aumento de la carga, como se puede apreciar en la gráfica de la figura 5.9, en donde se observa que a partir de aproximadamente 2 mm de desplazamiento, la carga fue en aumento.

Con la información arrojada por las pruebas realizadas fue posible obtener las gráficas esfuerzo vs deformación, mostradas en las figuras 5.10 y 5.11. En donde el esfuerzo cortante se obtiene dividiendo la carga registrada entre el área de la sección de prueba, así como la deformación angular se puede obtener dividiendo el desplazamiento registrado entre la distancia formada sobre el de la probeta entre las mordazas.

Para poder obtener el esfuerzo cortante máximo, y debido a que no es posible llegar hasta la ruptura en el ensayo, entonces, convencionalmente de acuerdo con el manual MIL-HDBK-17 [8], se traza una línea recta paralela a la recta elástica del diagrama esfuerzo cortante-deformación angular, pero desplazada 0.2%, la intersección de esta línea con el diagrama localiza al esfuerzo cortante máximo. Cabe mencionar, que la recta paralela en este caso es la mostrada en las gráficas con color azul.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

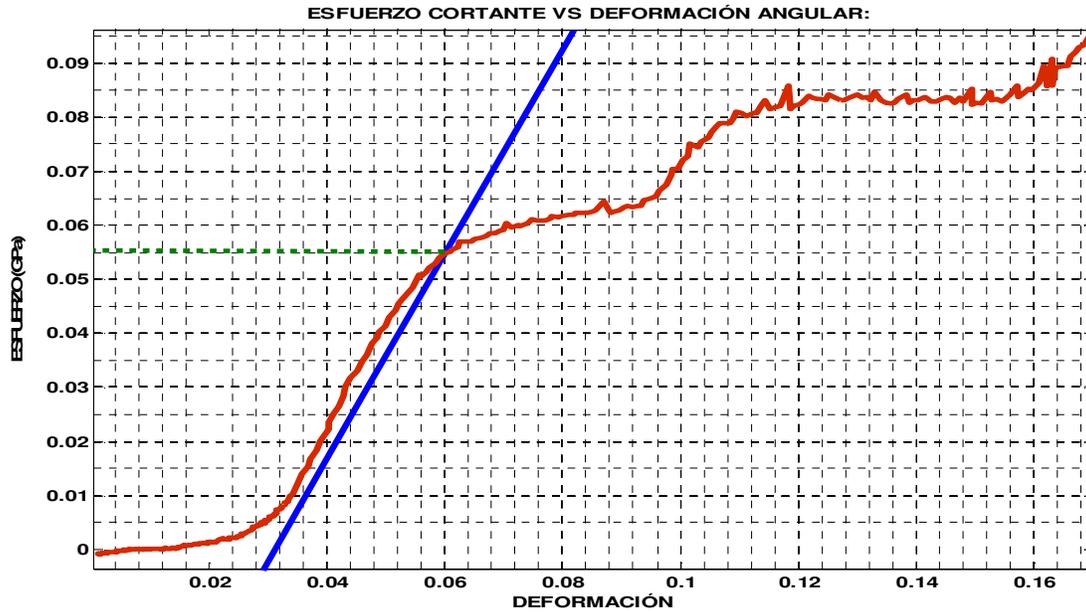


Figura 5.11 Gráfica esfuerzo-deformación para la probeta de fibra de carbono

Del análisis de la grafica 5.11, para la probeta de fibra de carbono, tomando la línea trazada al 2% de la original, se obtuvo la resistencia última al corte con valor de 0.056 kN/mm² (56 Mpa)

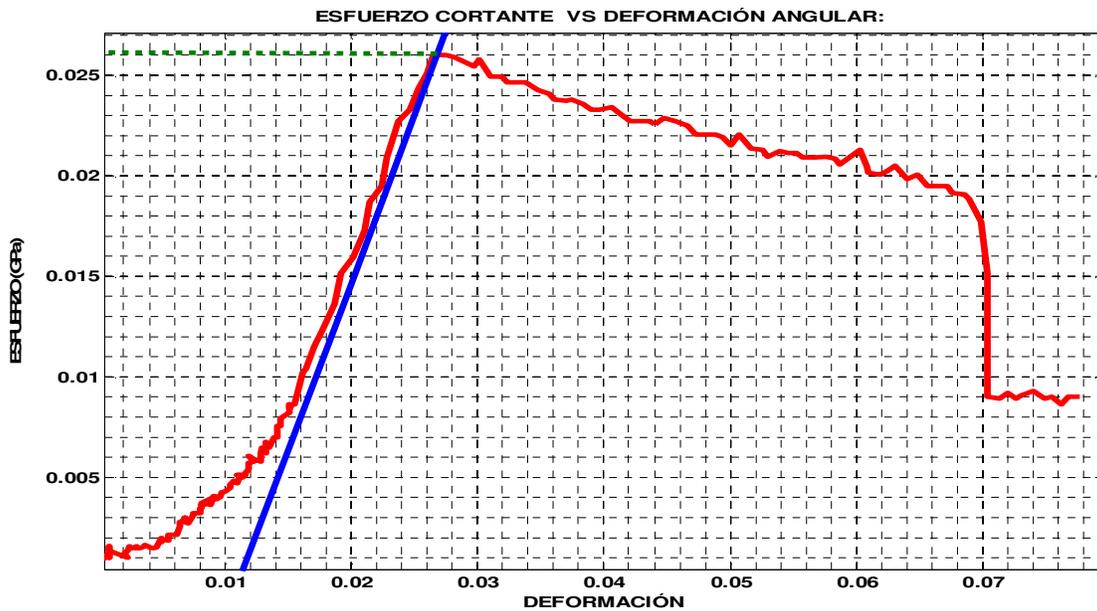


Figura 5.12 Gráfica esfuerzo-deformación para la probeta de fibra de vidrio

Del análisis de la grafica 5.12, para la probeta de fibra de vidrio, tomando la línea trazada al 2% de la original, se obtuvo la resistencia última al corte con valor de 0.026 kN/mm² (26 Mpa)

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Posteriormente se hace un arreglo a la parte lineal de la gráfica con el fin de obtener el módulo de elasticidad de la línea de corte, mostradas en las gráficas 5.13 y 5.14, haciendo una regresión lineal para ajustar los puntos y obtener la pendiente, la cual representa el dato que deseamos obtener.

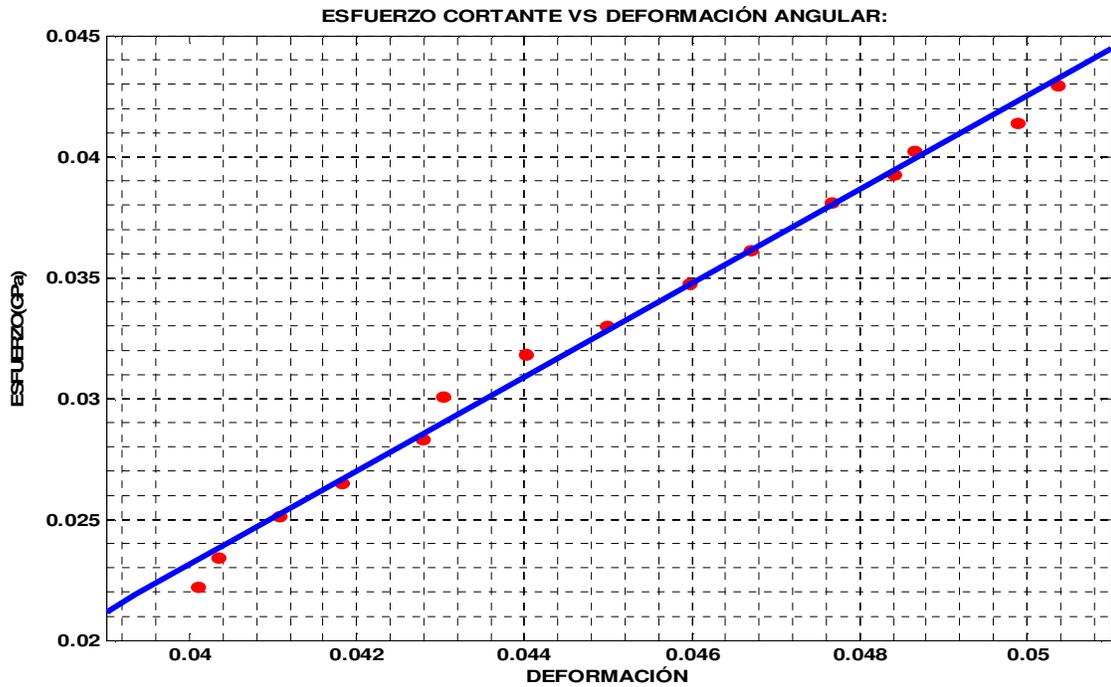


Figura 5.13 Gráfica de la región lineal para la probeta de fibra de carbono

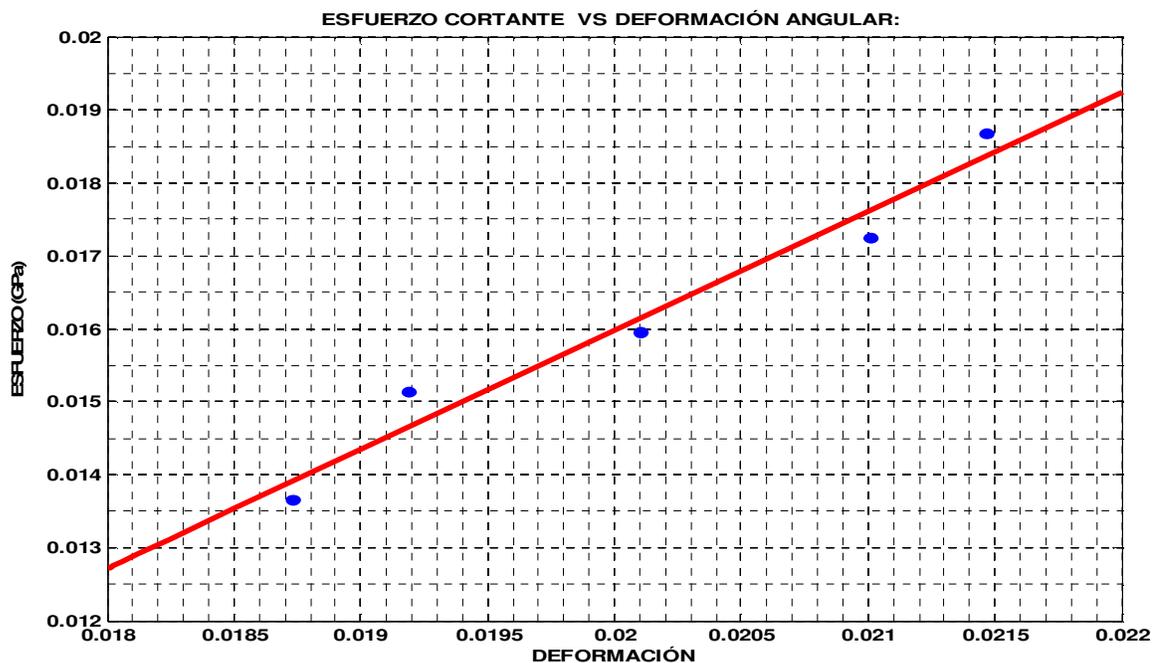


Figura 5.14 Gráfica de la región lineal para la probeta de fibra de vidrio

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos”

Del arreglo de regresión lineal de los datos de la gráfica 5.13 para la probeta de fibra de carbono, se pudo obtener la ecuación de la recta que fue la siguiente:

$$\tau_{ft}=(1.943\text{GPa})\gamma_{ft}-0.05461\text{Gpa}$$

Es decir, que el módulo de elasticidad de la línea de corte, de la probeta de fibra de carbono, es de 1.943 Gpa.

Para la probeta de fibra de vidrio, se aisló la región lineal de la gráfica esfuerzo-deformación y del arreglo de regresión lineal realizado, se obtuvo la gráfica presentada en la figura 5.14.

De manera análoga a la probeta de fibra de carbono, para la gráfica de fibra de vidrio, se la analizó la gráfica de arreglo de regresión lineal, para obtener la siguiente ecuación de la recta:

$$\tau_{ft}=(1.657\text{GPa})\gamma_{ft}-0.01838\text{Gpa}$$

Es decir, que el módulo de elasticidad de la línea de corte, de la probeta de fibra de vidrio, es de 1.657GPa.

En la tabla 5.3 se muestran la comparación de los resultados obtenidos, con respecto a los obtenidos en la literatura [5,9-11].

Tabla 5.3 Comparación de resultados

Comparación de resultados				
	Probeta de fibra de carbono		Probeta de fibra de vidrio	
	Resistencia última	Modulo cortante	Resistencia última	Modulo cortante
Dispositivo desarrollado	56 MPa	1.943Gpa	26MPa	1.657GPa
D.Gay [9]	55Mpa	4GPa		2.850GPa
J. M. Berthelot [10]				1.870GPa
D. Camarena [5]	59.52Mpa	6.592.07GPa		
H. Hernández et al.[11]			40.8MPa	2.039GPa

Como aclaraciones sobre los ensayos mecánicos se puede establecer que, los valores obtenidos de esfuerzos, es decir los esfuerzos cortantes máximos y la forma del diagrama esfuerzo cortante-deformación angular, se pueden considerar como representativos del material. Para el caso de los valores de la deformación, estos, son ligeramente inferiores a los que teóricamente se tendría que obtener. Esto último es debido a que normalmente se tendrían que utilizar galgas para la medición de la deformación. En este trabajo se no se utilizaron galgas debido a que no se contó con el equipo de extensometría, sin embargo, el desarrollo del dispositivo demostró su correcto funcionamiento y su efectiva capacidad para llevar a cabo el ensayo de corte.

La diferencia en los módulos cortantes obtenidos de las probetas en fibra de carbono es mas importante que los teóricos, debido a que éste es un material con mayor rigidez que el caso de los compuestos reforzados con fibra de vidrio, esto hace que la

influencia de la rigidez del material con respecto a la rigidez del marco de carga de la máquina y el dispositivo de pruebas no pueda ser despreciable, esto sucede normalmente en los ensayos con metales, sin embargo como el objetivo de estos ensayos dentro de esta tesis es el de validar el funcionamiento del dispositivo, esto último no indica un funcionamiento incorrecto del dispositivo.

REFERENCIAS

- [1] ASTM D 5379/D 5379M-93: “Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.” Annual book of ASTM standards, PA, USA.
- [2] Instron Model 8500 Dynamic Testing System Operators Guide, M11-98500-1 Issue C. August 1990.
- [3] Instron Hydraulic Pump Console Cat. No. 2718-402, M11-32718-1 Issue A. April 1990.
- [4] Instron Series 3470 10 and 20 GPM Hydraulic Power Supplies, M11-33470-12 Issue A November 1989.
- [5] Camarena Arellano, Diego, “Análisis empleando el Método del Elemento Finito de la unión tren principal – fuselaje – montante de una aeronave en C-Ep, ultraligera, biplaza, monomotor”, Tesis para la obtención del Título de Ingeniero en Aeronáutica, IPN-ESIME, 2009.
- [6] Camarena Arellano, Diego. Et. Al. “Medición de fracciones volumétricas en materiales compuestos C-Ep y G-Ep por digestión y calcinación de resina”. IPN-ESIME, 2009.
- [7] Miravete, Antonio. “Materiales compuestos”. Cuarta edición. Zaragoza, España. 2000. (vol2).
- [8] MIL-HDBK-17-1E. 6.7.6.2 “In plane shear methods”. Department of defense handbook. Polymer matrix composites. Vol. 1 guidelines for characterization of structural materials.
- [9] Gay, D., Matériaux Composites 4e Éd. Hermès. Paris, 1997. pp. 31.
- [10] Jean Marie, Berthelot. “Matériaux composites”, Editions Tec&Doc, Paris, 1999.
- [11] Hernández Moreno, Hilario. Et. Al. “Elaboración y caracterización de materiales compuestos poliméricos de alto desempeño utilizando insumos nacionales”. Reporte final de proyecto SIP 20070224, México, 2008.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos.”

CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos.”

Conclusiones

A lo largo del trabajo fue posible lograr ciertas metas y contrastando esos resultados con los objetivos propuestos en un inicio, es posible observar lo siguiente:

- Se cumplió con las metas planteadas ya que se logró caracterizar mecánicamente láminas fabricadas en material compuesto.
- Se identificó el estado de la ciencia con respecto a la caracterización de materiales compuestos en corte y dispositivos diseñados para ese propósito; con ésta información, fue posible elegir el dispositivo más conveniente de acuerdo a las necesidades existentes.
- Se desarrolló el dispositivo necesario para cumplir con el objetivo planteado
- Se utilizó el método del QFD aplicado al diseño del dispositivo, los cuales permiten considerar los requerimientos del cliente en el proceso de diseño.
- Se utilizaron criterios de diseño mecánico y de fabricación en el dimensionado del dispositivo y la selección de la materia prima.
- El dispositivo tiene las capacidades para determinar las propiedades mecánicas en corte de una lámina en materiales compuestos para el análisis estructural, mediante el empleo de la norma ASTM 5379.
- Los datos obtenidos por medio del desarrollo y análisis experimental pueden considerarse válidos ya que no muestran una discrepancia significativa con respecto a la literatura.

“Determinación experimental de las propiedades en corte de una lámina delgada fabricada en materiales compuestos.”

Comentarios y sugerencias para trabajos futuros

Existen muchos factores que pueden influir en los resultados obtenidos, por ello, es muy importante tomar en cuenta los siguientes aspectos:

La adecuada manufactura de las probetas, sobre todo en las muescas, es muy importante para lograr un buen resultado, es por esto que se recomienda que el corte se haga mediante procesos como: corte por chorro de agua o láser, debido a que los maquinados convencionales no proporcionan buen acabado y pueden inducir delaminaciones en el material durante la fabricación. Otros puntos que deben evitarse, son ondulaciones en las fibras y la porosidad en las probetas.

Durante las pruebas a probetas con una sola capa o delgadas, pueden agregarse lengüetas que permiten minimizar el riesgo de falla por torsión.

Se sugiere analizar probetas con diferentes espesores, diferente tipo de material y diferente orientación de las capas.

Durante la instalación del dispositivo es necesario poner cuidado la alineación de las dos partes.

Es posible ajustar algunas dimensiones en el tamaño de las mordazas del dispositivo que permitan un intervalo más amplio de dimensiones para las probetas.

Puede ser recomendable lograr que la alineación del dispositivo quede de frente al operador, lo cual permite una mejor observación de la probeta durante el ensayo, además de facilitar la posible utilización de técnicas de correlación de imágenes.

Debido a que la prueba se realizó para validar el buen funcionamiento del dispositivo, la cantidad de pruebas realizadas solo fue la estrictamente necesaria. Para la obtención de las propiedades mecánicas de un material en específico, se deberá ensayar una muestra estadísticamente representativa, por lo que se recomienda hacerlo y utilizar técnicas de extensometría eléctrica para la adquisición de la deformación o técnicas por correlación de imágenes.

Es necesario colocar con cuidado las galgas extensométricas, ya que son utilizadas cuatro galgas por cada probeta, o bien, dos rosetas de dos galgas cada una.

Para ahorrar tiempo y recursos, es posible detener la prueba cuando la deformación sea equivalente al 5%.

Para la gráfica de esfuerzo cortante-deformación angular, es necesario agregar una línea recta surgida del arreglo a la región lineal de la gráfica y trasladarla al 2% de deformación con respecto al origen de la gráfica. El punto en donde las dos líneas crucen, será considerado el esfuerzo cortante máximo. Es necesario tener cuidado al elegir la región de la gráfica considerada lineal para hacer el arreglo, que en teoría se ubicara entre $1000\mu\epsilon$ y $3000\mu\epsilon$.