

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO MEDIANTE MOLDEO POR ASPERSIÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

MARCO TULIO RODRÍGUEZ CHÁVEZ

rodricho_eltuli@hotmail.com

GUILLERMO RAFAEL VILLAVICENCIO VACA

guille_ingmec77epn@hotmail.com

DIRECTOR: VÍCTOR HUGO GUERRERO, Ph.D.

victor.guerrero@epn.edu.ec

Quito, Junio de 2013

DECLARACIÓN

Nosotros, Marco Tulio Rodríguez Chávez y Guillermo Rafael Villavicencio Vaca, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Marco Tulio Rodríguez Chávez

Guillermo Rafael Villavicencio Vaca

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente proyecto de titulación fue realizado bajo mi supervisión y en su totalidad por los señores: Marco Tulio Rodríguez Chávez y Guillermo Rafael Villavicencio Vaca.

Víctor Hugo Guerrero, Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme salud, fuerzas y mucha sabiduría para lograr mis objetivos.

A mis padres, por su amor y cariño. Por el ejemplo diario de lucha que me han inculcado siempre y por el valor mostrado para salir adelante.

A mi hijo Matías, por su inocencia y ternura y ser mi principal motivación.

A mi esposa Karina, por su comprensión y apoyo para la realización de este trabajo

A mis hermanas, que me han sabido acompañar y brindar el ánimo necesario para seguir avanzado.

A mis sobrinos, por compartir alegres momentos de su niñez.

A mi compañero Guillermo, por los arduos días de trabajo.

Al Dr. Víctor Hugo Guerrero, por todos los conocimientos impartidos durante la realización de este proyecto.

Al Ing. José Luis Dávila, por su amistad y gran apoyo durante todo el desarrollo del proyecto. Y a las Ingenieras Salome Galeas y Carla Valdivieso por su ayuda prestada en varias ocasiones.

Al personal docente de la Facultad de Ingeniería Mecánica quienes han sido parte de mi formación académica.

Marco Tulio

A mis hermanos Isabel, Luis, Yoli y Lucía por ser el ejemplo de hermanos mayores, de quienes he aprendido muchas cosas buenas; a mi hermano menor Carlos quien siempre tuvo las palabras precisas en momentos tristes. Por su ejemplo de seres humanos y su cariño sincero día a día. ¡Gracias a ustedes!

A Leslie Nathaly, por ser esa persona especial que siempre está impulsándome a ser un mejor ser humano y un mejor profesional, por su amor y comprensión.

A Esther Elizabeth por su amistad, cariño y apoyo en la consecución de mis metas personales.

A la pequeña Anaís, por ser la más pequeña llegada a la gran familia, para que este modesto trabajo, tal vez algún día, sirva de motivación y perseverancia.

Al Dr. Víctor Hugo Guerrero, por su colaboración, asesoría profesional y motivación en la realización de este trabajo; al Ing. José Luis Dávila por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de mi formación profesional. A las Ingenieras Salomé Galeas, Carla Valdivieso e Ingeniero Luis Andrade y todo el equipo de trabajo del LANUM y del LAEV por las experiencias compartidas y el respaldo brindado.

A mi compañero Marco, por su constancia en la realización de este trabajo.

A todos mis amigos, por los años de amistad y cariño compartidos durante estos años en la universidad.

A mis queridas: Facultad de Ingeniería Mecánica y Escuela Politécnica Nacional, por la formación recibida y las lecciones de vida aprendidas.

Guillermo Rafael

DEDICATORIA

Con gran cariño...

A mis padres Susana Emperatriz y Marco Tulio, por estar junto a mí en todo momento, por sus valores, consejos y la motivación constante que me han permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su gran amor.

A mi hijo Matías Alexander, por ser la fuente de energía, de superación, que mediante sus sonrisas y caricias han fortalecido mi corazón e iluminado mi mente.

A mis hermanas Verónica, Andrea y María Fernanda, de quienes recibí el mejor ejemplo y a la vez que aprendí a valorar mis aciertos y como superar mis errores.

Marco Tulio

Con mucho amor e infinita gratitud...

A Dios por regalarme cada día la alegría de vivir, por darme salud para lograr mis objetivos, por su infinita bondad y amor habiéndome levantado en los momentos más duros y difíciles de mi vida.

A mi madre Blanquita Rosario.

Por su gran amor, sacrificio constante que va más allá del deber de una madre, apoyándome en todo momento y la motivación constante que me ha permitido alcanzar grandes objetivos.

A mi padre Guillermo Rafael.

Por ser el padre que es, por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por sus consejos, por su amor y su humildad.

Guillermo Rafael

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
CONTENIDO	VI
CONTENIDO DE FIGURAS	XI
RESUMEN	XXIV
PRESENTACIÓN	XXVI
CAPÍTULO 1	1
MOLDEO POR ASPERSIÓN	1
1.1 CARACTERÍSTICAS DEL MOLDEO POR ASPERSIÓN	1
1.1.1 MÁQUINA DE MOLDEO POR ASPERSIÓN	5
1.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	12
1.1.3 APLICACIÓN DE GELCOAT	14
1.1.4 PROCESO DE LAMINACIÓN	16
1.2 MATERIALES EMPLEADOS EN EL MOLDEO POR ASPERSIÓN	17
1.2.1 RESINA POLIÉSTER.....	17
1.2.2 GELCOAT	19
1.2.3 REFUERZOS.....	23
1.2.3.1 Fibra de vidrio	23
1.2.3.2 Roving de fibra de vidrio	25
1.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS CORTAS ALEATORIAMENTE DISTRIBUIDAS	33
1.4 VARIABLES DEL PROCESO DE CURADO DE LA RESINA POLIÉSTER .	38
1.5 VARIABLES DEL PROCESO DE MOLDEO POR ASPERSIÓN	40
1.5.1 Parámetros y variables del equipo de aspersión	41
1.5.2 Materiales	41
1.5.3 Variables del proceso de aspersión	41
1.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE ASPERSIÓN	43
1.7 APLICACIONES INDUSTRIALES	45
1.8 OBJETIVOS Y ALCANCE	48
1.8.1 OBJETIVOS.....	48

1.8.2 ALCANCE	48
CAPÍTULO 2	50
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	50
2.1 MATERIALES Y EQUIPOS	50
2.1.1 MATERIALES	51
2.1.1.1 Roving de fibra de vidrio tipo E	51
2.1.1.2 Resina poliéster insaturada	52
2.1.1.3 Gelcoat	54
2.1.1.4 Materiales adicionales	56
2.1.2 EQUIPOS.....	57
2.1.2.1 Equipo de generación de aire comprimido.....	57
2.1.2.2 Equipo para moldeo por aspersión MVP	60
2.1.2.2.1 <i>Dispositivo dosificador (émbolo-pistón) de catalizador MEKP</i>	<i>62</i>
2.1.2.2.2 <i>Brazo posicionante</i>	<i>64</i>
2.1.2.2.3 <i>Mangueras de resina y catalizador</i>	<i>64</i>
2.1.2.2.4 <i>Bomba de resina.....</i>	<i>65</i>
2.1.2.2.5 <i>Pistola de mezcla externa para corte de fibra y aplicación de resina MVP modelo ATC 4000.....</i>	<i>69</i>
2.1.2.3 Equipo para aplicación de gelcoat MVP	70
2.1.2.4 Estufa de secado VENTICELL.....	72
2.1.2.5 Microscopio óptico MEIJI	73
2.1.2.6 Horno de cámara CWF	74
2.1.2.7 Balanza electrónica digital	74
2.1.2.8 Máquina universal de ensayos.....	75
2.1.2.9 Equipo de impacto por caída de dardo	76
2.2 ESTRATEGIA METODOLÓGICA	78
2.3 ENSAYOS PRELIMINARES	82
2.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATRIZ POLIÉSTER	83
2.3.1.1 Densidad de la resina poliéster ANDERPOL 895	83
2.3.1.2 Caracterización mecánica de la matriz	83
2.3.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS REFUERZOS	85
2.3.3 DETERMINACIÓN DE LAS FRACCIONES VOLUMÉTRICAS DE LAS DIFERENTES COMPOSICIONES	86

2.3.4 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DE GELCOAT	89
2.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	90
2.4.1 ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	92
2.4.1.1 Probetas para ensayos de tracción.....	101
2.4.1.2 Probetas para ensayos de flexión.....	103
2.4.1.3 Probetas para ensayos de impacto.....	104
2.4.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS.....	106
2.4.2.1 Ensayos de tracción.....	106
2.4.2.2 Ensayos de flexión.....	107
2.4.2.3 Ensayos de impacto.....	108
CAPÍTULO 3.....	109
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	109
3.1 OBTENCIÓN DE PROBETAS.....	109
3.2 DENSIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS POR ASPERSIÓN... 113	113
3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA RESINA POLIÉSTER..	113
3.2.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL REFUERZO.....	113
3.3 DETERMINACIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LOS DIFERENTES MATERIALES	114
3.4 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DE GELCOAT	116
3.5 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO.....	117
3.5.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	117
3.5.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN.....	130
3.5.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO	143
3.6 EVALUACIÓN DE COMPUESTOS DE RESINA POLIÉSTER Y FIBRA DE VIDRIO MOLDEADOS POR ASPERSIÓN.....	147
3.6.1 COMPARACIÓN DE LOS COMPUESTOS MOLDEADOS POR ASPERSIÓN CON LOS COMPUESTOS OBTENIDOS POR OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	156

3.6.2	COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER CON DIFERENTES TIPOS DE REFUERZO Y CONFIGURACIONES	157
3.6.3	COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS DE DIFERENTES MATRICES	162
CAPÍTULO 4		166
OBTENCIÓN DEL PROTOTIPO.....		166
4.1 ANÁLISIS FUNCIONAL DEL MATERIAL COMPUESTO A SER EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO		166
4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS FUNCIONAL		169
4.3 POSIBLES PROTOTIPOS A CONSTRUIR.....		170
4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ALTERNATIVAS A CONSTRUIR		172
4.4.1	ALTERNATIVA DE DISEÑO A	172
4.4.2	ALTERNATIVA DE DISEÑO B	172
4.4.3	ALTERNATIVA DE DISEÑO C	173
4.4.4	ALTERNATIVA DE DISEÑO D	173
4.4.5	ALTERNATIVA DE DISEÑO E	173
4.5 SELECCIÓN DEL PROTOTIPO A CONSTRUIR		174
4.5.1 SELECCIÓN DEL DISEÑO A CONSTRUIR		178
4.5.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES DISEÑOS.....		181
4.5.2.1	Alternativa de diseño A (Doble tándem con mesa intermedia)	181
4.5.2.2	Alternativa de diseño B (Hilera triple con respaldos laterales).....	181
4.5.2.3	Alternativa de diseño C (Tipo modular doble y convencional)	182
4.6 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO		185
4.6.1 MOLDE DEL PROTOTIPO		185
4.6.2 ENSAMBLAJE DE PARTES.....		186
4.7 ANÁLISIS DE COSTOS		189
4.7.1 COSTO DE FABRICACIÓN DE UN TABLERO DE MATERIAL COMPUESTO		189
4.7.2 COSTO DE FABRICACIÓN DE UN ASIENTO DE ESPERA CURADO EN ESTUFA		194
4.7.3 COSTO DE FABRICACIÓN DE UN ASIENTO DE ESPERA CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE		198

4.8 PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO	200
4.8.1 ENSAYOS MECÁNICOS.....	203
4.8.1.1 Ensayo de esfuerzo hacia atrás del respaldo	204
4.8.1.2 Ensayo de caída	205
4.8.2 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA ACCIÓN DE AGENTES QUÍMICOS	206
4.9 EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS DEL PROTOTIPO	207
4.9.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL RESPALDO DEL PROTOTIPO	207
4.9.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CAÍDA REALIZADOS EN EL PROTOTIPO	209
4.9.3 RESISTENCIA A LA ACCIÓN DE AGENTES QUÍMICOS	212
CAPÍTULO 5	213
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	213
5.1 CONCLUSIONES	213
5.2 RECOMENDACIONES.....	218
BIBLIOGRAFÍA	219
ANEXOS	222

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1.	Elementos utilizados durante el moldeo por aspersión.	2
Figura 1.2.	Proceso de aspersión (molde convexo).	4
Figura 1.3.	Esquema del sistema de la máquina de aspersión.	5
Figura 1.4.	Identificación de componentes de la máquina de aspersión	6
Figura 1.5.	Válvulas y manómetros de control de presión de la máquina de aspersión.....	7
Figura 1.6.	Posicionador de bombeo del catalizador y su almacenamiento	8
Figura 1.7.	Pistola de aspersión	8
Figura 1.8.	Pistola rociadora de resina y fibra de vidrio.....	12
Figura 1.9.	Brazo robótico para moldeo por aspersión.....	13
Figura 1.10.	Aplicación de gelcoat mediante pistola.	14
Figura 1.11.	Rodillos de acero para laminación de resina y fibra de vidrio.	16
Figura 1.12.	Presentaciones de la fibra de vidrio	26
Figura 1.13.	Respuesta de un material compuesto reforzado con fibras cortas aleatoriamente distribuidas a una carga de tracción.	36
Figura 1.14.	Micrografía de la superficie de un espécimen de material compuesto con fibra de vidrio y matriz de resina destruido.	37
Figura 1.15.	Aplicaciones del moldeo por aspersión.	47
Figura 1.16.	Regulación de bombeo del peróxido metil-etil cetona (MEKP).	39
Figura 2.1.	Roving Owens Corning empleado en el proyecto.	52
Figura 2.2.	Resina poliéster insaturada, presentación comercial.	53
Figura 2.3.	Varios materiales empleados en el proceso de moldeo por aspersión.....	56
Figura 2.4.	Peróxido de metil-etil cetona (MEKP).....	57
Figura 2.5.	Equipo de generación de aire comprimido.	59
Figura 2.6.	Equipo para moldeo por aspersión MVP y sus partes principales...	61
Figura 2.7.	Partes principales de la bomba y dispositivo dosificador de MEKP, en la máquina de aspersión empleada.....	63
Figura 2.8.	Funcionamiento del dispositivo dosificador de MEKP.	63
Figura 2.9.	Manómetros para regulación de presiones de trabajo.	64

Figura 2.10. Carrera ascendente de la bomba de resina de doble efecto.	66
Figura 2.11. Carrera descendente de la bomba de resina de doble efecto.	68
Figura 2.12. Pistola de mezcla externa para moldeo por aspersión MVP modelo ATC 400.	69
Figura 2.13. Equipo para aplicación de gelcoat MVP.	71
Figura 2.14. Pistola para aplicación de gelcoat MVP modelo ATG 3500 de mezcla externa	72
Figura 2.15. Estufa Venticell.	72
Figura 2.16. Microscopio MEIJI modelo MX.	73
Figura 2.17. Horno eléctrico empleado en la incineración de las muestras.	74
Figura 2.18. Balanza electrónica digital AE ADAM.	74
Figura 2.19. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25K-S UTM	76
Figura 2.20. Equipo de caída de dardo.	77
Figura 2.21. Accesorios de equipo de ensayos de impacto	77
Figura 2.22. Esquema de la estrategia metodológica empleada.	81
Figura 2.23. Probeta de resina poliéster elaborada.	83
Figura 2.24. Molde empleado en la obtención de probetas para ensayos de tracción de matriz poliéster.	84
Figura 2.25. Moldes empleados en la obtención de probetas para ensayos de flexión de matriz poliéster.	84
Figura 2.26. Molde empleado en la obtención de probetas para ensayos de impacto de matriz poliéster.	85
Figura 2.27. Inmersión de la muestra de refuerzo en resina poliéster preparada.	85
Figura 2.28. Muestras de materiales compuestos para incinerar.	86
Figura 2.29. Muestras de material compuesto para determinación de la fracción volumétrica existente.	87
Figura 2.30. Micrografía óptica de muestras de materiales compuestos para la medición del espesor de la capa de gelcoat	90
Figura 2.31. Resina poliéster mezclada con estireno y octoato de cobalto para utilizarla en el proceso de aspersión.	93
Figura 2.32. Colocación del roving de fibra de vidrio en el dispositivo de corte de la pistola de mezcla externa en la máquina de aspersión.	94

Figura 2.33. Selección de la posición de bombeo del dispositivo dosificador émbolo pistón del peróxido de metil-etil cetona.	95
Figura 2.34. Aplicación de gelcoat.	95
Figura 2.35. Moldeo por aspersión (capa simultánea de fibra de vidrio y matriz resina poliéster).....	96
Figura 2.36. Proceso de laminación con rodillo.....	96
Figura 2.37. Recorte de exceso de material compuesto.	97
Figura 2.38. Extracción de probetas normalizadas de los tableros de material compuesto.....	97
Figura 2.39. Probetas para ensayos de tracción.....	102
Figura 2.40. Probetas para ensayos a flexión.	104
Figura 2.41. Tablero para ensayo a impacto.	105
Figura 2.42. Probetas para ensayo de impacto.....	105
Figura 3.1. Tablero con deficiencia de catalizador en el curado, posiciones del dispositivo dosificador de MEKP entre 0,5 y 1,0.	111
Figura 3.2. Tablero con exceso de catalizador en el curado, posiciones del dispositivo dosificador de MEKP entre 3,0 y 3,5.	111
Figura 3.3. Tablero sin gelcoat.	112
Figura 3.4. Tablero con gelcoat.....	112
Figura 3.5. Curvas esfuerzo vs. deformación de las formulaciones sin revestimiento de gelcoat y posición de bombeo variable de MEKP (peróxido de metil-etil cetona).	120
Figura 3.6. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones sin gelcoat y con gelcoat en una y ambas superficies del compuesto, manteniendo el dosificador de MEKP en la posición entre (2,0-2,5).	123
Figura 3.7. Curvas esfuerzo vs. deformación de las diferentes configuraciones de curado.	124
Figura.3.8. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de la resina poliéster y las configuración T.SG.15d.(2,0-2,5M); T.CG ₁ .15d.(2,0-2,5M); T.SG.35°C12h.(2,0-2,5M).....	126

Figura 3.9. Módulo de elasticidad de la resina poliéster y las configuraciones: T.SG.15d.(2,0-2,5M) y T.SG.35°C.12h.(2,0-2,5M).....	127
Figura 3.10. Fracturas observadas en probetas de materiales compuestos de diferentes configuraciones: (a) Matriz de resina poliéster; (b) TSG.15d.(2,0-2,5M); (c) TCG ₁ .15d.(2,0-2,5M); (d) CG ₂ .15d.(2,0-2,5M); (e) T.SG.45°C12h.(2,0-2,5M).	129
Figura 3.11. Curva esfuerzo vs. deformación de las formulaciones sin revestimiento de gelcoat y posición de bombeo de MEKP variable.	133
Figura 3.12. Curva esfuerzo vs. deformación a flexión de las configuraciones sin gelcoat y con gelcoat en una y ambas superficies del compuesto, con posición del dosificador de MEKP entre (2,0-2,5).....	135
Figura 3.13. Curvas esfuerzo vs. deformación de las diferentes configuraciones de curado.	137
Figura 3.14. Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de la resina poliéster y las configuración F.SG.15d.(2,0-2,5M); F.CG ₁ .15d.(2,0-2,5M); F.SG.35-12h.(2,0-2,5M).....	139
Figura 3.15. Módulo de elasticidad de la resina poliéster y las configuraciones:F.SG.15d.(2,0-2,5M) y F.SG.35 12h.(2,0-2,5M)..	140
Figura 3.16. Fracturas observadas en probetas de materiales compuestos de diferentes configuraciones	142
Figura 3.17. Resistencia al impacto de la matriz poliéster empleada y de los materiales con mejores propiedades a tracción y flexión.	145
Figura 3.18. Fracturas observadas en probetas de materiales compuestos de diferentes configuraciones: (a) Matriz de resina poliéster; (b) Probeta sin gelcoat (curado medio ambiente); (c) Probeta sin gelcoat (curado a 45 °C, durante 12 horas).	146
Figura 3.19. Resistencia específica vs. módulo específico a tracción de las 12 configuraciones elaboradas en este estudio.	150
Figura 3.20. Resistencia específica vs. módulo específico a flexión de las 12 configuraciones elaboradas en este estudio.	151
Figura 3.21. Gráfico multiteje de compuestos elaborados con matriz de poliéster reforzados con diferentes tipos de fibra.	160

Figura 3.22. Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico de compuestos de matriz poliéster reforzados con diferentes tipos de refuerzo.	161
Figura 3.23. Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico de compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y fibra de vidrio.	164
Figura 4.1. Molde convexo utilizado para la elaboración del prototipo con sus dimensiones generales.	185
Figura 4.2. Diseño y partes del prototipo elaborado.	186
Figura 4.3. Diagrama de flujo para la obtención del prototipo mediante moldeo por aspersión.	187
Figura 4.4. Dimensiones nominales de una de las sillas del prototipo elaborado.	188
Figura 4.5. Dimensiones nominales del prototipo elaborado.	188
Figura 4.6. Esquema general de pruebas realizadas en el prototipo.	202
Figura 4.7. Ensayo de caída sobre asiento según norma NTE INEN 2002:95.205	
Figura 4.8. Ensayo de caída sobre asiento según norma NTE INEN 2002:95.206	
Figura 4.9. Aplicación de los agentes químicos sobre la superficie del asiento.	207
Figura 4.10. Aplicación de las cargas de funcional y de prueba sobre el respaldo del prototipo	208
Figura 4.11. Prototipo después del ensayo de aplicación de carga sobre el respaldo	209
Figura 4.12. Parte inferior del prototipo después de la realización de las pruebas.	209
Figura 4.13. Medición de la altura indicada para la realización del ensayo.	210
Figura 4.14. Elevación de la carga sobre el prototipo.	210
Figura 4.15. Caída de la carga de prueba e inspección del prototipo.	211
Figura 4.16. Prototipo posterior al ensayo de acción química.	212

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1.	Ejemplos de propiedades mecánicas basadas en procesos de fabricación, para fibra de vidrio tipo E.	3
Tabla 1.2.	Fórmula general de un gelcoat típico.	3
Tabla 1.3.	Métodos de rociado utilizados en el proceso de moldeo por aspersión	11
Tabla 1.4.	Ejemplos de propiedades de la resina poliéster insaturada (UP), reforzada con fibra corta.	18
Tabla 1.5.	Propiedades de diferentes matrices con dos tipos de refuerzo de fibra de vidrio.....	19
Tabla 1.6.	Fallas, causas probables y soluciones en la aplicación del gelcoat	21
Tabla 1.7.	Composición de fibras de vidrio utilizadas en la manufactura de compuestos.....	24
Tabla 1.8.	Propiedades de fibras de vidrio utilizadas como refuerzo en compuestos.....	24
Tabla 1.9.	Propiedades de algunos tipos de fibras de refuerzo empleados en la fabricación de materiales compuestos y de productos metálicos....	25
Tabla 1.10.	Ejemplo de propiedades de materiales compuestos.	27
Tabla 1.11.	Resultados de propiedades mecánicas, de algunos materiales compuestos caracterizados en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la EPN.....	29
Tabla 1.12.	Resultados de propiedades mecánicas de muestras de material compuesto de la empresa RM SOLUTIONS.....	30
Tabla 1.13.	Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta y unidireccional.	31
Tabla 1.14.	Propiedades mecánicas promedio de tracción y flexión de compuestos de matriz poliéster reforzado con diferentes fibras	32
Tabla 1.15.	Posición de dispositivo dosificador de MEKP y tiempo aproximado de su curado.	39
Tabla 1.16.	Esquema de procesamiento por aspersión.	43
Tabla 1.17.	Ejemplos de la elección del proceso sugerido en comparación con las características de la pieza.....	45

Tabla 2.1.	Fórmula general recomendada para el curado de la resina ANDERPOL 859.	53
Tabla 2.2.	Algunas propiedades de la resina poliéster empleada.	54
Tabla 2.3.	Fórmula general recomendada para el curado del gelcoat ANDERPOL 889.	55
Tabla 2.4.	Características generales del equipo de generación de aire comprimido.	58
Tabla 2.5.	Características generales de la máquina de moldeo por aspersión MVP.	60
Tabla 2.6.	Especificaciones técnicas de la pistola MVP ATC 4000.	70
Tabla 2.7.	Características técnicas de la máquina para aplicación de gelcoat MVP.	70
Tabla 2.8.	Características de la pistola para aspersión de gelcoat MVP modelo ATG 3500.	71
Tabla 2.9.	Características de la máquina universal Tinius Olsen modelo H25K-S UTM.	75
Tabla 2.10.	Tipo y número de probetas elaboradas en el presente trabajo.	91
Tabla 2.11.	Proceso de elaboración de probetas.	98
Tabla 2.12.	Designación y significado para probetas de tracción.	101
Tabla 2.13.	Designación y significado para probetas de flexión.	103
Tabla 2.14.	Características de los tableros para ensayos a impacto.	104
Tabla 3.1.	Composición de elementos constitutivos de matriz poliéster para el correcto funcionamiento y limpieza de la máquina de aspersión. .	110
Tabla 3.2.	Variables de operación óptima en la máquina de aspersión de resina/fibra-gelcoat del LANUM.	110
Tabla 3.3.	Dimensiones de la probeta de resina poliéster elaborada.	113
Tabla 3.4.	Volúmenes, masas y densidades de los refuerzos empleados.	114
Tabla 3.5.	Resultados obtenidos para las fracciones volumétricas de fibra, resina y vacíos en los diferentes materiales compuestos elaborados.	114

Tabla 3.6.	Mediciones de espesor de gelcoat obtenidos en materiales fabricados con este recubrimiento (espesor nominal del material compuesto 2,5 mm).....	116
Tabla 3.7.	Mediciones de espesor de gelcoat obtenidos en materiales fabricados con este recubrimiento (espesor nominal del material compuesto 4,0 mm).....	116
Tabla 3.8.	Resultados de ensayos de tracción de los compuestos obtenidos	118
Tabla 3.9.	Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a tracción de las formulaciones sin revestimiento de gelcoat y posición de bombeo variable de MEKP.....	121
Tabla 3.10.	Resultados de ensayos de flexión de los compuestos obtenidos..	131
Tabla 3.11.	Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a flexión de las formulaciones sin revestimiento de gelcoat y posición de bombeo de MEKP variable.	134
Tabla 3.12.	Resultado de los ensayos de impacto realizados en materiales compuestos obtenidos mediante el proceso de aspersión.....	144
Tabla 3.13.	Resultados de las propiedades mecánicas de compuestos de resina poliéster y fibra de vidrio mediante moldeo por aspersión.	148
Tabla 3.14.	Resultados de ensayos de impacto en algunos materiales compuestos caracterizados en el LAEV.....	152
Tabla 3.15.	Resistencia al impacto de algunos materiales obtenidos en el LANUM.	153
Tabla 3.16.	Propiedades mecánicas basadas en diversos procesos de fabricación	156
Tabla 3.17.	Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzado con diferentes tipos de fibra.	158
Tabla 3.18.	Propiedades mecánicas de compuestos de otras matrices poliméricas	162
Tabla 4.1.	Ponderación de las características del material planteado para la obtención del prototipo.	169
Tabla 4.2.	Alternativas para fabricación de prototipo.	171

Tabla 4.3.	Resultado de la valoración de los criterios de selección del prototipo.	175
Tabla 4.4.	Peso específico del criterio de procesabilidad.....	176
Tabla 4.5.	Peso específico del criterio de costo	176
Tabla 4.6.	Peso específico del criterio de funcionalidad.....	177
Tabla 4.7.	Peso específico del criterio de resistencia al desgaste.	177
Tabla 4.8.	Peso específico del criterio de utilidad.	177
Tabla 4.9.	Conclusión del método de selección de alternativas.	178
Tabla 4.10.	Diseños, precios y usos de sillas de espera existentes en el mercado.	179
Tabla 4.11.	Alternativas de diseño de sillones de espera.	180
Tabla 4.12.	Valoración de criterios para selección de diseños del prototipo a fabricarse.	183
Tabla 4.13.	Peso específico del criterio de factibilidad de fabricación.....	184
Tabla 4.14.	Peso específico de costo.....	184
Tabla 4.15.	Peso específico del criterio de operaciones adicionales de fabricación.....	184
Tabla 4.16.	Peso específico del criterio de predilección del consumidor.	184
Tabla 4.17.	Conclusión del método de selección de alternativas.	185
Tabla 4.18.	Tabla de consideraciones generales para la estimación del costo de producción de un tablero de material compuesto de 2,5 mm de espesor nominal.....	189
Tabla 4.19.	Dimensiones del producto a elaborar, y materiales empleados en su fabricación.....	190
Tabla 4.20.	Costo de materiales empleados.	191
Tabla 4.21.	Costos de energía eléctrica.	191
Tabla 4.22.	Tiempos de fabricación.	192
Tabla 4.23.	Tabla de los costos parciales y del costo total de producción de un tablero de 2,5 mm de espesor.....	193
Tabla 4.24.	Índices de producción que se obtendrían para la elaboración de tableros.	193
Tabla 4.25.	Tabla de consideraciones generales para la estimación del costo de producción de un asiento curado a 45°C durante 12 horas.	194

Tabla 4.26.	Dimensiones del producto a elaborar, y materiales empleados en su fabricación.....	195
Tabla 4.27.	Costo de materiales empleados.....	195
Tabla 4.28.	Costos de energía eléctrica.....	196
Tabla 4.29.	Tiempos de fabricación.....	197
Tabla 4.30.	Tabla de los costos parciales y del costo total de producción de un asiento de silla de espera curado a 45°C durante 24 horas, de 3 mm de espesor nominal.....	198
Tabla 4.31.	Índices de producción que se obtendrían para la elaboración de asientos de silla de espera.....	198
Tabla 4.32.	Consumo energético para la producción de un asiento para silla de espera curado al medio ambiente.....	199
Tabla 4.33.	Tabla de los costos parciales y del costo total de producción de un asiento de silla de espera curado a temperatura ambiente.....	199
Tabla 4.34.	Pruebas mecánicas generales descritas en la norma NTE INEN 2002:95 para sistemas de asientos.....	203
Tabla 4.35.	Resultados del ensayo de aplicación de carga sobre el respaldo del prototipo.....	208
Tabla 4.36.	Resultados del ensayo de caída sobre el prototipo.....	211
Tabla 4.37.	Resultados de los ensayos de resistencia a la acción de agentes químicos.....	212

SIMBOLOGÍA

A	amperio
ASTM	American Society of Testing Materials
CFM	pies cúbicos por minuto
ρ	densidad
m	Masa
V	volumen
ρ_f	densidad de la fibra
m_f	masa de fibra
\bar{V}_c	volumen del compuesto promedio
V_f	volumen de fibra
v_f	fracción volumétrica de fibra
ρ_m	densidad de la matriz
m_m	masa de matriz
V_m	volumen de matriz
V_v	volumen de vacíos
v_m	fracción volumétrica de matriz
v_v	fracción volumétrica de vacíos
ρ_c	densidad de material compuesto
m_c	masa de material compuesto
M_f	fracción en masa de la fibra
M_m	fracción en masa de la matriz
m_T	masa total
V_c	volumen de material compuesto
V_t	volumen total del material compuesto
m_p	masa de probeta
V_p	volumen de probeta
σ_{max}	esfuerzo máximo a tracción
$S\sigma$	desviación estándar del esfuerzo máximo a tracción
$CV\sigma$	coeficiente de variación del esfuerzo máximo a tracción
E	módulo de elasticidad a tracción
SE	desviación estándar del módulo de elasticidad a tracción
CVE	coeficiente de variación del módulo de elasticidad a tracción
ϵ	deformación a tracción
$S\epsilon$	desviación estándar de la deformación a tracción
$CV\epsilon$	coeficiente de variación de la deformación a tracción
σ_{Fmax}	esfuerzo máximo a flexión
$SF\sigma$	desviación estándar del esfuerzo máximo a flexión

CV σ_F	coeficiente de variación del esfuerzo máximo a flexión
E _F	módulo de elasticidad a flexión
SE _F	desviación estándar del módulo de elasticidad a flexión
CVE _F	coeficiente de variación del módulo de elasticidad a flexión
ϵ_F	deformación a flexión
S ϵ_F	desviación estándar de la deformación a flexión
CV ϵ_F	coeficiente de variación de la deformación a flexión
°C	grado Celsius
g	gramo
m	metro
m ²	metro cuadrado
cm	centímetro
mm	milímetro
Pa	pascal
Prom	promedio
l	litro
MPa	megapascal
GPa	gigapascal
N	newton
psi	libra fuerza/pulgada ²
ksi	kilo libra fuerza/pulgada ²
s	segundo
K	kelvin
kg	kilogramo
kN	kilonewton
kW	kilowatio
in	pulgada
J	joule
cps	centipoise
μ	micra
V	voltio
UP	resina poliéster insaturada
W	watio
PP	resina de polipropileno
ppm	partes por millón
rpm	revolución por minuto
EP	resina epoxy
MEKP	peróxido de metil-etil cetona
SiO ₂	óxido de silicio
Al ₂ O ₃	óxido de aluminio

B_2O_3	óxido de boro
MgO	óxido de magnesio
CaO	óxido de calcio
Na_2O	óxido de sodio
%	porcentaje
<	menor que
>	mayor que
CG_1	probeta con gelcoat en una de sus superficies
CG_2	probeta con gelcoat en dos de sus superficies
SG	probeta sin gelcoat
w	masa de impactador utilizado [kg]
ho	altura mínima de falla [mm]
dh	incremento de altura [mm]
h	altura media de falla [mm]
S_h	desviación estándar estimada de la altura media de falla [mm]
MFE	energía media de falla [J]
S_{MFE}	desviación estándar estimada de la energía media de falla [J]

RESUMEN

Este proyecto de titulación se basa en la elaboración y caracterización de compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio obtenidos mediante moldeo por aspersión, donde se observó la facilidad de moldeo en la elaboración de piezas de mediano tamaño. En un inicio, se buscó determinar los parámetros funcionales y variables potenciales del proceso y la máquina de aspersión. Se trabajó en definir la composición de los constituyentes de la resina-matriz para un buen funcionamiento y posterior limpieza del equipo. Definida la matriz poliéster, se estudió la variación de la posición de dosificación del MEKP (peróxido de metil-etil cetona) en la máquina de aspersión. En algunos casos se realizó el recubrimiento superficial de los materiales con gelcoat. Además, se investigó la incidencia de la temperatura y el tiempo de curado en las propiedades mecánicas de estos materiales. Así, transcurrido el tiempo recomendado de curado, se realizó la caracterización mecánica de los compuestos obtenidos mediante ensayos normalizados de tracción, flexión e impacto. El tamaño de la fibra utilizada como refuerzo tuvo una longitud promedio de 30 mm. Cabe mencionar que los compuestos sin gelcoat y con gelcoat en una y ambas superficies, tuvieron una fracción volumétrica del 0,31; 0,28 y 0,24 % respectivamente.

Entre los resultados más importantes se tuvo la influencia de la posición de dosificación del MEKP, teniendo sus mejores características en la posición entre (2,0-2,5). Por otro lado, al recubrir las superficies del material con gelcoat, no se observó un incremento de las propiedades mecánicas respecto al material sin gelcoat. En cuanto, a la incidencia de la temperatura y tiempo de curado, el compuesto obtenido en la posición de bombeo del MEKP en (2,0-2,5) sin gelcoat, curado a temperatura de 45°C durante 24 horas en la estufa, es el material que muestra la mayor resistencia a la tracción, con un valor de 125 MPa, lo cual representa un incremento de 349% con respecto a la matriz poliéster. Lo anterior contrasta con su rigidez que tiene un valor de 10.692 MPa, es decir se tuvo un aumento del 670% en relación a la matriz poliéster. Para finalizar, se fabricó y caracterizó mecánicamente un prototipo con el material que presentó las mejores propiedades. Este prototipo se fabricó en base a un molde macho de una silla de

espera. El mueble elaborado posee un espesor promedio de 3 mm ya que ofrece la mejor combinación de resistencia, calidad y costo. De esta manera, se consiguió ofrecer al mercado un producto de buenas propiedades mecánicas, excelente apariencia física y menor costo de fabricación. Este trabajo se realizó con la maquinaria y materiales que fueron adquiridos para el proyecto PIC-08-493 “Desarrollo de Nuevos Materiales para Aplicaciones Estructurales e Industriales”, auspiciado por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), desarrollado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

PRESENTACIÓN

En la actualidad, los procesos de fabricación se han tecnificado en gran medida, permitiendo pasar de procesos manuales a semiautomáticos y completamente automatizados. Todo esto está enmarcado en la producción a gran escala, lo que conlleva a una disminución de los costos y tiempos de producción, y a un aumento en la calidad de los productos. El moldeo por aspersión es un proceso que se ha usado ampliamente alrededor del mundo, sin embargo, en el Ecuador es un proceso poco empleado, ya que en su mayoría, el desarrollo de materiales compuestos se ha limitado al uso de técnicas manuales. De esta forma, se busca introducir en este medio, un proceso semiautomático, que permita mejorar los diferentes parámetros inmersos.

En el primer capítulo se describen las características y funcionamiento de los equipos de aspersión. Además, se describe el proceso de moldeo por aspersión y las propiedades de la materia prima utilizada para la elaboración de las diferentes configuraciones de material compuesto. Por otro lado, se da a conocer las ventajas, desventajas y las principales aplicaciones donde se recomienda utilizar dicho proceso. Finalmente, se especifican los parámetros y variables que intervienen tanto en el equipo como en el proceso de aspersión.

La máquina de moldeo por aspersión del Laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela Politécnica Nacional (LANUM) cuenta con dos manómetros principales, uno para regular la presión de bombeo de resina/catalizador y otra para regular la presión de atomización del catalizador. Las presiones de trabajo de estos manómetros fueron establecidas en 20 y 90 psi respectivamente. Cabe mencionar, que la composición de la matriz poliéster establecida está constituida por los siguientes componentes y en las siguientes proporciones: resina poliéster insaturada, 15% estireno y 0,25% de octoato de cobalto. Por otro lado, en la pistola de aspersión se minimizó la entrada de aire al motor neumático de la cortadora del roving de fibra de vidrio, obteniéndose una cantidad constante de fibra cortada.

En el segundo capítulo se describe la información sobre la metodología seguida para obtener el material compuesto, así como también el equipo utilizado para su proceso y caracterización. De igual manera se presenta los materiales empleados y se describe el procedimiento para fabricar probetas de manera reproducible. Para culminar, se describen los criterios de selección del prototipo fabricado con la configuración que presentó la mejor combinación de propiedades y características.

Así, se elaboraron probetas para tracción, flexión e impacto. Para lo cual, se estableció la velocidad de la pistola para la deposición de resina-refuerzo sobre el molde de trabajo. Definidos los parámetros operativos, primeramente se elaboraron tableros donde la variable principal fue la posición del dosificador-posicionador de la bomba del catalizador (MEKP). Se probaron configuraciones en varias posiciones y una vez determinada la mejor mediante ensayos de tracción y flexión, se experimentó añadiendo gelcoat a las superficies del material compuesto obtenido. Se recalca que las probetas fueron curadas a temperatura ambiente durante un periodo de 15 días para que adquieran buenas propiedades mecánicas. Posteriormente, se decidió investigar el efecto de desarrollar diferentes tipos de curados. A continuación, con el compuesto que mostró un buen comportamiento a tracción y flexión se procedió a la elaboración de probetas para pruebas de impacto. Las probetas de impacto fueron ensayadas mediante el método de caída de dardo.

En el capítulo tres se exponen los resultados de la caracterización mecánica de los materiales fabricados, se realizan comparaciones con diferentes materiales compuestos obtenidos en trabajos de investigación previos, como lo son materiales compuestos reforzados con fibras naturales, y por último se presenta un breve análisis de costos de fabricación como tiempos promedio de producción.

Entre los resultados más importantes se tiene que el compuesto en la posición de bombeo del MEKP de (2,0-2,5) sin gelcoat y con curado a temperatura de 45°C durante 24 horas en la estufa, es el que muestra la mayor resistencia a la tracción, con un valor de 125 MPa. Esto representa un incremento de 349% con respecto a la matriz poliéster y esto contrasta con su rigidez que tiene un valor de

10.692 MPa. En cambio al curar las probetas al medio ambiente durante 15 días se tiene un valor de resistencia a la tracción de 81 MPa, que significa un aumento del 188%, pero la rigidez es únicamente de 5068 MPa. Por otro lado el compuesto con gelcoat presenta un buen acabado superficial en la parte que está en contacto con el molde, y exhibe el 155% y 7% de incremento respecto a la matriz en cuanto a su resistencia a tracción y rigidez respectivamente.

En cuanto a los ensayos de flexión, se tiene que el compuesto con las mejores propiedades es el que se obtiene con el dosificador de catalizador MEKP en la posición de (2,0-2,5) y sin gelcoat a una temperatura de 45°C durante 24 horas, teniendo un valor de resistencia a la flexión de 208 MPa que representa un incremento del 196% con respecto a la matriz. Los valores de esfuerzo máximo a flexión y módulo de la matriz poliéster son 70 y 2129 MPa respectivamente.

En el cuarto y último capítulo se detallan las conclusiones obtenidas en el desarrollo del presente proyecto, que surgieron del análisis de resultados y del proceso experimental. Por otro lado, se presentan las respectivas recomendaciones para estudios posteriores, tomando en cuenta las propiedades mecánicas y características del material.

Para finalizar, se presentan los diferentes anexos del proyecto. Entre ellos se encuentran la ficha técnica del poliéster como del gelcoat utilizado, el método de análisis comparativo ANOVA, el proceso de elaboración y planos del prototipo.

CAPÍTULO 1

MOLDEO POR ASPERSIÓN

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica orientada hacia las características y particularidades del moldeo por aspersión. Dentro de esta descripción se menciona al gelcoat, el cual es un recubrimiento que otorga un mejor acabado al material. Se trata además el proceso de laminado, el cual está inmerso dentro del moldeo por aspersión. Seguidamente, se realiza una descripción del roving de fibra de vidrio como material empleado como refuerzo para la obtención de los compuestos. De igual manera, se listan tanto las ventajas y desventajas de este proceso de fabricación como sus principales aplicaciones. Finalmente, se muestran las variables relevantes del proceso y se culmina con los objetivos y el alcance propuestos.

1.1 CARACTERÍSTICAS DEL MOLDEO POR ASPERSIÓN

El moldeo por aspersión (spray up) es un proceso de fabricación de materiales compuestos de molde abierto, de similares características al de estratificación manual, donde se rocían resina, catalizador y fibra sobre la superficie de un molde reutilizable. La resina y la fibra son aplicadas simultáneamente por un flujo combinado desde una pistola, que a la vez es cortadora de fibra y dosificadora de resina. La fibra que es cortada proviene de una bobina de fibra continua. Posteriormente el laminado de fibra y resina formado sobre el molde debe ser compactado manualmente con rodillos. No requiere aplicación de calor ni presión. En la Figura 1.1 se muestran los elementos característicos del proceso de moldeo por aspersión.

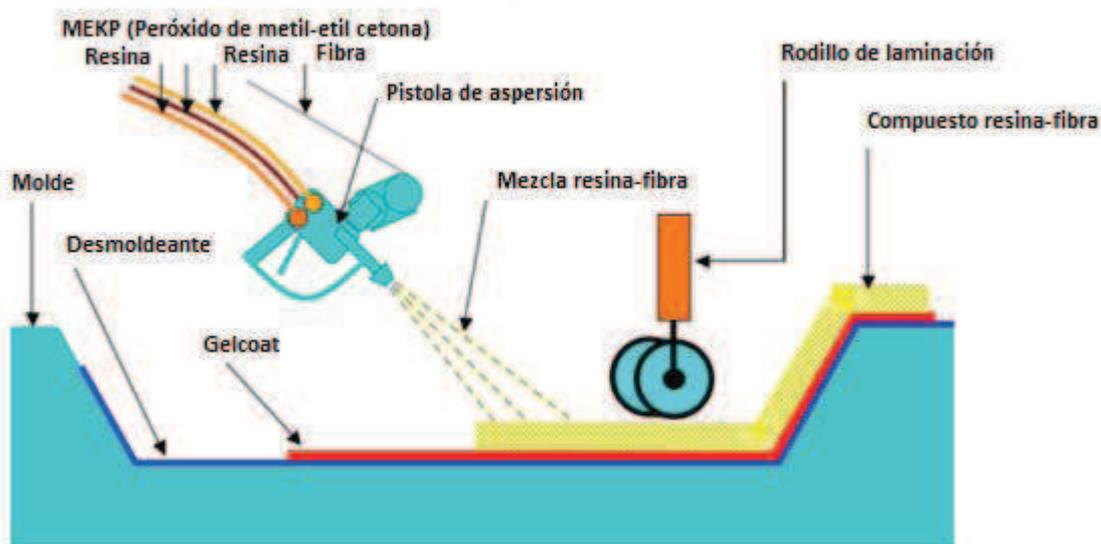


Figura 1.1. Elementos utilizados durante el moldeo por aspersión.¹

El refuerzo más usado para este proceso son los hilos continuos de fibra de vidrio, que se cortan en longitudes desde 10 hasta 40 mm y que son aplicados sobre el molde.² También se puede utilizar hilos de carbono o kevlar. Según datos bibliográficos, la fracción en peso de refuerzo en este proceso es típicamente de 20 a 40% del peso total de la pieza.³ En cuanto a la matriz, la resina que se usa con mayor frecuencia en este proceso es la resina poliéster ortoftálico, pero también suelen ser usadas las resinas de poliéster isoftálico, viniléster y poliuretano. Algunas propiedades mecánicas de materiales compuestos obtenidos mediante varios procesos de fabricación se indican en la Tabla 1.1.

¹http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spray_lay-up_process.png

²GOODMAN S., (1998), "*Handbook of thermoset plastics*", 2da Edición, Noyes Publications, Estados Unidos, pág. 144.

³<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/moldeo-por-spray-espreado-de-materiales.html>

Tabla 1.1. Ejemplos de propiedades mecánicas basadas en procesos de fabricación, para fibra de vidrio tipo E.⁴

Proceso de fabricación del compuesto	Resistencia a la tracción	Resistencia a la flexión	Módulo de flexión
	MPa (ksi)	MPa (ksi)	GPa (ksi x 10 ³)
Estratificación manual/ Moldeo por aspersión	68,9(10,0)	117,2 (17,0)	1,0 (6,9)
Moldeo de compuesto a granel	20,7(3,0)	68,9(10,0)	11,0(1,6)
Moldeo de compuesto de lámina	68,9(10,0)	151,7(22,0)	10,3(1,5)
Preformado estructural con mat	103,4 (15,0)	206,8 (30,0)	9,0(1,3)
Preformado estructural con mat de baja contracción	72,4(10,5)	165,5 (24,0)	7,6(1,1)
Pultrusión (longitudinalmente)	206,8 (30,0)	206,8 (30,0)	17,2 (2,5)

Otra materia prima empleada es el gelcoat, el cual es un material utilizado para proporcionar un acabado de alta calidad en la superficie visible del material polimérico compuesto. La formulación general para preparar un gelcoat se señala en la Tabla 1.2. Cabe indicar que las concentraciones varían dependiendo del gelcoat.

Tabla 1.2. Fórmula general de un gelcoat típico.

Ingrediente	Partes en peso
Resina poliéster flexible	0 a 50
Resina poliéster elástica	50 a 100
Cargas	0 a 25
Diluyente	0 a 30
Acelerador	1/10 a 1
Inhibidor	1/10 por millón
Colorantes	2 a 15
Agente tixotrópico	½ a 5
Catalizador	½ a 3

⁴LEVY F., (2006), "Compósitos Estructurais: Ciencia e Tecnologia", 1ra Edición, Edgard Blucher, Brasil.

Por otro lado se utilizan rellenos (carbonato de calcio en un porcentaje de 5 al 25% en peso) para abaratar costos, y aditivos (ceras) para reducir la emisión de estireno durante el laminado.⁵

Cabe señalar que los moldes por lo general son de acero, aluminio, madera o plástico reforzado con fibra de vidrio; otros materiales también pueden ser utilizados para la creación de prototipos. El molde puede ser de tipo macho (convexo), o tipo hembra (cóncavo). Para hacer las bañeras, por ejemplo, se utiliza un molde macho como se muestra en la Figura 1.2. En el sector de la navegación para hacer los cascos de barcos, se utiliza un molde hembra de un solo lado, hecho a partir de FRP (plástico reforzado con fibra). La capa exterior del molde se refuerza con un marco de madera.



Figura 1.2. Proceso de aspersión (molde convexo).⁶

⁵SANJAY K., (2002), *“Composites Manufacturing: materials, product and process engineering”*, CRC Press, Estados Unidos.

⁶<http://www.compositesworld.com/articles/automating-swimming-pool-production>.

1.1.1 MÁQUINA DE MOLDEO POR ASPERSIÓN

Es una máquina de accionamiento neumático utilizada generalmente para altos volúmenes de producción. Al ser una máquina neumática necesariamente para su accionamiento necesita de un equipo de generación de aire comprimido. Esta máquina se encarga de bombear resina y catalizador (MEKP) simultáneamente. Estos materiales se encuentran almacenados en recipientes contenedores y son transportados a través de mangueras hacia la pistola de aspersión. En la Figura 1.3 se señala un esquema general del sistema de funcionamiento de la máquina de aspersión.

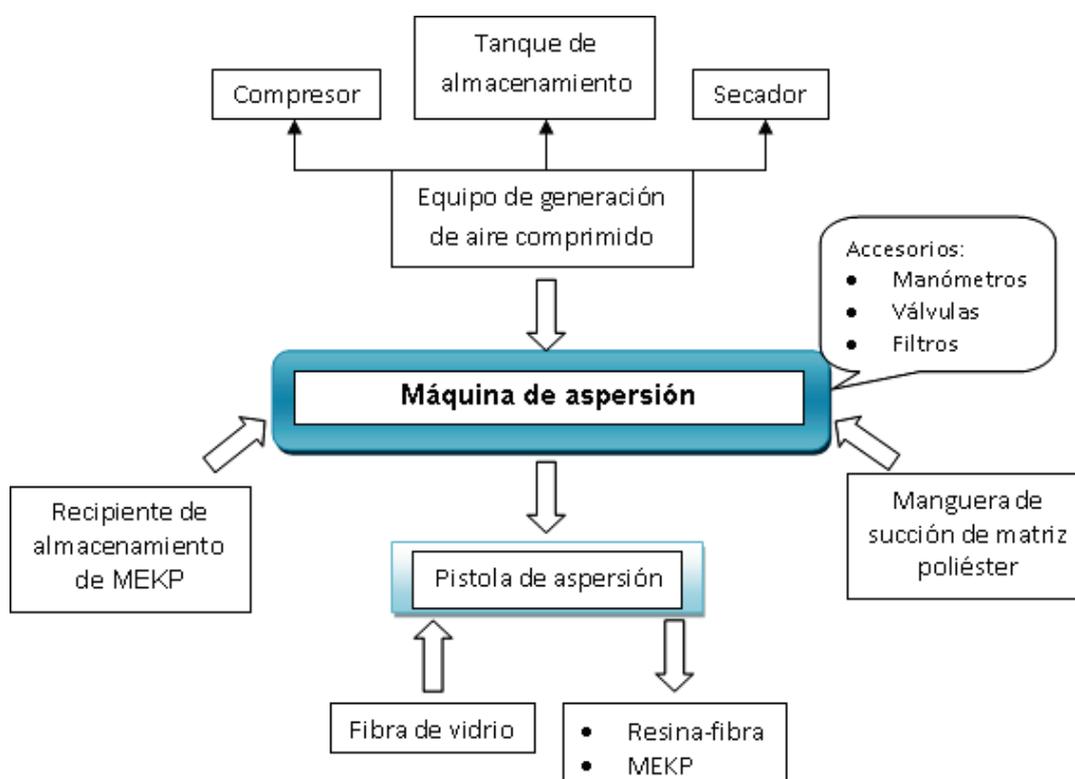


Figura 1.3. Esquema del sistema de la máquina de aspersión.

El sistema de bombeo de resina empleado por las máquinas de aspersión se basa en una “bomba de pistón de acción doble”, la cual entrega material en carrera tanto ascendente como descendente. En cuanto a la bomba del MEKP, se conecta mediante una articulación a la bomba de la resina teniendo una relación

fija entre resina y catalizador. Por lo tanto, nunca existirá deficiencia de ninguno de los componentes en el proceso.

En la Figura 1.4 se enumeran e identifican varios de los componentes básicos que poseen las máquinas de moldeo por aspersión:

- 1) Pistola de aspersión
- 2) Filtro de partículas
- 3) Bomba de resina
- 4) Válvula de alivio
- 5) Bomba de catalizador (MEKP)



Figura 1.4. Identificación de componentes de la máquina de aspersión: 1. Pistola de aspersión; 2. Filtro de partículas; 3. Bomba de resina; 4. Válvula de alivio; 5. Bomba de catalizador (MEKP).⁷

⁷http://fibermaq.com.br/inter_fli-10.html

Para el funcionamiento del equipo de aspersión (dependiendo de los requerimientos del operador y los materiales a usar), existen manómetros, válvulas y posicionadores que ayudan a controlar y mantener parámetros fijos en el proceso de moldeo. Es así que las máquinas poseen varios reguladores dependiendo de sus características, tipo y fabricante. En la Figura 1.5 se observan tres válvulas con sus respectivos manómetros que regulan las siguientes presiones:

- 1) Válvula de regulación de presión en la línea principal de aire.
- 2) Válvula de regulación de la presión de bombeo de resina/catalizador.
- 3) Válvula de regulación de la presión de atomización del catalizador.

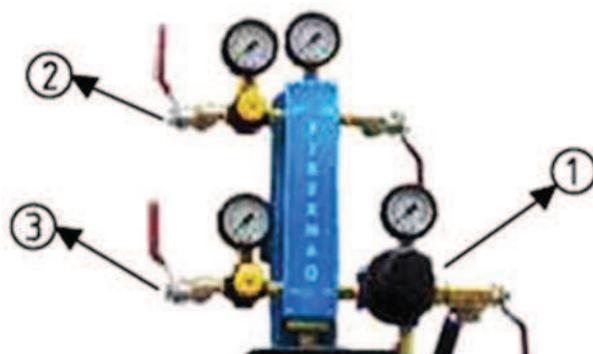


Figura 1.5. Válvulas y manómetros de control de presión de la máquina de aspersión: 1. Válvula de regulación de presión en la línea principal de aire; 2. Válvula de regulación de la presión de bombeo de resina/catalizador; 3. Válvula de regulación de la presión de atomización del catalizador.

La bomba del MEKP posee un posicionador, que establece la posición de bombeo de MEKP mediante un tornillo. Este posicionador tiene en la mayoría de casos, rangos de 0,5 – 3,5 con divisiones de 0,5. En la Figura 1.6 se observa el posicionador (1) y el tanque de almacenamiento del MEKP (2).



Figura 1.6. Posicionador de bombeo del catalizador y su almacenamiento: 1. Posicionador; 2. Tanque de almacenamiento del MEKP.⁸

La pistola de aspersión tiene la capacidad de regular la cantidad de fibra a cortar. Para esto, incorpora un motor de aire de alta potencia acoplado en la parte superior, que comprende un rodillo de caucho, un rodillo porta cuchillas, una prensa de rodillo y un conducto de aire para la expulsión de las fibras de la cámara de corte. Para regular la cantidad mínima de corte de la fibra se abre o cierra un tornillo que permite controlar el ingreso de aire al motor, como se observa en la Figura 1.7.

- 1) Motor de aire de corte de fibra.
- 2) Tornillo de regulación de ingreso de aire.
- 3) Boquilla de la pistola.

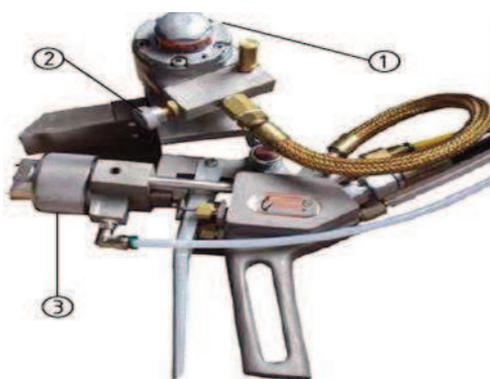


Figura 1.7. Pistola de aspersión: 1. Motor de aire de alta potencia; 2. Regulador de aire; 3. Boquilla de resina-catalizador.⁹

⁸http://fibermaq.com.br/inter_fli-10.html

Es preocupación permanente de los fabricantes de estos equipos reducir los desechos que se producen en este proceso, así como emisiones nocivas (de estireno) para el medio ambiente y operarios. Es por esto que se han desarrollado algunos tipos de pistolas de aspersión. Cada una de ellas con diferentes características, pero en general todas con el objetivo de obtener patrones de rociado con mayor uniformidad y facilidad de operación. Entre los diferentes tipos de pistolas que existen en el mercado se encuentran pistolas de mezcla interna, pistolas de mezcla externa, de distribución, de mezcla turbulenta, sin utilización de aire, de atomización de aire, etc.

La pistola de aspersión es un elemento esencial en el equipo de moldeo. Para ello, entre sus principales características, deben ser capaces de proveer las siguientes prestaciones:

- “Facilidad de inicio de operación con precisión y repetitividad, con una precisión del sistema dosificador de la bomba de resina instalado en una proporción 12:1. En muchos equipos este sistema dosificador tiene un dispositivo de anclaje piñón posicionador, el cual permite seleccionar mediante un dial, la posición de suministro del catalizador entre rangos del 0,5 al 3%”.¹⁰
- “La pistola debe poder usarse con una serie de juegos de boquillas, lo cual permite tener una variedad de tipos de patrones de rociado, permitiendo al operador seleccionar la boquilla de acuerdo a las necesidades de trabajo”.¹¹

A continuación se describe una serie de tipos de pistolas comúnmente usadas en la industria.

⁹http://fibermaq.com.br/inter_fli-10.html

¹⁰⁻¹⁰ROSATO D., (2004), “*Reinforced Plastics Handbook*”, Oxford: Elsevier Science & Technology, pág. 297.

Pistola de mezcla interna sin flujo de aire¹²

Este sistema utiliza baja presión hidráulica de atomización en una bomba de desplazamiento positivo. El catalizador y la resina se mezclan en una cámara interna de la pistola y posteriormente son rociadas hacia afuera de la cámara de la pistola. La entrega de catalizador y resina se realiza en proporciones exactas. Este tipo de pistola garantiza una mezcla efectiva de los materiales empleados, presentando además reducciones significativas de emisiones de estireno y residuos ya que se previenen atomizaciones excesivas de los materiales. Por ejemplo, se ha determinado que en pistolas de baja presión de mezcla interna se producen emisiones de 5 ppm.

Pistola con mezclador turbulento¹³

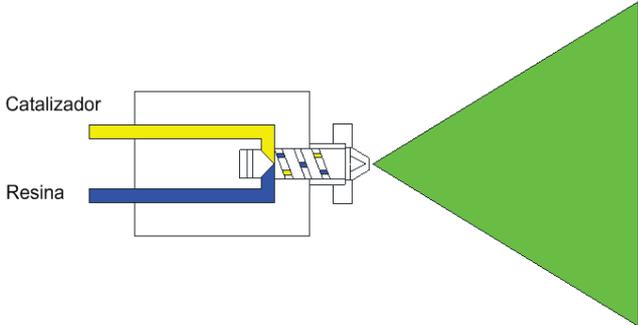
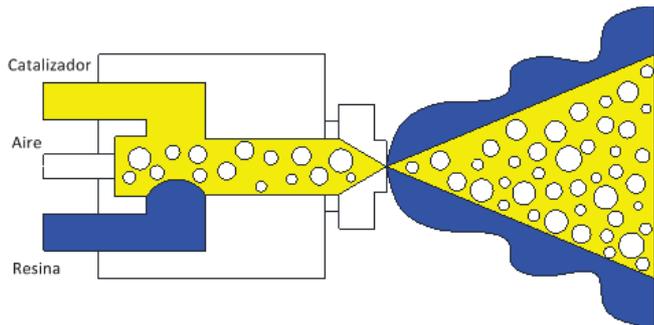
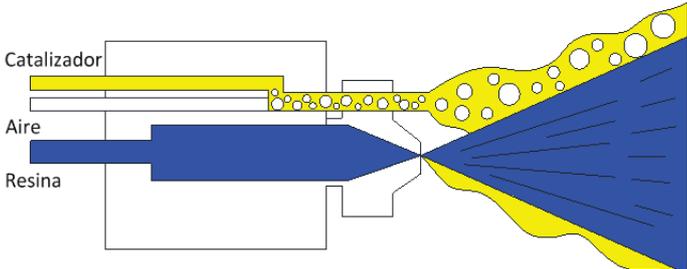
Estas pistolas emplean un dispositivo mezclador turbulento incorporado en la cabeza de la pistola, el cual mezcla la resina y el catalizador completamente. El dispositivo de mezclado turbulento generalmente consiste en una espiral continua con muchos cortes transversales, lo que asegura la mezcla completa de los materiales. La incorporación de este accesorio en la cabeza de la pistola mejora el rendimiento del equipo de aspersión, ya que se reduce la cantidad de aire atrapado en la mezcla. Es así, que se reduce las emisiones y los desechos, obteniéndose además un laminado de mejor calidad ya que la cantidad de aire atrapado en el compuesto es menor que en sistemas de mezcla externa.

Pistolas de mezcla externa¹⁴

Estas pistolas utilizan un flujo de aire a presión media (30 – 90 psi) para mezclar resina y catalizador externamente, es decir, en el momento en que abandonan la pistola de aplicación. Su desempeño es menor ya que se atrapa aire en la mezcla, lo que implica una disminución de la calidad del material, además de las pérdidas por salpicaduras y evaporaciones son mayores que en otros sistemas. Los diferentes métodos de rociado utilizados en pistolas se describen en la Tabla 1.3.

^{12_12_13}ROSATO D., (2004), "*Reinforced Plastics Handbook*", Oxford: Elsevier Science & Technology, pág. 297-299.

Tabla 1.3. Métodos de rociado utilizados en el proceso de moldeo por aspersión.¹⁵

Métodos y esquemas de funcionamiento
<p>Mezcla interna: Se produce a baja presión o sin aire. Produce un patrón de rociado preciso y controlado con muy pocas salpicaduras.</p> 
<p>Mezcla con aspiración de aire: Turbulencia desde pequeñas gotas de aire inyectadas las cuales generan la expansión del patrón de rociado y dispersan el material finamente atomizado al aire, creando salpicaduras.</p> 
<p>Mezcla externa: Dispersa pequeñas partículas de catalizador y resina, las cuales son mezcladas fuera de la boquilla de aspersión. Puede ser difícil hacer coincidir los diferentes ángulos de las boquillas y obtener los mismos resultados.</p> 

¹⁵ROSATO D., (2004), "Reinforced Plastics Handbook", Oxford: Elsevier Science & Technology, pág. 295.

1.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El proceso de moldeo por aspersion es muy similar al moldeo por estratificación manual. Sus etapas principales se describen a continuación.¹⁶

- i) Primero se aplica sobre el molde un agente de liberación (desmoldante).
- ii) Luego se aplican capas de gelcoat y se deja curar a temperatura ambiente o en un horno.
- iii) Una vez que el gelcoat se cura, se utiliza una pistola rociadora para depositar la mezcla de resina, catalizador y fibra sobre la superficie del molde. La pistola rociadora cuenta con un dispositivo de cuchillas para cortar los hilos continuos (uno o más hilos) a una longitud predeterminada y ser esparcidos junto con la mezcla de resina y catalizador.

En la Figura 1.8 se puede observar como la resina y la fibra de vidrio se mezclan a la salida de la boquilla de la pistola de aspersion. De igual manera, a la salida de la pistola se adiciona catalizador MEKP de manera que se obtiene una mezcla equilibrada.



Figura 1.8. Pistola rociadora de resina y fibra de vidrio.¹⁷

¹⁶SANJAY K., MAZUMDAR, (2002), *Composites Manufacturing: materials, product and process engineering*, CRC Press, Estados Unidos.

¹⁷<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/moldeo-por-spray-espreado-de-materiales.html>

- iv) Una vez que el material se rocía en el molde, se utilizan brochas o rodillos para eliminar el aire atrapado, así como para asegurar la buena humectación de la fibra.
- v) Nuevas capas de tejido de fibra de vidrio se agregan al laminado, en función de los requisitos de rendimiento. Usualmente se intercala el material atomizado con capas de tejido de refuerzo para obtener mayor resistencia en determinadas áreas de la pieza.
- vi) Con la pieza en el molde, antes del curado, se pueden recortar sobrantes, de ser necesario, con una herramienta cortante.
- vii) El curado de la resina se puede realizar a temperatura ambiente y puede tomar de dos a cuatro horas para su endurecimiento, dependiendo de la formulación de la resina. Transcurrido un periodo de 15 días, para que adquiera las mejores propiedades físicas y mecánicas, la pieza puede someterse a un acabado superficial.

En métodos más avanzados, el rociado puede ser realizado en forma automatizada mediante el uso de robots, lo que permite un mayor control del espesor y propiedades uniformes de las capas de material compuesto. En la Figura 1.9 se ilustra el equipo empleado en un proceso de moldeo por aspersión completamente automatizado.



Figura 1.9. Brazo robótico para moldeo por aspersión.¹⁸

¹⁸<http://www.compositesworld.com/articles/automating-swimming-pool-production>.

1.1.3 APLICACIÓN DE GELCOAT

El gelcoat puede ser aplicado con pistola, rodillo o brocha. Para obtener mejores resultados, se recomienda la aplicación con pistola, como se muestra en la Figura 1.10, ya que permite la laminación de capas de mayor uniformidad y espesor. El gelcoat aplicado con brocha puede presentar estrías y poca uniformidad en el espesor, lo que perjudica la calidad del acabado. Se pueden usar los rodillos de pintor como alternativa en ambientes cerrados o lugares de difícil acceso. La pistola para la aplicación de gelcoat es similar a la de resina con excepción que no posee el conjunto de piezas para cortar la fibra de vidrio. En la Figura 1.10 se observa la aplicación de gelcoat y su correspondiente pistola de aplicación.

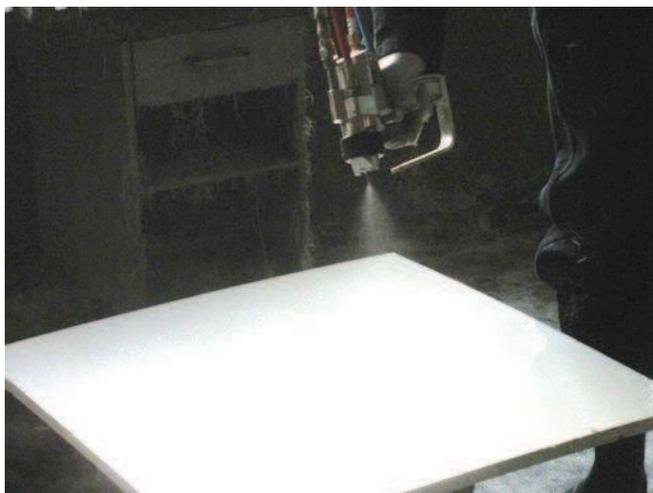


Figura 1.10. Aplicación de gelcoat mediante pistola.

Las capas muy gruesas de gelcoat son quebradizas y pueden presentar grietas superficiales. Las capas muy delgadas son susceptibles a arrugarse, debido al ataque del estireno de la resina de laminación.¹⁹El gelcoat al estar en contacto con la superficie de la pieza a reproducir, deberá ser aplicado mediante un procedimiento adecuado, de la siguiente manera:

¹⁹<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/gelcoat.html>

- a) Aplicar de tres a cinco capas de agente desmoldante, procurando pulir entre capa y capa para mejorar el brillo de la pieza.
- b) Una vez pulido el molde, se utiliza una pistola rociadora para depositar la mezcla de gelcoat y catalizador sobre la superficie del molde. Será necesario rociar de dos a tres veces hasta alcanzar un espesor aproximado entre 500 y 700 μm .²⁰
- c) El tiempo de curado de la mezcla tomará aproximadamente de dos a cuatro horas, dependiendo de la cantidad de catalizador empleado. Luego de lo cual se aplica la resina con el respectivo refuerzo de fibra de vidrio.

Para evitar inconvenientes durante la aplicación de la capa de gelcoat es necesario tener presente las siguientes precauciones:

- La cera de desmolde debe ser cuidadosamente distribuida y pulida sobre la superficie del molde, evitándose la acumulación o excesos localizados. De preferencia se debe usar cera sin silicón.
- Si se utiliza la aplicación por aspersión, el aire de atomización debe estar limpio y seco, sin contaminación de aceite o humedad provenientes del compresor. El aire que sale del compresor es portador de agua y partículas de desgaste del mismo, que en gran parte obstruyen válvulas, producen pérdidas de carga en cañerías y deterioran la máquina. Es así, que a través de la línea del compresor se usan secadores y filtros que retienen partículas hasta un diámetro de 2mm, generando una calidad excelente del aire.
- No se debe empezar el moldeo sobre el gelcoat antes de que alcance el estado de "toque".²¹ Ese estado se caracteriza por el curado parcial del gelcoat, y es cuando el moldeador puede tocar la superficie sin mancharse los dedos. Si se inicia el moldeo antes del estado de toque, el estireno contenido en la resina de laminación puede atacar y arrugar el gelcoat.

²⁰CAMPBELL F, (2004), *"Manufacturing processes for advanced composites"*, Elsevier Ltd., Inglaterra, pág. 402.

²¹<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/gelcoat.html>

Además, esto puede provocar una disminución de las propiedades mecánicas del material ya que generan concentradores de esfuerzos.

1.1.4 PROCESO DE LAMINACIÓN

Durante la aspersion necesaria se requiere un proceso de laminación, ya que al moldear la pieza se necesita humectar y retirar el exceso de fibra de vidrio que se acumula en varias zonas del molde. Este proceso se realiza de manera posterior a la aplicación simultánea de las capas de matriz y refuerzo en el material compuesto. Básicamente se necesita una brocha o un rodillo de acero para laminar el material compuesto, como se puede observar en la Figura 1.11.



Figura 1.11. Rodillos de acero para laminación de resina y fibra de vidrio.²²

La necesidad de laminar el material radica en las siguientes ventajas:

- Mejora la compactación e impregnación de las fibras, otorgando una mayor cantidad de refuerzo en un mismo volumen sin laminar.
- Retira el exceso de fibra de vidrio, para lograr una humectación adecuada de las fibras.
- Disminuye la cantidad de burbujas de aire que se forman durante el proceso.

²²<http://www.nauticexpo.es/prod/es-manufacturing/rodillos-para-laminacion-de-material-compuesto-para-astillero-naval-39266-293328.html>

- Facilita el moldeo de formas o geometrías complicadas que puedan presentar los moldes.

Es así que el moldeo por aspersión requiere operaciones complementarias de laminación, lo que lo diferencia de otros procesos de moldeo.

1.2 MATERIALES EMPLEADOS EN EL MOLDEO POR ASPERSIÓN

Entre los principales materiales utilizados para el moldeo por aspersión se encuentran la resina poliéster, los gelcoats y los refuerzos. A continuación se dan algunas características de estos materiales.

1.2.1 RESINA POLIÉSTER

Las resinas son sustancias líquidas que pueden pasar al estado sólido mediante una reacción química provocada por un agente externo. Por sí solas presentan una resistencia mecánica baja, razón por la cual es común combinarlas con refuerzos como la fibra de vidrio, que son los que aportan una mayor resistencia mecánica. Se debe mencionar además que en muchas ocasiones se hace necesaria la adición de estireno monómero a la resina, con el objetivo de disminuir su viscosidad y mejorar la mojabilidad de las fibras, lo cual es importante para alcanzar una adecuada interfaz matriz-refuerzo. Todos estos elementos se utilizan conjuntamente con la resina, pero hay que tomar en cuenta que la cantidad de cada uno de ellos viene recomendada por el fabricante dentro de la ficha técnica.

Existen diferentes clases de resinas, entre las que se encuentran las poliéster, viniléster y epoxi. Estas últimas presentan mejores características de adhesión y resistencia al agua, aunque tienen un elevado precio. En las construcciones de piezas a nivel industrial como barcos, son utilizadas las de poliéster, de las que a su vez se puede hablar principalmente de dos tipos:

- Resinas isoftálicas, tienen mejores propiedades que las ortoftálicas, sobre todo porque son más resistentes al agua, ya que tienen una absorción de humedad casi nula.
- Resinas ortoftálicas, son utilizadas comúnmente en embarcaciones siempre y cuando se utilicen en las capas exteriores. Se usan debido a su precio más bajo.

En la Tabla 1.4 se indican algunos ejemplos de propiedades del poliéster insaturado con varios refuerzos de fibra corta, mientras. En la Tabla 1.5 se muestran algunos ejemplos de propiedades obtenidas con diversas matrices para dos tipos de refuerzo de fibra de vidrio.

Tabla 1.4. Ejemplos de propiedades de la resina poliéster insaturada (UP), reforzada con fibra corta.²³

Matriz	UP, antiestático	UP	UP	UP modificada, melamina
Relleno	Desconocido	Fibra textil	Fibra de vidrio corta	Celulosa
Densidad, g/cm ³	1,7-1,73	1,7-1,8	1,9-2,1	1,7-1,9
Resistencia a la tracción, MPa	30-62	-	-	-
Resistencia a la flexión, MPa	90-140	60-80	60-100	60-90
Módulo elástico a flexión, GPa	9-11	-	-	-

²³BIRON M., (2004), "Thermosets and composites: Technical information for plastics users", Elsevier Ltd, pág. 219.

Tabla 1.5. Propiedades de diferentes matrices con dos tipos de refuerzo de fibra de vidrio.²⁴

Matriz	UP	PP	UP	EP
Refuerzo	Malla de fibra de vidrio	Malla de fibra de vidrio	Tela de fibra de vidrio	Tela de fibra de vidrio
Fracción volumétrica (vol %)	30	30	65	65
Densidad, g/cm ³	1,4	1,14	1,9	1,9
Resistencia a la tracción, MPa	100	90	300	400
Módulo elástico a tracción, GPa	6	4,5	15	24

UP:poliéster insaturado; PP: polipropileno; EP: epoxi

1.2.2 GELCOAT

Los gelcoats son resinas modificadas que se aplican en estado líquido sobre los moldes. Los más comunes están basados en resinas epoxi o resinas poliéster insaturadas. Los gelcoats se curan a la forma de polímeros entrecruzados y, posteriormente, son cubiertos con matrices de polímeros compuestos, a menudo mezclas de resina de poliéster y fibra de vidrio o resina epoxi con fibra de vidrio o carbono. El componente fabricado, una vez curado y retirado del molde, presenta en la superficie una capa de gelcoat.

Los gelcoats están diseñados para ser duraderos, proporcionando resistencia a la radiación ultravioleta y la degradación por hidrólisis. Es por eso que varios de éstos, pueden ser utilizados para la fabricación de los moldes que a su vez se utilizan para la fabricación de componentes. Estos moldes requieren niveles muy altos de resistencia para superar los esfuerzos mecánicos y térmicos producidos durante los procesos de curado y desmolde.

Una de las funciones del gelcoat es proporcionar un acabado superficial a las piezas, lo que hace innecesaria la pintura convencional. Las diferencias principales entre el gelcoat y las pinturas son:²⁵

²⁴BIRON M., (2004), "Thermosets and composites: Technical information for plastics users", Elsevier Ltd, pág. 370.

- El gelcoat coloreado requiere menor cantidad de pigmento que el utilizado por las pinturas, cubriendo la misma superficie y obteniéndose el mismo color. Esto es una consecuencia directa de su mayor espesor comparado al de las pinturas.
- Generalmente se aplica el gelcoat sobre los moldes. Las capas de pintura se aplican siempre sobre la pieza.
- El gelcoat puede ser lijado y pulido fácilmente para eliminar rayas y manchas. Las pinturas, debido a su bajo espesor, tienen que ser pulidas cuidadosamente para evitar exponer el sustrato.
- El gelcoat está formulado a base de resinas poliéster termoestables. Las pinturas pueden ser formuladas con varios tipos de resinas, ya sean termoplásticos o termoestables.
- Las pinturas generalmente se secan por la evaporación de solventes, lo que deja sobre la superficie una película polimérica sólida. El gelcoat se cura debido a una reacción química entre el solvente y la resina poliéster.

En la Tabla 1.6 se mencionan las fallas más comunes en la aplicación de gelcoat, así como sus causas probables y correcciones.

²⁵<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/gelcoat.html>

Tabla 1.6. Fallas, causas probables y soluciones en la aplicación del gelcoat.²⁶

Falla	Causa probable	Solución
Baja opacidad del gelcoat, lo que permite el paso de la luz.	<ul style="list-style-type: none"> - Poco espesor de la capa de gelcoat. - Bajo contenido de pigmentos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentar el espesor del gelcoat (mínimo 0,3mm). - Aumentar el contenido de pigmentos.
Insuficiente dureza del gelcoat.	<ul style="list-style-type: none"> - Curado incompleto. - Exceso de agua en el MEKP. - Contaminación del gelcoat por la cera desmoldante. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ajustar la concentración del catalizador (puede ocurrir el curado incompleto por exceso o escasez de catalizador). - Usar MEKP de buena calidad, sin agua. - Esperar que seque la cera desmoldante, antes de aplicar el gelcoat. - Evitar el trabajo a temperaturas muy bajas.
Cuarteaduras o grietas en el gelcoat (esa falla ocurre en la capa curada ya en uso).	<ul style="list-style-type: none"> - Exceso o escasez de catalizador. - Rotura del gelcoat, debida a impacto o deformación excesiva. - Capa muy gruesa de gelcoat. - Resina quebradiza o con exceso de estireno. 	<ul style="list-style-type: none"> - Evitar los refuerzos muy rígidos. - Aumentar el espesor de la pieza. - Ajustar la cantidad de catalizador - Evitar diluir el gelcoat en exceso de estireno. - No exceder el espesor máximo de 0,5 mm de gelcoat.

²⁶ <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/gelcoat.html>

Falla	Causa probable	Solución
El gelcoat no forma una película continua y nivelada, de manera que surgen pequeños cráteres.	<ul style="list-style-type: none"> - Contaminación del molde, lo que impide la distribución del gelcoat. - Contaminación del gelcoat o aire de la atomización 	<ul style="list-style-type: none"> - Lavar la superficie del molde con agua y detergente, antes de aplicar el desmoldante. - Evitar ceras que contengan silicón. - Revisar la línea de aire, teniendo la precaución de evitar que se contamine con el aceite del compresor.
Falta de brillo.	<ul style="list-style-type: none"> - Pieza retirada del molde antes de completar el curado. - Desmoldante húmedo. - Molde sin brillo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Esperar que se complete el curado antes de retirar la pieza del molde. - Limpiar y pulir la superficie del molde.
Porosidades superficiales con apariencia de "agujeros de alfiler".	<ul style="list-style-type: none"> - El gelcoat no puede ser distribuido en la superficie del molde. - Agua en el MEKP. - Suciedad en el molde. - Aire retenido en el gelcoat. - Agua en el aire de atomización. - Curado forzado usando acetona u otros solventes para reducir la viscosidad del gelcoat. - Gases provenientes de la descomposición de agua oxigenada en el MEKP. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminuir la cantidad de carga del gelcoat. - Revisar la humedad del MEKP - Usar solo aire seco para la atomización. - Limpiar el molde. - Reducir la presión del aire de atomización. - Esperar que seque el desmoldante antes de aplicar el gelcoat. - Aplicar dos manos de gelcoat. - Reducir la temperatura de la estufa. - No usar acetona para eliminar la viscosidad. - Usar un MEKP sin agua oxigenada.

1.2.3 REFUERZOS

Los refuerzos de los compuestos pueden tener forma de partículas, fibras, tejidos, láminas, etc. Las fibras presentan características inherentes a su naturaleza, las mismas que determinan su utilidad al momento de emplearlas como refuerzo de matrices poliméricas. Es importante destacar que cuando se elige una fibra como refuerzo, se deben tomar en cuenta algunos parámetros importantes que determinarán la facilidad de su producción y el rendimiento que estas presentarán.

1.2.3.1 Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio, constituyen los materiales de refuerzo más ampliamente utilizados en la fabricación de materiales compuestos. El uso de estas fibras constituye alrededor del 90% de todos los refuerzos empleados con resinas termoplásticas y termoestables. Lo que las ha convertido en un refuerzo versátil y rentable para la elaboración de materiales compuestos, son principalmente dos aspectos:

- i) La gran variedad de formas en las que se encuentran disponibles en el mercado, por ejemplo: mats, tejidos, hebras e hilos, rovings, etc.
- ii) La adaptabilidad de dichas formas a muchos de los procesos de fabricación desarrollados, como estratificación manual, moldeo por aspersión, moldeo por transferencia de resina, etc.

Además, el refuerzo de fibra de vidrio es uno de los más utilizados, debido a su bajo costo, alta resistencia mecánica y buena resistencia a la acción de agentes químicos. Las desventajas de esta fibra están asociadas al bajo módulo de elasticidad, auto-abrasión y a la baja resistencia a la fatiga cuando es agregada al compuesto. En la Tabla 1.7 se muestran composiciones típicas de esta fibra.

Tabla 1.7. Composición de fibras de vidrio utilizadas en la manufactura de compuestos.²⁷

Componentes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
Vidrio E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
Vidrio C	65	4	5	3	14	8,5
Vidrio S	65	25	-	10	-	-

Las fibras de vidrio tienen una conductividad térmica equivalente a 1,3 W/m.K y un calor específico de 850 J/kg.K. La composición del vidrio puede variar significativamente las propiedades de la fibra obtenida, como se puede observar en la Tabla 1.8. Las fibras de vidrio tipo S tienen una dificultad inherente de ser estiradas debido a la estrecha banda de temperatura para formación de filamento y, por tanto, son las más costosas.

Tabla 1.8. Propiedades de fibras de vidrio utilizadas como refuerzo en compuestos.²⁸

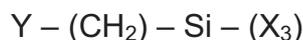
Tipos de fibra cerámicas	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio AR
Masa específica (g/cm³)	2,54	2,55	2,70
Módulo de elasticidad (GPa)	70	86	75
Resistencia a tracción (GPa)	2,40	2,80	1,70
Módulo específico (mm)	1,65-2,20	34	34

Aunque el desempeño de las fibras de vidrio tipo E es satisfactorio en ambientes acuosos neutros, se tornan susceptibles a la degradación en ambientes ácidos y alcalinos. Por esta razón las fibras de vidrio tipo C, son utilizadas en forma de velo para barreras químicas en equipamientos y embalses químicos, y fibras de vidrio de tipo AR para refuerzo de cemento. Las fibras AR contienen dióxido de zirconio (ZrO₂) y óxido de sodio (NaO₂) que confieren resistencia a la corrosión generada por la alcalinidad del cemento.

La adhesión de fibra de vidrio a matrices poliméricas es promovida por medio de enlaces de tipo organosilanos. Estos compuestos orgánicos forman una unión

²⁷⁻²⁸LEVY F.,(2006), “*Compósitos Estructurais: Ciencia e Tecnologia*”, 1ra Edición, Edgard Blucher, Brasil, págs. 61, 63.

estable entre materiales orgánicos e inorgánicos, porque su estructura tiene grupos de afinidad orgánica, conforme representa la estructura genérica:



Donde: Y representa los grupos con afinidad orgánica, y X representa los grupos con afinidad inorgánica.

En la Tabla 1.9 se presentan algunas propiedades de fibras de refuerzo empleadas en la fabricación de composites, su costo relativo, así como el de productos metálicos para propósitos de comparación.

Tabla 1.9. Propiedades de algunos tipos de fibras de refuerzo empleados en la fabricación de materiales compuestos y de productos metálicos.²⁹

Material	Diámetro	Densidad	Módulo a tracción	Resistencia a la tracción	Elongación a la rotura	Costo relativo
	μm	g/cm ³	GPa	GPa	%	
Tipo E	7	2,54	70	3,45	4,8	Bajo
Tipo S	15	2,50	86	4,50	5,7	Moderado
Grafito (alta resistencia)	7,5	1,7	240	2,6	0,8	Alto
Boro	130	2,6	400	3,5	---	Alto
Kevlar 29	12	1,45	80	2,8	3,5	Moderado
Kevlar 49	12	1,45	130	2,8	2,5	Moderado
Acero		7,8	208	0,34-2,1	5-25	<Bajo
Aleaciones de aluminio		2,8	69	0,14-0,62	8-16	Bajo

1.2.3.2 Roving de fibra de vidrio

Esta fibra de vidrio está formada por mechas que contienen varios filamentos enrollados. Su sistema de designación es por ejemplo, 2400 (60), lo cual indica que es de 2400 tex y de 60 cabos (60 g/1000 m) por cada mecha. El roving de fibra de vidrio es empleado en el proceso de moldeo por aspersión. En este proceso la fibra es alimentada a la pistola cortadora (chopper), la cual corta la

²⁹SANJAY K., (2002), "Composites Manufacturing", Florida: CRC Press LLC, pág. 24.

fibra de vidrio en longitudes predeterminadas y va directamente a un flujo de resina, donde la combinación de estos materiales es dirigida a la cavidad del molde. El roving para pistola es manufacturado a partir de filamentos continuos de fibra de vidrio, sin torceduras mecánicas y es empacado en tubos que se entregan listos para ser usados en las operaciones del cliente. También debe contener aprestos especiales para mejorar su manipulación y optimizar el enlace fibra-resina en el compuesto.

Un buen hilo roving para pistola debe tener las siguientes características:

- Tener baja estática y poca pelusa
- Aumentar la calidad del laminado y reducir los desperdicios.
- Ser compatible con los tipos de equipos de aspersión.
- Presentar fácil humectación, además de buena dispersión.

En la Figura 1.12 se muestran las distintas presentaciones comerciales de la fibra de vidrio, tales como: fibra corta, mats, tejidos y mechas (roving).

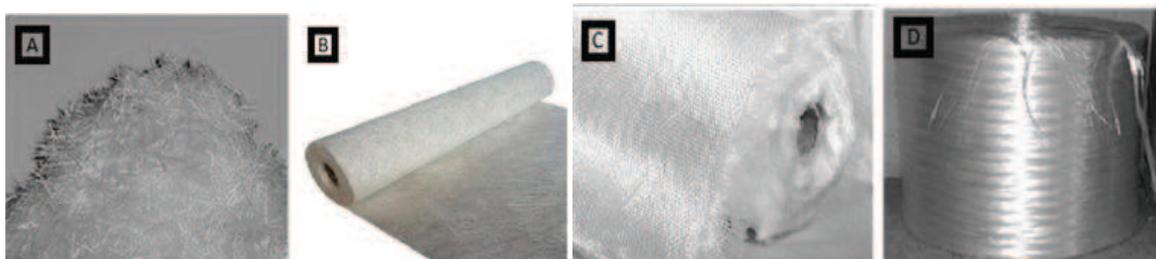


Figura 1.12. Presentaciones de la fibra de vidrio: (a) Fibra corta; (b) Mats; (c) Tejido; (d) Mechas.³⁰

³⁰http://es.made-in-china.com/tag_search_product/Woven-Roving_nrrsy_1.html.

En la Tabla 1.10 se presentan las principales propiedades mecánicas de dos diferentes matrices termoestables, reforzadas con fibras sintéticas.

Tabla 1.10. Ejemplo de propiedades de materiales compuestos.³¹

Matriz	UP	UP	Uretano Acrilato	UP	UP	UP	UP	Uretano Acrilato	UP	UP	Uretano Acrilato
Refuerzo	mat	mat	mat	Tela	Tela	Tela	Tela	mat	Tela	Roving	Roving
Fibra de vidrio, % en volumen	20-30	40-50	33	40-50	40-50	50-60	70-80	33	50-60	70-80	50
Densidad, g/cm ³	1,3-1,5	1,5-1,75	-	1,5-1,75	1,5-1,75	1,6-1,85	1,9-2,1	-	1,6-1,85	1,9-2,1	-
Resistencia a la tracción, MPa	65-90	130-170	112-131	130-170	200-240	240-275	400-800	112-131	240-275	400-800	260-300
Elongación a la rotura, %	2	2	2-3	2	2	2	2	2-3	2	2	1,6-2
Módulo elástico a tracción, GPa	5-7	9-10	6-7	9-10	10-14	14-18	21-26	6-7	10-14	14-18	17-20
Resistencia a la flexión, MPa	115-145	180-220	206-218	180-220	220-260	260-300	400-500	206-218	220-260	400-500	380-410
Módulo elástico a flexión, GPa	5-7	9-11	6-7	9-11	10-14	14-18	-	6-7	10-14	14-18	10-12

UP: resina poliéster

³¹BIRON M., (2004), "Thermosets and composites: Technical information for plastics users", Elsevier Ltd, pág. 222.

Particularmente es muy escasa la información sobre las propiedades mecánicas específicas para compósitos elaborados mediante el proceso de moldeo por aspersión. En bibliografía consultada únicamente se muestran datos muy generales acerca de las propiedades de materiales compuestos fabricados mediante este proceso. Por esto, la empresa RM Solutions facilitó algunas muestras de material compuesto con fibra de vidrio y resina poliéster obtenidas mediante moldeo por aspersión para este proyecto. RM Solutions tiene algunos años de experiencia en el campo de la elaboración de materiales compuestos mediante el proceso de moldeo por aspersión en la ciudad de Quito. Los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de los materiales facilitados por dicha empresa se muestran en la Tabla 1.12.

De la misma forma, se presentan los resultados obtenidos en ensayos de materiales compuestos híbridos desarrollados en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones para el Proyecto de Titulación “Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en guardachoques para Buses”. Los resultados de este estudio corresponden a materiales híbridos reforzados de mat de fibra de vidrio con fibras cortas, largas y tejidas de cabuya, obtenidos mediante el método de estratificación manual. Los resultados de las propiedades mecánicas de algunos materiales de este estudio se muestran en la Tabla 1.11. Dichos resultados sirvieron para posteriores comparaciones con las propiedades obtenidas en los materiales fabricados en este trabajo de investigación.

Tabla 1.11. Resultados de propiedades mecánicas, de algunos materiales compuestos caracterizados en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la EPN.

Identificación	Espesor promedio	Resistencia a la tracción	Módulo de elasticidad	Espesor promedio	Resistencia a la flexión	Módulo de elasticidad a flexión
	mm	(MPa)	(MPa)	mm	(MPa)	(MPa)
Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en Guardachoques para Buses.						
MAT fibra de vidrio (FV)30%	2,74	89,17	---	2,72	86,99	4524,37
Fibra corta de cabuya (FCo) 25%	3,21	29,34	---	---	---	---
Fibra corta de cabuya (FCo1)30%	4,07	24,39	---	3,14	126,31	6581,48
Fibra corta de cabuya (FCo2)30%	3,30	53,06	---	---	---	---
Fibra larga de cabuya(FL) 25%	3,06	39,60	---	---	---	---
Fibra larga de cabuya (FL) 30%	3,01	79,17	---	3,13	131,74	6156,39
Fibra larga de cabuya (FL) 40%	3,01	91,89	---	3,59	63,21	3769,82
Tejido plano de cabuya (TP) 25%	2,80	43,41	---	---	---	---
Tejido plano de cabuya (TP) 30%	2,86	66,08	---	2,88	160,84	6468,33
Tejido plano de cabuya (TP) 40%	2,92	59,30	---	---	---	---

Tabla 1.12. Resultados de propiedades mecánicas de muestras de material compuesto de la empresa RM SOLUTIONS.

Identificación	Espesor promedio	Resistencia a la tracción	Módulo de elasticidad	Espesor promedio	Resistencia a la flexión	Módulo de elasticidad a flexión
	mm	(MPa)	(MPa)	mm	(MPa)	(MPa)
Aspersión-Fibra de vidrio	2,53	49,33	4935,50	4,56	85,09	2818,98

Por otra parte, la utilización de materiales compuestos reforzados con fibras naturales conlleva grandes beneficios para el medio ambiente, además del beneficio directo de reducir los efectos negativos durante la fase de fabricación. Otro beneficio de refuerzo es el menor peso del material comparado con materiales reforzados de fibra de vidrio o los metálicos. Por ejemplo, el menor consumo de combustible de un vehículo de transporte debido al menor peso de carga propia.³² En la Tabla 1.13 se muestran las propiedades mecánicas de compuestos reforzados con fibra natural, que servirán para posteriores comparaciones.

³²PAEZ J., (2007), "Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

Tabla 1.13. Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta y unidireccional.³³

Fibra	Esfuerzo máximo a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad a la tracción (GPa)	Esfuerzo máximo a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad a la flexión (GPa)
Sisal (40)	129	8,5	192	7,5
Banana (40)	121	8,0	---	---
Coco (30)	45	4	56	4
Sisal (25)	34,5	1,9	86,4	---
Banana (25)	43,5	2,3	92	---
Coco (25)	14,0	1,4	31,2	---

En la Tabla 1.14 se muestran las propiedades mecánicas a tracción y flexión en materiales compuestos de matriz poliéster reforzada con diferentes fibras, con la idea de usar estos datos como referencia en la formulación y evaluación de los materiales del proyecto.

³³CHAND N., FAHIM M., (2008), "*Tribology of natural fiber polymer composites*", Woodhead Publishing, Inglaterra. pág. 46.

Tabla 1.14. Propiedades mecánicas promedio de tracción y flexión de compuestos de matriz poliéster reforzado con diferentes fibras.^{34,35,36}

Tipo de material	Configuración	Fibra de refuerzo	Resistencia a la tracción	Módulo de elasticidad a tracción	Resistencia a la flexión	Módulo de elasticidad a flexión
			(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Mat de fibra de vidrio	Compuesto de fibra de vidrio, 15 vol%	vidrio	73,97	5330	111,05	4482,74
Fibra y tejido de cabuya	Compuesto de fibra longitudinal, 39 vol%	cabuya	74,3	4025,6	61,8	2953,5
	Compuesto de tejido alternado 34/30*vol%	cabuya	60,6	6508,2	76,3	4434,1
	Compuesto de tejido 0° 34/30*vol%	cabuya	67,7	5421,7	69,8	4064,8
Fibra corta y longitudinal de abacá	Compuesto de fibra corta de 10 mm, 30 vol%	abacá	29,24	5323	47,52	2685
	Compuesto de fibra longitudinal, 35 vol%	abacá	136,95	3990	109,89	4605
Fibra corta de abacá (A) / Mat de fibra de vidrio (V)	Compuesto de fibra corta, 20 vol%	25A/75V	69,77	2770	84,02	3420
	Compuesto de fibra corta, 20 vol%	50A/50V	54,35	3132	77,48	3604
Fibra unidireccional de abacá (A) / Mat de fibra de vidrio (V)	Compuesto de fibra unidireccional, 20 vol%	25A/75V	115,02	3357	116,04	5024
	Compuesto de fibra unidireccional, 20 vol%	50A/50V	93,48	2457	127,74	5545
	Compuesto de fibra unidireccional, 20 vol%	75A/25V	137,77	4473	126,73	5091

³⁴ VILLACÍS H., (2011), "Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

³⁵ DELGADO F., (2012), "Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzada con fibra de coco y fibra de vidrio para la elaboración de tableros", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

³⁶ TAMAYO A., (2012), "Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

Tabla 1.14. Propiedades mecánicas promedio de tracción y flexión de compuestos de matriz poliéster reforzado con diferentes fibras (continuación).

Tipo de material	Configuración	Fibra de refuerzo	Resistencia a la tracción	Módulo de elasticidad a tracción	Resistencia a la flexión	Módulo de elasticidad a flexión
			(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Tejido plano de abacá (A) / Mat de fibra de vidrio (V)	Compuesto de tejido plano, 20 vol%	25A/75V	94,05	2941	109,13	4110
	Compuesto de tejido plano, 20 vol%	50A/50V	85,37	2149	79,06	2918
	Compuesto de tejido plano, 20 vol%	75A/25V	84,61	2522	79,53	3157
Tejido sarga de abacá (A) / Mat de fibra de vidrio (V)	Compuesto de tejido sarga, 20 vol%	25A/75V	78,54	2683	80,03	3037
	Compuesto de tejido sarga, 20 vol%	50A/50V	72,40	2274	70,97	2750
Fibra corta de coco (C) / Mat de fibra de vidrio (V)	Compuesto de fibra corta, 10 vol%	100C/0V	18,72	1857	43,98	1798
	Compuesto de fibra corta, 10 vol%	25C/75V	25,95	3286	63,79	2793
	Compuesto de fibra corta, 10 vol%	50C/50V	35,71	3722	72,42	3042
	Compuesto de fibra corta, 10 vol%	75C/25V	38,27	4232	77,56	3303
	Compuesto de fibra corta, 15 vol%	100C/0V	17,19	1843	44,69	2011
	Compuesto de fibra corta, 15 vol%	25C/75V	23,77	2940	63,72	3118
	Compuesto de fibra corta, 15 vol%	50C/50V	38,56	3960	89,23	4095
	Compuesto de fibra corta, 15 vol%	75C/25V	54,28	4987	110,32	4483

1.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS CORTAS ALEATORIAMENTE DISTRIBUIDAS

Los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio pueden contener fibras cortas (cortadas) o fibras largas (continuas). Las fibras pueden ser dispuestas de

modo que queden alineadas con la dirección del esfuerzo aplicado, también pueden ser orientadas transversalmente o distribuidas aleatoriamente como sucede en el caso del moldeo por aspersion. La interfaz matriz - refuerzo es el factor esencial para obtener las propiedades mecánicas deseadas del composite. La interfaz transfiere la carga desde la matriz hacia las fibras.

El comportamiento y propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras se estudian a tres niveles: En el nivel de la interfaz, se trata con enlaces químicos y fuerzas a escala molecular. Entre estos enlaces químicos se da la interacción en la interfaz matriz-refuerzo. Un segundo nivel lo constituyen parámetros que caracterizan la transferencia de carga y su relación con el esfuerzo producido, siendo la distribución de las fibras un parámetro esencial. Y en un último nivel se habla sobre la caracterización de las propiedades del composite como un material en bruto. Principalmente los dos últimos niveles (mecánico y macroscópico) son de gran importancia en el análisis de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

En el proceso de moldeo por aspersion se tiene que las fibras se encuentran en una distribución "aleatoriamente distribuida", debido a que el filamento continuo de vidrio es cortado en longitudes cortas de fibra entre 10 y 40 mm y es esparcido aleatoriamente sobre el molde de trabajo.

En la condición de no deformación una fibra discontinua con longitud l es embebida en la resina de la matriz. Cuando la matriz es cargada en modo traccionante en la dirección del eje de la fibra, se produce un patrón de deformación alrededor de la fibra. Mientras la carga de tracción se incrementa gradualmente hasta que el espécimen se rompe. La respuesta a la deformación del material sigue a través de algunas etapas. El comportamiento previsto de la resina muestra un comportamiento

dúctil (característico de muchas resinas termoplásticas), las etapas de fractura que pueden ser identificadas son³⁷:

- i) Fisuración en la matriz alrededor de la fibra, usualmente se da a alguna distancia desde la interfaz matriz-resina.
- ii) Pérdida de adherencia, que se inicia en los extremos de la fibra y se incrementa gradualmente a lo largo de ella, hasta la parte media de la fibra.
- iii) Falla de la matriz, especialmente como una grieta de fractura inducida.
- iv) Ruptura de las fibras, la cual ocurre en fibras que son lo suficientemente largas para ser esforzadas hasta la falla.
- v) Extracción de las fibras, caracterizada por longitudes de fibras que sobresalen desde la cara de un espécimen destruido y las cavidades vacías desde las cuales ellas son extraídas. En la Figura 1.13 se presenta un esquema representativo de la respuesta de un material compuesto con fibras aleatoriamente distribuidas a una carga de tracción.

“Ya sea pérdida de adherencia o falla de la matriz, cualquier fenómeno que suceda primero, los dos dependerán de la calidad de la unión entre la matriz y la fibra de vidrio, debiéndose considerar también la tenacidad de la matriz.”³⁸

“Es probable y también corroborado por un análisis microscópico que la falla se inicia desde el extremo de la fibra. Por lo tanto se espera una débil adhesión entre las superficies de los extremos de la fibra de vidrio y la resina. Adicionalmente, tanto la fibra como las superficies de los extremos de éstas son puntos concentradores de esfuerzo durante la deformación a tracción. A medida que la tracción aumenta, si bien la matriz puede empezar a fisurarse o puede ocurrir pérdida de adherencia en la

³⁷WALLENBERGER F, BINGHAM P., (2010), *“Fiberglass and Glass Technology”*, Springer Science Business Media, Estados Unidos, págs.134, 135.

³⁸WALLENBERGER F, BINGHAM P., (2010), *“Fiberglass and Glass Technology”*, Springer Science Business Media, Estados Unidos, pág. 135.

interfaz fibra-matriz, lo más probable es que ambos fenómenos tengan su punto de inicio cerca de los extremos de las fibras y avancen gradualmente hacia la parte media de la fibra. Un incremento adicional de esfuerzo dará lugar a la ruptura del espécimen”³⁹.

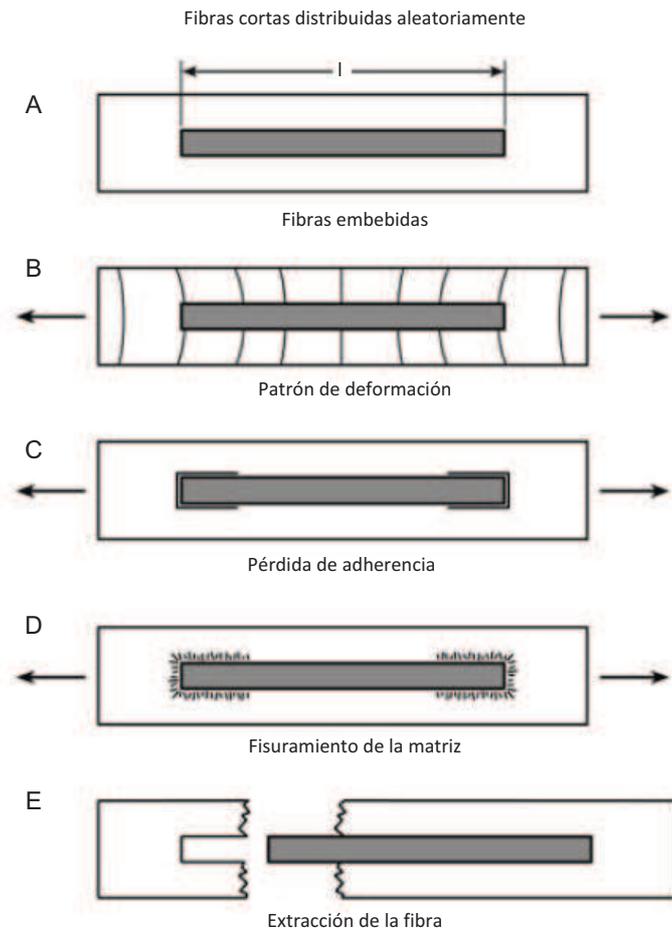


Figura 1.13. Respuesta de un material compuesto reforzado con fibras cortas aleatoriamente distribuidas a una carga de tracción.⁴⁰

³⁹WALLENBERGER F, BINGHAM P., (2010), *"Fiberglass and Glass Technology"*, Springer Science Business Media, Estados Unidos, pág. 135.

⁴⁰WALLENBERGER F, BINGHAM P., (2010), *"Fiberglass and Glass Technology"*, Springer Science Business Media, Estados Unidos, pág. 135

“En la Figura 1.14 se puede observar la cara de una muestra de un espécimen destruido. Se presenta el examen microscópico de la cara de una rotura típica de un espécimen. Micrografías electrónicas típicas revelan la ruptura de la matriz y la rotura de las fibras además de un cierto grado de extracción de las fibras. Las fibras extraídas se evidencian con la presencia de extremos de fibra que sobresalen de la cara de ruptura con las correspondientes cavidades de fibra vacías”⁴¹.

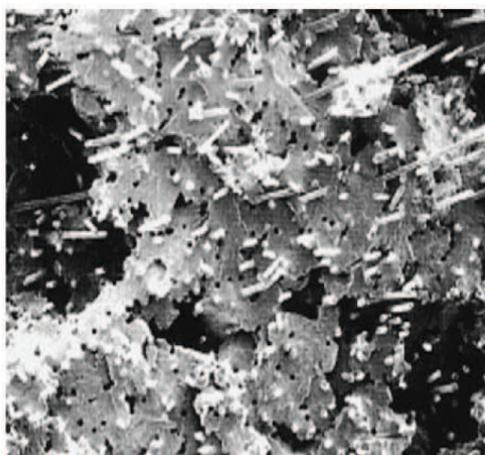


Figura 1.14. Micrografía de la superficie de un espécimen de material compuesto con fibra de vidrio y matriz de resina destruido.⁴²

“De la longitud de la fibra dependerá si ésta se rompe o es extraída. La dependencia de la longitud puede ser explicada por una analogía simplificada. Por ejemplo, un hilo de coser de 1 m de longitud está firmemente agarrado con ambas manos, al ejercer una fuerza de tracción sobre el hilo, éste se romperá. El procedimiento se repite muchas veces hasta que llegará un momento en que los pedazos son tan pequeños

⁴¹WALLENBERGER F, BINGHAM P., (2010), *“Fiberglass and Glass Technology”*, Springer Science Business Media, Estados Unidos, pág. 136.

⁴²WALLENBERGER F, BINGHAM P., (2010), *“Fiberglass and Glass Technology”*, Springer Science Business Media, Estados Unidos, pág. 136.

que resulta imposible obtener el agarre necesario en el hilo para romperlo y el hilo se deslizará a través de los dedos”.⁴³

1.4 VARIABLES DEL PROCESO DE CURADO DE LA RESINA POLIÉSTER

Como se mencionó anteriormente, la resina es una sustancia líquida un tanto viscosa que pasa al estado sólido cuando se agregan ciertos compuestos externos que inducen una reacción química. Esta reacción es exotérmica y el incremento de la temperatura ocurre en el momento en que se produce la mezcla de los diferentes elementos, pudiendo registrarse incrementos de temperatura de hasta 160°C.

Para iniciar el curado se necesita la presencia de un catalizador (iniciador) y un acelerante. El curado de una resina poliéster inicia tan pronto como se añade octoato de cobalto (iniciador). En cuanto al acelerante, en este caso peróxido de metil-etil cetona, es un compuesto que al ser añadido a la mezcla de resina y octoato de cobalto permite que la polimerización se realice a un periodo de tiempo menor.

La velocidad de la reacción depende de la temperatura así como también de la reactividad de la resina y el catalizador. Es fundamental proporcionar cantidades adecuadas de iniciador y acelerador para asegurar el correcto proceso de curado. En la máquina de aspersion del Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la EPN, la cantidad de peróxido metil-etil cetona (MEKP) se regula a través de la selección de múltiples posiciones en un dispositivo dosificador, como se puede observar en la Figura 1.15.

⁴³WALLENBERGER F, BINGHAM P., (2010), *“Fiberglass and Glass Technology”*, Springer Science Business Media, Estados Unidos, pág. 136.

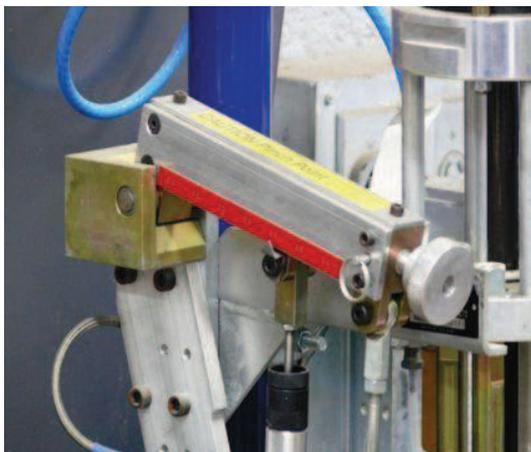


Figura 1.15. Regulación de bombeo del peróxido metil-etil cetona (MEKP).

La máquina de aspersion del LANUM ofrece varias posiciones de bombeo, pero existe un rango adecuado de variación, donde se obtienen tableros de material compuesto con la cantidad adecuada de MEKP y que además presentan las mejores características de curado. En la Tabla 1.15 se presentan las posiciones de bombeo de MEKP con tiempos aproximados de endurecimiento del material compuesto que se presentaron al realizar las pruebas respectivas en la máquina de aspersion del LANUM.

Tabla 1.15. Posición de dispositivo dosificador de MEKP y tiempo aproximado de su curado.

Posición del dispositivo dosificador de MEKP	Tiempo de endurecimiento
	Horas
1,5	10
1,5-2,0	7
2,0-2,5	5
2,5	4

El proceso de curado consta principalmente de tres fases:

- La gelificación; durante la cual la resina pasa de un estado viscoso a un gel blando.

- El endurecimiento; durante el cual la resina se transforma en un sólido.
- La maduración; en que la resina adquiere todas sus características mecánicas y químicas.

La fase de maduración puede tardar desde varias horas hasta varios días. Esto dependerá si se lo realiza en un horno o a temperatura ambiente. Esta variable depende de la disponibilidad de equipos u otros factores como el tiempo de manufactura.

Se pueden controlar los tiempos de curado actuando sobre los parámetros de temperatura, cantidad de catalizador y acelerador. Sin embargo existen otros factores que intervienen en el proceso de curado como son: ⁴⁴

- El tipo de resina empleada.
- La temperatura ambiente, pues la mayoría de resinas no curan a temperaturas inferiores a 10°C.
- La humedad relativa.

1.5 VARIABLES DEL PROCESO DE MOLDEO POR ASPERSIÓN

El moldeo por aspersión, al ser un proceso semiautomático, demanda el establecer parámetros que necesitan ser regulados para el correcto funcionamiento de la máquina de aspersión. Una vez fijadas las fracciones volumétricas de la mezcla de resina a utilizar, se regulan los parámetros y se definen variables tanto para el equipo como para los materiales y el proceso de aspersión.

⁴⁴<http://www.topseis.com/Doc/poliester.pdf>

1.5.1 Parámetros y variables del equipo de aspersión

Una vez definida la matriz poliéster que se emplea en la máquina se establecerá como parámetros las siguientes presiones:

- Presión de bombeo de la resina poliéster/ catalizador.
- Presión de atomización del catalizador (MEKP).

Estas presiones permanecerán fijas en todo el transcurso del proceso debido a que dependen directamente de la viscosidad de la matriz la cual no sufrirá alteración alguna. Por otro lado, como se explicó el apartado anterior se tendrá como variable en la máquina de aspersión la cantidad de succión del MEKP, el cual se varía por medio de un posicionador que posee la bomba de peróxido de metil-etil cetona.

En cambio, para la pistola de aspersión se trabajará en la mínima entrada de aire al motor neumático de la cortadora de fibra de vidrio, con lo cual se obtiene una cantidad regulada de fibra cortada. Esto, ayudará a que no exista una acumulación excesiva del refuerzo y facilitará la deposición de resina-fibra para el operado.

1.5.2 Materiales

En cuanto al material utilizado como refuerzo, se tiene al roving de fibra de vidrio tipo E, el cual se corta a una longitud constante, establecida por la separación que existe entre cuchillas. Cabe señalar que estos parámetros pueden llegar a ser variables potenciales ya que pueden ser alterados dependiendo los recursos disponibles para desarrollar este proceso.

1.5.3 Variables del proceso de aspersión

Ya en el proceso, se variará la aplicación o no del recubrimiento de gelcoat de la o las superficies del material compuesto, así como también se el tipo de curado ya

mencionado. Así también, como factores adicionales fuera de la máquina de aspersión se definen los siguientes parámetros.

- Velocidad de aplicación de la matriz - refuerzo
- Velocidad de aplicación de gelcoat

Dichos parámetros dependerán de la habilidad y experiencia del operador. Lo primordial para obtener un proceso repetitivo es mantener una velocidad aproximada de 0,02 m/s a través del ancho de los tableros, dicha velocidad se mantuvo durante el tiempo cronometrado a través de la longitud de aplicación. La misma velocidad fue establecida para el proceso de aplicación del gelcoat. Además, durante la elaboración del material compuesto se debe cumplir con una serie de pasos fundamentales dentro de su procesamiento como son: impregnación, consolidación y solidificación.

Es recomendable aplicar una capa solamente de la matriz de resina sobre la superficie del molde antes de la impregnación. Esto asegura que la posterior capa de resina-fibra se adhiera correctamente al molde y además asegura un mejor acabado a la superficie que se encuentra en contacto con el molde, cuando no posee gelcoat.

La impregnación es el paso en el cual la mezcla de resina y fibra fluyen simultáneamente desde la pistola de aspersión hacia la superficie del molde de trabajo. La orientación es al azar y la longitud de la fibra es corta. El espesor requerido se obtiene colocando varias capas de resina y fibra.

La consolidación es el paso en el cual se compactan las capas de fibra y resina, asegurando la eliminación de aire entre ellas. En caso de producirse una mala laminación, el resultado será una pieza con una mala distribución, humectación y compactación de las fibras. Para finalizar, en el proceso de solidificación, el periodo de curado puede tardar 3 horas o más. Este tiempo depende de la composición de la resina, catalizadores y la elección de determinada posición del dosificador de peróxido de metil-etil cetona en la máquina de aspersión. Cada paso es importante y

requiere cuidado durante su ejecución, ya que cada uno de ellos incidirá directamente en la calidad de los materiales obtenidos. En la Tabla 1.16 se puede apreciar el esquema de procesamiento por aspersión.

Tabla 1.16. Esquema de procesamiento por aspersión.

Etapa del proceso	Acciones	Imagen
Impregnación	<p>Aplicación de resina poliéster y refuerzo de fibra de vidrio.</p> <p>Depende de la habilidad del operador.</p>	
Consolidación	<p>Laminación capa tras capa.</p> <p>Asegura regularidad y mínima cantidad de defectos.</p>	
Solidificación	<p>Tiempo de curado.</p> <p>Depende de la cantidad de iniciador, la posición del dosificador de MEKP, y temperatura de curado.</p>	

1.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE ASPERSIÓN

Cada proceso de moldeo de compuestos presenta diferentes condiciones de ejecución, ventajas y desventajas frente a otros procesos. Entre las ventajas que pueden tener ciertos procesos frente a otros se puede mencionar la obtención de mejores propiedades mecánicas, facilidad y rapidez para fabricar moldes de grandes dimensiones así como también la reducción de materia prima y costos. Es así que la selección del proceso dependerá de las necesidades y características que tenga que

cumplir la parte a producir. Por lo tanto, para el proceso de moldeo por aspersión respecto a otros procesos de moldeo se tienen las siguientes ventajas:⁴⁵

- i) Es un método que presta una mayor velocidad de producción con respecto a métodos tradicionales como el de estratificación manual. Después una correcta configuración de parámetros operativos tanto para el equipo como el molde, el moldeo por aspersión desarrolla niveles de producción satisfactorios.
- ii) Elevado espesor de pared.
- iii) Posee la capacidad para manejar la producción de hasta 1000 partes por prototipo.
- iv) Es adecuado para las piezas de mediano y gran tamaño.
- v) Facilidad en la elaboración de piezas de mayor complejidad.

Las desventajas incluyen:

- i) No es apto para la fabricación de piezas que tienen elevados requerimientos estructurales.
- ii) Es complejo controlar la fracción volumétrica de fibra, así como el espesor. Estos parámetros dependen en gran medida la habilidad del operador.
- iii) Debido a su naturaleza de molde abierto, la emisión de gases tóxicos es una preocupación.
- iv) El proceso ofrece un buen acabado superficial de un lado y un acabado de superficie áspera del otro lado.
- v) El proceso no es adecuado para zonas donde la precisión dimensional es primordial.
- vi) Aunque el proceso se puede automatizar, es relativamente lento y los costos de mano de obra son altos.

⁴⁵SANJAY K., MAZUMDAR., (2002), "Composites Manufacturing: materials, product and process engineering", CRC Press, Estados Unidos.

vii) Las resinas deben ser de baja viscosidad para ser pulverizables. Esto generalmente compromete sus propiedades mecánicas y térmicas.⁴⁶

1.7 APLICACIONES INDUSTRIALES

El moldeo por aspersión, en conjunto con el proceso de estratificación manual, se utiliza para procesar aproximadamente un 15% del total de los materiales compuestos. Este proceso se adapta y presta mejores facilidades a ciertas características que posee la parte a diseñar. En la Tabla 1.17 se presentan ejemplos de los procesos más representativos escogidos respecto a las características de la pieza.

Tabla 1.17. Ejemplos de la elección del proceso sugerido en comparación con las características de la pieza.⁴⁷

Tamaño de la pieza m ²	Espesor mm	Producción unidades	Método	Ejemplo de piezas
Reducido	Reducido	Fabricación en serie >10.000	Inyección a alta presión	Piezas eléctricas y electrónicas
Hasta 15	1 a 10	200 a 10.000	Inyección de resina	Elementos de carrocería
Hasta 30	3 a 15	---	Moldeo centrífugo	Tubos, tubería
Sección limitada	3 a 20	Continua	Moldeo por pultrusión	Perfiles
Virtualmente ilimitado <300	Ilimitado, frecuentemente de 2 a 10	<1.000	Estratificación manual	Naves
Virtualmente ilimitado	Ilimitado, frecuentemente de 2 a 10	<1.000	Moldeo por aspersión	Buque naval

⁴⁶<http://www.fibre-reinforced-plastic.com/2008/12/composite-fabrication-spray-up-spray.html>

⁴⁷BIRON M., (2004), "Thermosets and composites: Technical information for plastics users", Elsevier Ltd, págs. 345,346.

Entre los principales usos operacionales y de desarrollo de partes se tienen a continuación:

i) Construcción naval

- La construcción naval de barcos, incluyendo todos los tipos de barcos de regata o de placer, tablas de surf, embarcaciones y aerodeslizadores.
- Compuertas de esclusas.
- Refugios de seguridad, paneles a prueba de explosiones para las plataformas petrolíferas en alta mar en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

ii) Transporte

- Cabinas de camiones pesados, prototipos o series pequeñas, en fibra de vidrio y kevlar.
- Capot del motor, compuerta trasera del auto, puertas traseras de camionetas, prototipos o pequeñas series.
- Las narices de trenes de alta velocidad se fabrican en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

iii) Construcción

- Cornisas, molduras ornamentales, esculturas en materiales compuestos para hoteles, casinos y edificios.
- Encofrados y recubrimiento del concreto en la construcción de edificios.
- Carcasas para la protección de equipos (ascensores, ventiladores) en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

iv) Industria mecánica

- Tinajas de decantación.
- Placas base.
- Encofrados, paneles, cubiertas, carcasas de las máquinas hechas de poliéster reforzado con fibra de vidrio.

v) Muebles

- Cabinas o bloques sanitarios en poliéster reforzado con fibra de vidrio.
- Cabinas y puertas de baños públicos: el poliéster no siempre es lo suficientemente resistente al vandalismo y en tales casos se sustituye por el acero inoxidable.
- Quioscos de venta al por menor en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

vi) Varios

- Equipo de granja, cabinas de los transformadores eléctricos, asientos para motos de carreras.
- Artículos para publicidad gigante, elementos de carruseles, parques (toboganes), teatro, cine.
- Envases de alta tecnología o de estética, tales como contenedores para la industria nuclear, la aeronáutica y cúpulas, estuches para contrabajo.

En la Figura 1.16 se muestra tres aplicaciones señaladas del moldeo por aspersión así: a) recubrimiento del concreto en construcción de edificios; b) construcción de barcos de tipo placer y c) obtención de cubiertas para diferentes edificaciones.

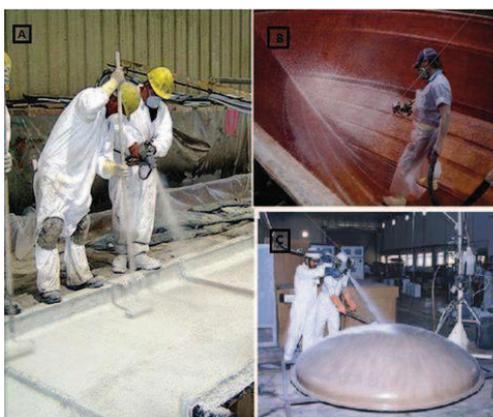


Figura 1.16. Aplicaciones del moldeo por aspersión.⁴⁸⁴⁹⁵⁰

⁴⁸http://www.pre-cast.org/product_details.asp?cat=GFRC&pID=2&iID=1&step=3

1.8 OBJETIVOS Y ALCANCE

1.8.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es:

Obtener materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio mediante moldeo por aspersión.

Los objetivos específicos incluyen:

- Definir las variables del proceso de moldeo por aspersión, para la obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio.
- Elaborar probetas normalizadas de materiales compuestos de matriz poliéster, reforzadas con fibra de vidrio mediante moldeo por aspersión.
- Caracterizar mecánicamente las probetas de los materiales compuestos obtenidos a través de ensayos normalizados de tracción, flexión e impacto.
- Elaborar un prototipo de un producto existente en el mercado con la formulación del material compuesto que presente las mejores propiedades mecánicas.
- Comparar el desempeño del prototipo elaborado a partir del material compuesto con el desempeño del producto que se busca reemplazar.

1.8.2 ALCANCE

Se obtendrán materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio mediante moldeo por aspersión. Este proceso se implementará en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la EPN. Se determinarán las variables inmersas en el proceso de aspersión, de tal manera que los materiales a obtener tengan

⁴⁹<http://www.graco.com/us/en/products/application/composites-frp/spray-up-lamination.html>

⁵⁰ http://www.kinecogroup.com/capability_disp.php?id=3

propiedades mecánicas significativamente mejoradas en comparación a la matriz de resina poliéster.

Se experimentará con diferentes composiciones de resina, iniciador de reacción y catalizador, hasta lograr una composición que permita obtener la menor cantidad de defectos en el material y un correcto funcionamiento del equipo de aspersion.

Se elaborarán moldes abiertos que permitan obtener probetas mediante un procedimiento específico de moldeo por aspersion. Las probetas que se obtengan serán caracterizadas mecánicamente mediante ensayos de tracción y flexión, según las normas ASTM D3039-08 y ASTM D7264-07, respectivamente. Se realizarán ensayos de impacto con probetas del material compuesto de mejores características y propiedades mecánicas, utilizando la norma ASTM D5420-04. Se analizarán los resultados y se seleccionará el material con la mejor combinación de propiedades, con el que se fabricará un prototipo de un elemento para una aplicación estructural o semiestructural.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el procedimiento empleado para la elaboración de materiales compuestos de matriz poliéster reforzada con fibra de vidrio mediante moldeo por aspersion. Inicialmente, se detallan los materiales y equipos empleados, así como sus principales características y especificaciones. Con este precedente se define la metodología experimental llevada a cabo desde la fabricación de las diferentes configuraciones de material, hasta la caracterización de las propiedades mecánicas. Asimismo, se definen y describen los ensayos preliminares realizados para la determinación de fracciones volumétricas y densidades de los composites elaborados. Finalmente, se describen los criterios de selección del prototipo así como también la metodología para su elaboración, la cual que señala la configuración con las mejores propiedades y características con base en la calificación de diferentes criterios.

2.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Previo a la elaboración de los materiales compuestos, es necesario definir los materiales y equipos a emplearse y sus principales características. En este acápite se muestran las características de los refuerzos de fibra de vidrio, la matriz de resina poliéster, el gelcoat, los reactivos y disolventes, así como también se describe el equipamiento para aspersion de resina y gelcoat, el equipamiento auxiliar y las máquinas empleadas para los ensayos de caracterización mecánica.

2.1.1 MATERIALES

2.1.1.1 Roving de fibra de vidrio tipo E

El roving P246 E-Glass para pistola de aspersión, es un haz de filamentos de fibra de vidrio. Dichos filamentos se encuentran agrupados y dispuestos en forma prácticamente paralela formando una mecha. Está fabricado con vidrio tipo E, el cual cumple con la norma ASTM D578-99 inciso 4.2.2 y presenta una química innovadora con un mayor enfoque sobre el control estadístico de su proceso. Esta fibra de vidrio está diseñada para sistemas de resina poliéster y es ideal para operaciones de aspersión con un amplio rango de aplicaciones en la fabricación de piezas en diferentes mercados:

- Marino
- Transporte
- Recreación

El roving utilizado posee un sin número de características; entre las principales tenemos:

- Excelente impregnación
- Facilidad de corte
- Menor desgaste de cuchillas y rodillos de hule
- Facilidad en el desembobinado
- Excelente dispersión, se eliminan aglomeraciones
- Se requiere poca fuerza para cortar los hilos
- Menor estática

En la Figura 2.1 se presenta el roving marca Owens Corning utilizado. Las características técnicas del roving empleado se indican en el Anexo 1.



Figura2.1. Roving Owens Corning empleado en el proyecto.

2.1.1.2 Resina poliéster insaturada

La resina poliéster insaturada ortoftálica empleada tiene la denominación comercial ANDERPOL 859, la cual fue suministrada por Poliquim. Está clasificada como líquido inflamable por tener un punto de inflamación de 31°C y por tanto debe mantenerse alejada de llamas abiertas. Se recomienda almacenarla a temperaturas inferiores a 20°C para obtener la máxima estabilidad. Se suministra en tambores metálicos de 230 kilos y tiene un tiempo de vida de seis meses desde el momento de su fabricación. Las especificaciones técnicas de la resina poliéster utilizada se especifican en el Anexo 2.

La resina poliéster, necesita de un agente externo para su paso de estado líquido a sólido. Como agentes externos se utilizaron dos compuestos:

- i) Octoato de cobalto: iniciador del proceso de curado.
- ii) Peróxido de metil-etil cetona (MEKP): acelerador del proceso de curado.

La fórmula general recomendada en partes por peso para el curado a temperatura ambiente de la resina poliéster insaturada ANDERPOL 859 es la que se muestra en laTabla 2.1.

Tabla 2.1. Fórmula general recomendada para el curado de la resina ANDERPOL 859.⁵¹

Materiales	Partes por peso
ANDERPOL 859	100
Estireno	1
Octoato de Cobalto	0,2 a 0,5
MEKP	1,0 a 2,5

El curado nunca se debe realizar a temperaturas inferiores a 15°C porque no se alcanza buenas propiedades mecánicas.⁵² El tiempo de gel lo controla principalmente la cantidad de octoato de cobalto (iniciador). Se puede variar la cantidad de peróxido (acelerante de curado) para corregir fluctuaciones de temperatura en el curado de la resina. En la Figura 2.2 se presenta la resina poliéster empleada.



Figura 2.2. Resina poliéster insaturada, presentación comercial.

En la Tabla 2.2 se muestran algunas de las propiedades de la resina poliéster ANDERPOL 859.

⁵¹POLQUIM,(2009), “Resina Poliéster ANDERPOL 859”, Bogotá, pág. 2.

⁵²POLQUIM,(2009), “Resina Poliéster ANDERPOL 859”, Bogotá, pág. 3.

Tabla 2.2. Algunas propiedades de la resina poliéster empleada.⁵³

Propiedades Físicas	
Viscosidad	1,5 - 2,5 Pa.s
Densidad en estado sólido	1,8 g/cm ³
Propiedades mecánicas	
Resistencia a la tracción	48 MPa
Elongación a la rotura	4,5 %
Propiedades térmicas	
Temperatura de exotermia	130 – 145 °C

2.1.1.3 Gelcoat

El gelcoat empleado tiene la denominación comercial ANDERPOL 889, el cual fue suministrado por Poliquim. El ANDERPOL 889 está clasificado como líquido inflamable por tener un punto de inflamación de 31°C y por tanto debe mantenerse alejado de llamas abiertas. Se recomienda almacenarlo a temperaturas inferiores a 20°C para obtener la máxima estabilidad. Se suministra en tambores de 60 kilogramos y tiene un tiempo de vida equivalente a seis meses desde el momento de su fabricación. Este gelcoat es del tipo no pigmentado especialmente diseñado para la aplicación en procesos de moldeo por aspersion. Lleva en su formulación absorbente ultravioleta para garantizar una mayor resistencia a la degradación causada por la luz.

El gelcoat ANDERPOL 889 se caracteriza por su buena resistencia al impacto y propiedades mecánicas cuando está completamente curado. Posee una muy buena resistencia a agentes medioambientales externos como, agua, humedad, radiación solar y productos químicos como soluciones ácidas. Cuando se aplica apropiadamente, da un buen recubrimiento superficial y, debido a su tixotropía controlada, no se escurre en superficies verticales o inclinadas. La fórmula general

⁵³POLYQUIM, (2009), "Resina Poliéster ANDERPOL 859", Bogotá, pág. 6.

recomendada por el fabricante en partes por peso, para el curado a temperatura ambiente del gelcoat ANDERPOL 889 es la que se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Fórmula general recomendada para el curado del gelcoat ANDERPOL 889.⁵⁴

Materiales	Partes por peso
ANDERPOL 889	100
MEKP	1,0 a 3,0

Hay que observar que el gelcoat empleado sólo requiere la adición de catalizador MEKP para iniciar el curado, puesto que viene preacelerado. La temperatura ambiente y la cantidad de catalizador controlan el tiempo de gel del gelcoat ANDERPOL 889. El curado nunca se debe realizar a temperaturas inferiores a 15°C porque no se alcanzan propiedades óptimas en la película⁵⁵. Si se requiere la pigmentación del gelcoat, hay que ser cuidadoso en la selección de las pastas pigmento. Es aconsejable verificar las mezclas antes de su uso a gran escala, para observar la estabilidad del color en el tiempo o si se presenta separación de pigmentos o aparición de franjas coloreadas en el gelcoat. Los fenómenos antes mencionados posiblemente no se observan tan pronto la mezcla se haya efectuado, pero pueden aparecer al poco tiempo de estar almacenado el producto.

El espesor de película húmeda recomendada es de 0,4 o 0,5 mm ya que espesores mayores a 0,5 mm generan porosidad en la película. Las características del gelcoat empleado se indican en el Anexo 3.

⁵⁴POLQUIM, (2010), "GELCOAT ANDERPOL 889", Bogotá, pág. 2.

⁵⁵POLQUIM, (2010), "GELCOAT ANDERPOL 889", Bogotá, pág. 2.

2.1.1.4 Materiales adicionales

De manera adicional se emplearon algunos materiales para complementar el proceso de obtención de composites. Estos materiales se detallan a continuación:

- Cera de pasta marca SIMONIZ como agente desmoldante.
- Estireno, como disolvente de la resina poliéster. Este material es considerado como un líquido inflamable ya que tiene un punto de inflamación de 31°C, de ahí que se lo debe almacenar en lugares con temperaturas inferiores a los 20°C. Se debe además mantener la hermeticidad de su recipiente cuando se encuentra almacenado, ya que puede producir evaporaciones nocivas en el ambiente circundante.
- Octoato de cobalto, empleado como iniciador del proceso.
- Thinner, como disolvente de limpieza para la remoción de resina y gelcoat de las máquinas aspersoras y pistolas de rociado. Se requiere que las máquinas sean limpiadas con solventes como thinner o acetona cada vez que se concluye la jornada laboral, ya que de lo contrario se podrían producir obstrucciones en la bomba, las mangueras, ductos y orificios debidas a la solidificación de resina. En la Figura 2.3 se presentan imágenes de los materiales adicionales empleados en el proceso de moldeo por aspersión.



Figura 2.3. Varios materiales empleados en el proceso de moldeo por aspersión.

- Peróxido de metil-etil cetona (MEKP) que se emplea como catalizador o acelerante del proceso de curado. En el proceso de moldeo por aspersión se provee de MEKP a la máquina de aspersión, colocando directamente el catalizador sobre un recipiente incorporado a la máquina desde donde es bombeado hacia la pistola de rociado conjuntamente con la resina poliéster y la fibra. En la Figura 2.4(a) y (b), se muestra el recipiente contenedor del MEKP incorporado a la máquina de moldeo por aspersión MVP.

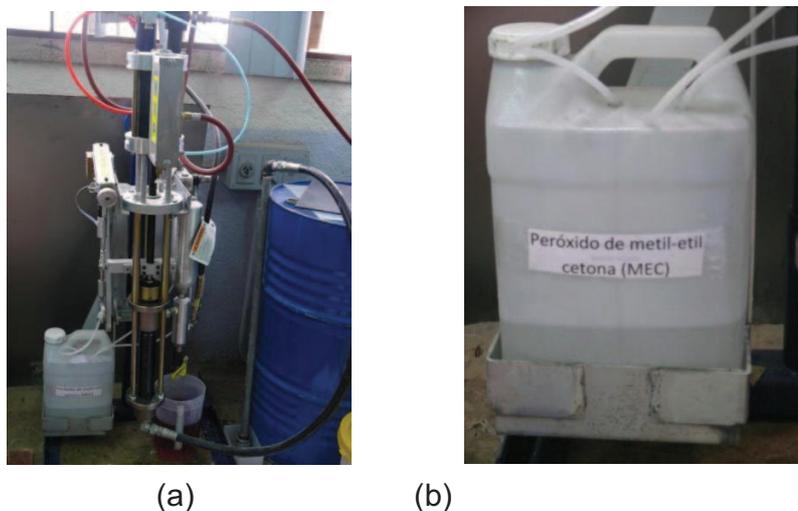


Figura 2.4. Peróxido de metil-etil cetona (MEKP): (a) Ubicación del recipiente contenedor en la máquina; (b) Recipiente contenedor.

2.1.2 EQUIPOS

2.1.2.1 Equipo de generación de aire comprimido

Previo a la utilización de los equipos de moldeo por aspersión, es necesario instalar un equipo de generación de aire comprimido. Este equipo es el encargado de suministrar la presión de aire, necesaria para el adecuado funcionamiento de la máquina de aspersión y de gelcoat. El equipo de generación de aire comprimido alimenta a las máquinas de aspersión mediante conexiones de tuberías y consta de las siguientes partes:

- i) Compresor de dos cilindros de dos etapas.
- ii) Secador de aire.
- iii) Tanque de almacenamiento.
- iv) Tablero de control de encendido y apagado.
- v) Unidades de filtrado.
- vi) Conexiones de alimentación.

Las características generales del equipo de generación de aire se describen en la Tabla 2.4, mientras que en la Figura 2.5 se presentan imágenes de las partes del equipo.

Tabla 2.4. Características generales del equipo de generación de aire comprimido.

Componente	Características
Compresor	2 cilindros
Motor eléctrico	De inducción trifásico, 15 kW, 220/440 V, 50,3/25,1 A, 1760 rpm.
Tanque de almacenamiento	1000 l, presión máxima 200 psi

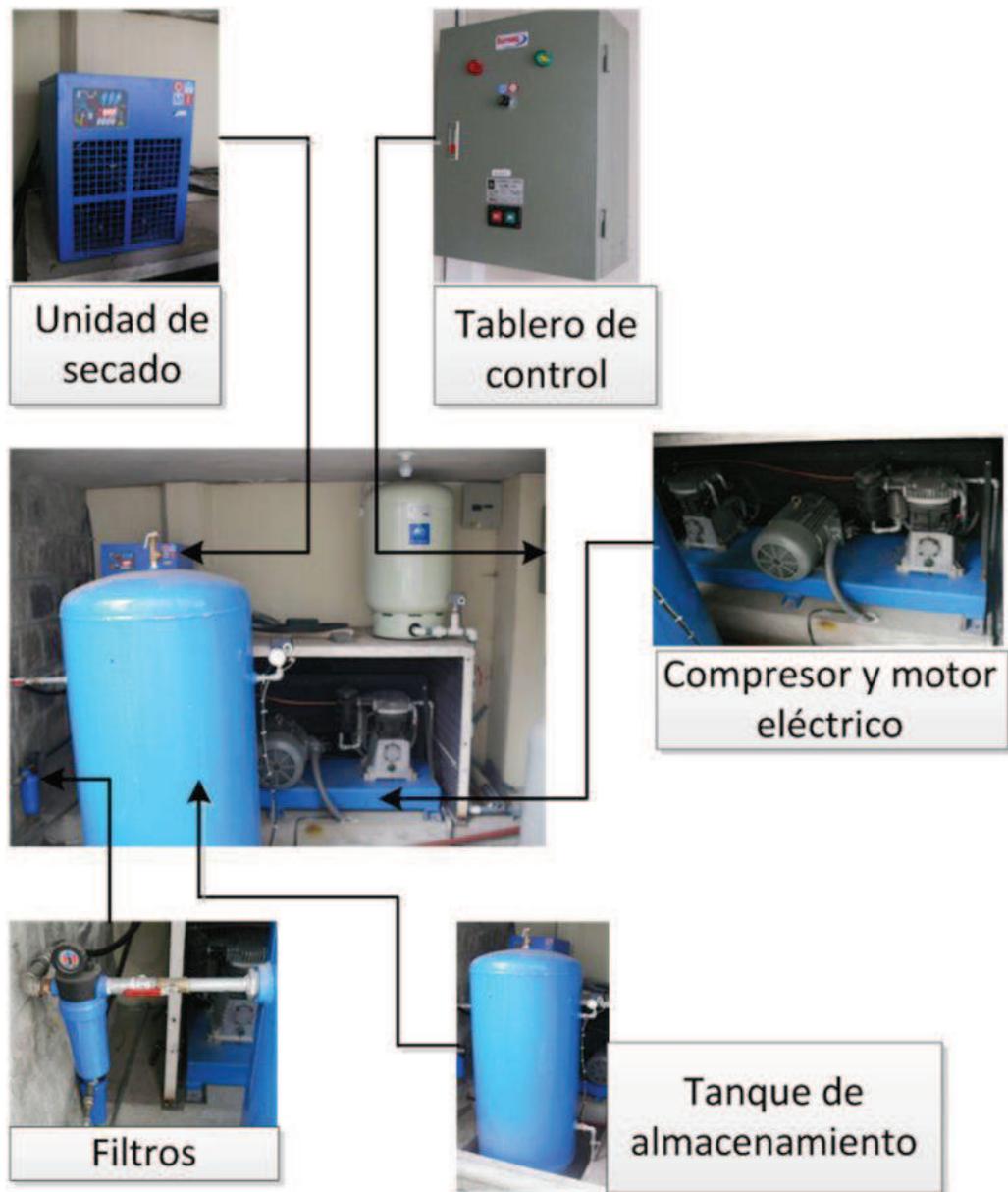


Figura 2.5. Equipo de generación de aire comprimido.

2.1.2.2 Equipo para moldeo por aspersión MVP

Para la obtención de las diferentes formulaciones de material compuesto de resina poliéster insaturada y fibra de vidrio se empleó el equipo para aspersión Magnum Venus Products (MVP). Este equipo presenta las siguientes especificaciones:

Tabla 2.5. Características generales de la máquina de moldeo por aspersión MVP.⁵⁶

Características técnicas de la máquina de aspersión MVP
Capacidades de salida: 0,45 – 2,7 kg/min
Catalizador: 1% a 4% en volumen
Consumo de aire: 5-7 CFM
Longitud: 213 cm (84 in)
Ancho: 69 cm (27 in)
Altura: 74 cm (29 in)
Masa: 114 kg (250lb)
Presiones de bombeo
Requerimiento de aire mínimo: 100 psi en la línea principal
En sistemas de corte de fibra: 20-30 cfm
En bombeo de material: 30 – 50 psi
En atomización de catalizador: 15 – 25 psi

En la Figura 2.6 se muestra una imagen del equipo de moldeo por aspersión MVP y sus partes principales.

⁵⁶MAGNUM VENUS PRODUCTS., (1999) “MVP Troubleshooting: Airless Equipment Safety Manual”, EE. UU, pág.10.

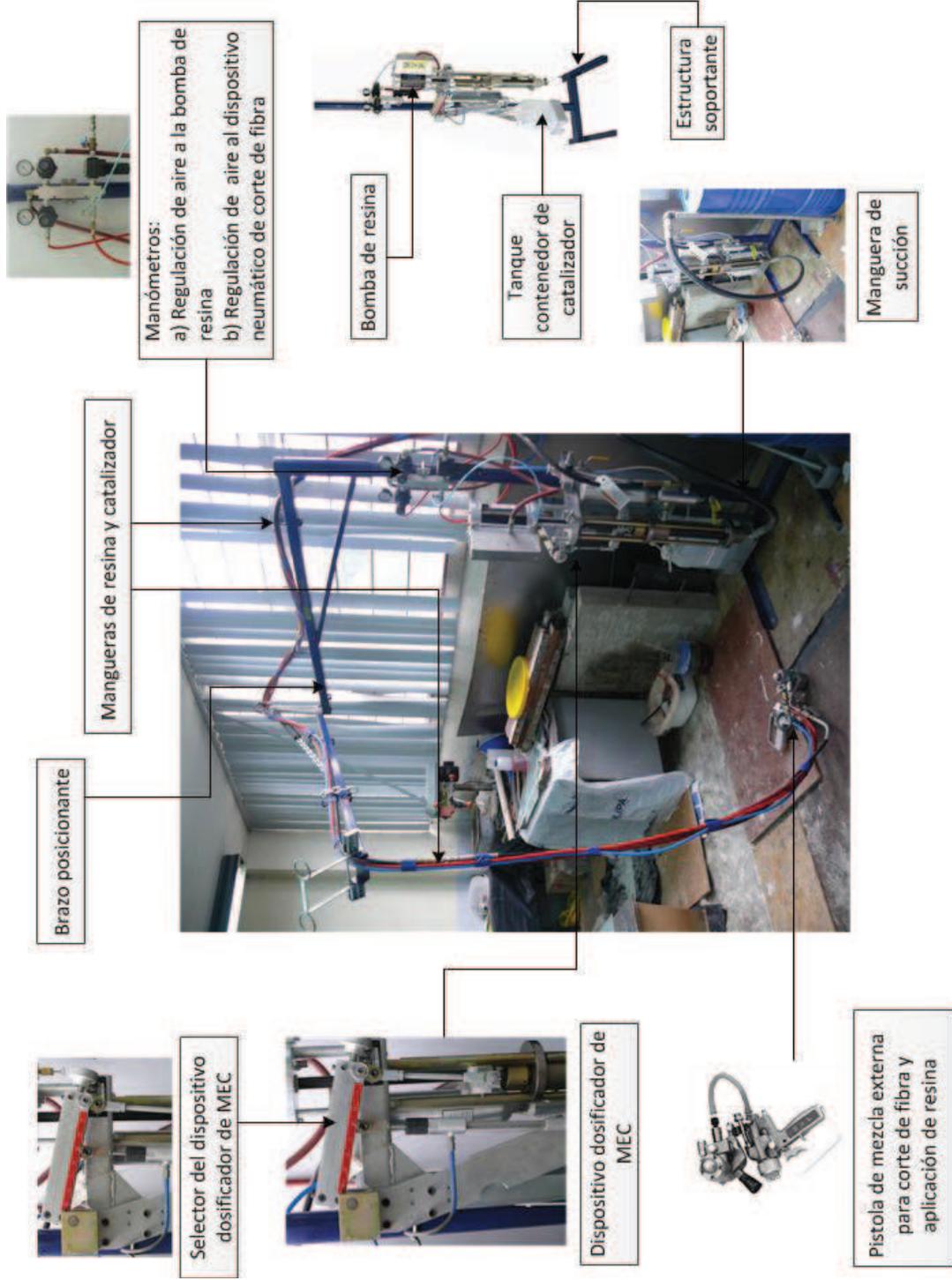


Figura 2.6. Equipo para moldeo por aspersión MVP y sus partes principales.

A continuación se describen las partes principales que constituyen la máquina para moldeo por aspersión.

2.1.2.2.1 *Dispositivo dosificador (émbolo-pistón) de catalizador MEKP*

La máquina de moldeo por aspersión empleada en este trabajo, fue diseñada y construida por Magnum Venus Products (MVP). Esta máquina cuenta con dos sistemas de bombeo. Por un lado, un sistema encargado de bombear la resina poliéster, y por otro, un sistema de bombeo secundario encargado de proporcionar el catalizador (MEKP). Tanto la resina como el catalizador son bombeados simultáneamente hacia la pistola de aspersión, donde conjuntamente con la fibra de vidrio (cortada), se aplican sobre la superficie de trabajo.

La bomba de resina está conectada por una articulación a la bomba de catalizador/iniciador. Las bombas de resina y catalizador tienen una relación fija de dosificación la una con respecto a la otra y se accionan juntas, bombeando una cantidad dada de resina y catalizador simultáneamente. Este principio de funcionamiento establece que la bomba de catalizador se encuentre unida a la bomba de resina y por tanto es impulsada por ésta. Por esta razón nunca se puede obtener una menor proporción de un componente con respecto al otro componente, es decir que la bomba del catalizador no puede funcionar independientemente de la bomba de resina ni bombear más catalizador. En determinadas circunstancias sólo se podría tener un problema con la bomba de resina y es que ésta entregue menos resina.⁵⁷ En la Figura 2.7 se muestran imágenes en detalle del dispositivo dosificador de catalizador de la máquina de aspersión empleada. En la Figura 2.8 se muestra una imagen explicativa de su funcionamiento.

⁵⁷MAGNUM VENUS PRODUCTS., (1999) "*MVP Troubleshooting: Testing and Adjusting your MVP Pumping System*", Estados Unidos, pág.2.

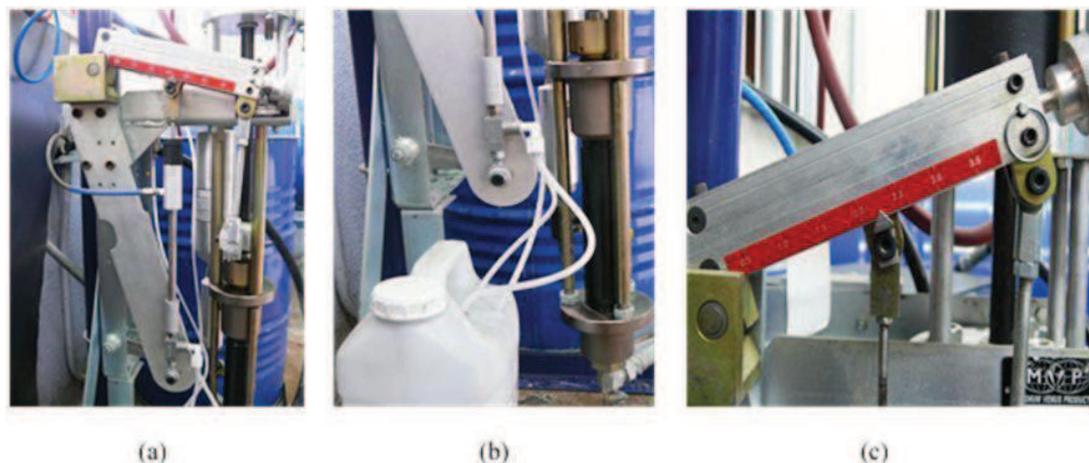


Figura 2.7. Partes principales de la bomba y dispositivo dosificador de MEKP, en la máquina de aspersión empleada: (a) vista general; (b) recipiente contenedor y mangueras de catalizador; (c) posicionador de dosificación mediante el brazo de bombeo.

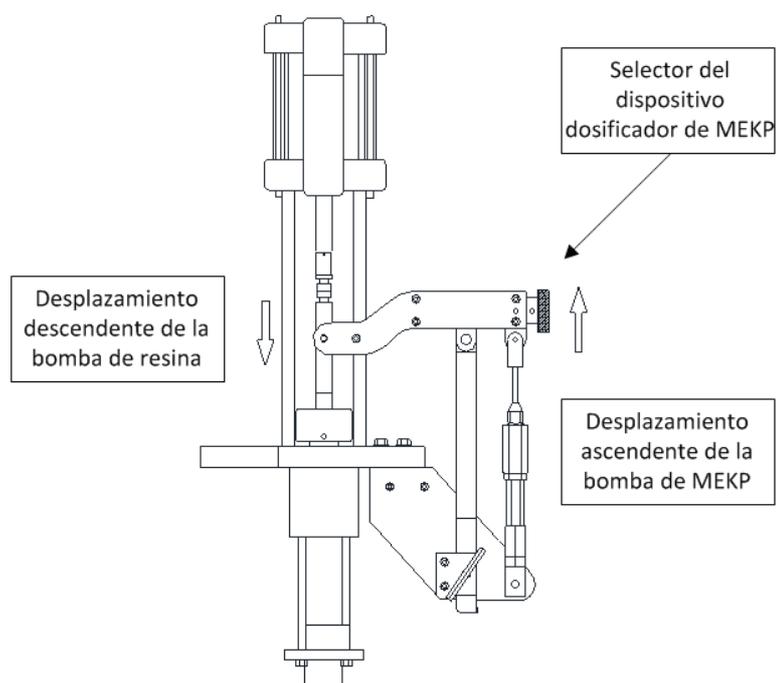


Figura 2.8. Funcionamiento del dispositivo dosificador de MEKP⁵⁸.

⁵⁸MAGNUM VENUS PRODUCTS., (1999) "MVP Troubleshooting: Testing and Adjusting your MVP Pumping System", Estados Unidos, pág. 2.

El sistema de bombeo del MEKP cuenta con un posicionador el cual se puede regular dependiendo de las necesidades de trabajo. Cada posición está distanciada 0,5 decímetros, iniciando desde la posición 0,5 hasta 3,5. En regulaciones inferiores a 2 la bomba proporciona menor cantidad de catalizador debido a que la carrera de la bomba de MEKP es muy corta.

2.1.2.2.2 *Brazo posicionante*

Su función principal es la de elevar los ductos y mangueras de catalizador y resina para conducirlos hasta la pistola de aplicación. Así se impide que las mangueras y ductos que transportan los reactivos desde las bombas se dañen o desgasten. Otra de las funciones del brazo posicionante es ayudar al operario de la máquina a controlar la estabilidad y ubicación de la pistola de aplicación sobre la superficie de trabajo.

2.1.2.2.3 *Mangueras de resina y catalizador*

Su función es la de transportar resina, catalizador y aire hacia la pistola de aspersion. La presión de trabajo en cada manguera puede controlarse mediante manómetros y válvulas de paso/cierre. El flujo de aire de atomización del catalizador debe ser lo suficientemente bajo como para reducir el exceso de pulverización y lo suficientemente alto como para atomizar el catalizador eficazmente. Esto permite al usuario obtener y operar bajo una eficiencia óptima. En la Figura 2.9 se indica una imagen de los manómetros empleados en la regulación de las presiones de trabajo.



Figura 2.9. Manómetros para regulación de presiones de trabajo.

2.1.2.2.4 Bomba de resina

Los sistemas de bombeo que emplea la máquina están basados en una “bomba de pistón de doble acción”. Estas bombas estilo doble esfera, entregan material en carrera tanto ascendente como descendente. La bomba es accionada por aire y su funcionamiento se resume a continuación.⁵⁹

i) Recorrido ascendente de la bomba

Los sellos de copa del pistón sellan sobre la pared del cilindro, la esfera del cuerpo del pistón sella sobre su alojamiento; y todo lo que se encuentra por encima del cuerpo del pistón es empujado hacia afuera. Un vacío es creado por debajo del cuerpo del pistón y nuevo material es atraído hacia el interior del cilindro. La esfera del cuerpo del pistón sella, obligando a todo el material por encima del pistón a salir fuera de la bomba. La esfera de entrada se eleva desde su alojamiento y el nuevo material es atraído hacia el interior del cilindro de la bomba. En la Figura 2.10 se puede observar el recorrido ascendente que realiza la bomba.

⁵⁹MAGNUM VENUS PRODUCTS., (1999) “MVP *Troubleshooting: Testing and Adjusting your MVP Pumping System*”, Estados Unidos, pág. 2.

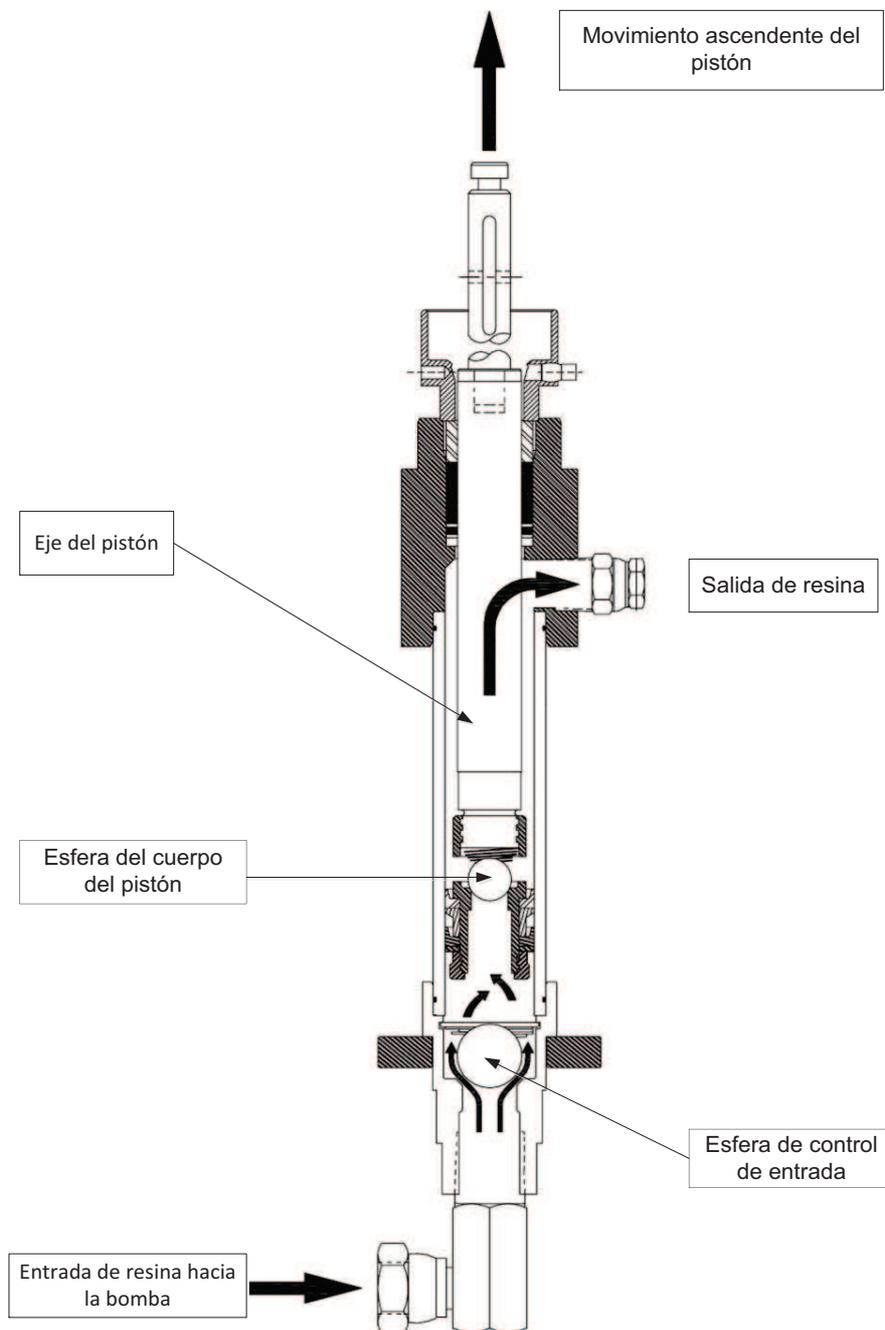


Figura 2.10. Carrera ascendente de la bomba de resina de doble efecto.⁶⁰

⁶⁰MAGNUM VENUS PRODUCTS., (1999) "MVP Troubleshooting: Testing and Adjusting your MVP Pumping System", Estados Unidos, pág. 3.

ii) Recorrido descendente de la bomba

La carrera descendente es una carrera de desplazamiento, lo cual significa que el material en el cilindro es desplazado por el vástago del émbolo y es así forzado a salir hacia afuera de la bomba. La esfera de entrada del cuerpo del cilindro se asienta, sellando el cilindro, el cual fuerza al material a desplazarse hacia arriba y hacia afuera de la bomba. La esfera del cuerpo del pistón se levanta de su asiento y permite que el material fluya a través del cuerpo del pistón y hacia afuera de la bomba. La esfera del cuerpo del pistón se levanta de su asiento permitiendo al material fluir hacia afuera de la bomba. La esfera de entrada del cuerpo del cilindro, sella el cilindro de la bomba forzando al material a través del cuerpo del pistón y afuera de la bomba. En la Figura 2.11 se puede observar el recorrido descendente que realiza la bomba.

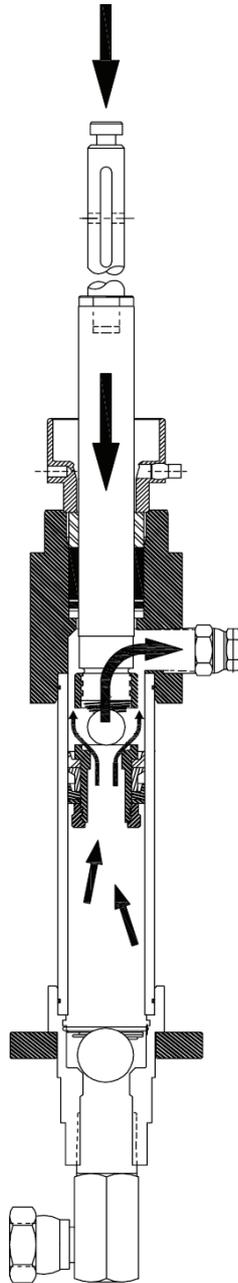


Figura 2.11. Carrera descendente de la bomba de resina de doble efecto.⁶¹

⁶¹MAGNUM VENUS PRODUCTS., (1999) "MVP Troubleshooting: Testing and Adjusting your MVP Pumping System", Estados Unidos, pág. 4.

2.1.2.2.5 Pistola de mezcla externa para corte de fibra y aplicación de resina MVP modelo ATC 4000

La pistola incorporada a la máquina de moldeo por aspersion es la pistola de mezcla externa ATC 4000. Esta pistola es la encargada de realizar la mezcla de resina, fibra de vidrio y MEKP sobre la superficie del molde. El gatillo de disparo neumático, incorporado a la pistola, da al operador un disparo controlado y preciso sobre el molde. En la Figura 2.12 se puede apreciar una vista general de la pistola empleada.



Figura 2.12. Pistola de mezcla externa para moldeo por aspersion MVP modelo ATC 400.⁶²

Algunas especificaciones técnicas de la pistola MVPATC 400 se presentan en la Tabla 2.6.

⁶²<http://www.mvpind.com/products/chopper-wetout-equipment/external-mix-atc-4000-chop-gun.html>

Tabla 2.6. Especificaciones técnicas de la pistola MVPATC 4000.⁶³

Características
Consumo de aire: 20-30 cfm
Dimensiones aproximadas
Longitud: 22 cm (8,6 in)
Ancho: 15 cm (5,9 in)
Altura: 30 cm (11,8 in)
Masa: 2 kg

2.1.2.3 Equipo para aplicación de gelcoat MVP

Para la aplicación de gelcoat, se empleó el equipo para Magnum Venus Products. Las características técnicas de este equipo se presentan en la Tabla 2.7, mientras que en la Figura 2.13 se muestra una imagen del equipo.

Tabla 2.7. Características técnicas de la máquina para aplicación de gelcoat MVP.⁶⁴

Características
Capacidades de salida: 0,45 - 2.7 kg/min
Catalizador: 1% a 4% en volumen
Consumo de aire: 5-7 cfm
Longitud: 213 cm (84 in)
Ancho: 69 cm (27 in)
Altura: 74 cm (29 in)
Peso: 114 kg (250 lb)
Presiones de bombeo
Requerimiento de aire mínimo: 100 psi en la línea principal
En bombeo de material: 30 – 50 psi
En atomización de catalizador: 15 – 25 psi

⁶³<http://www.mvpind.com/products/chopper-wetout-equipment/external-mix-atc-4000-chop-gun.html>

⁶⁴<http://www.mvpind.com/products/gelcoat-equipment/aps-gelcoat-system.html>



Figura 2.13. Equipo para aplicación de gelcoat MVP.

La pistola de aplicación de gelcoat tiene la función de mezclar el gelcoat con MEKP, en una mezcla externa que se fija a la superficie sobre la cual se realiza la aplicación. El gatillo de disparo neumático, incorporado en esta pistola, da al operador un tiro controlado y preciso al molde. En la Figura 2.14 se presentan imágenes de la pistola para aplicación de gelcoat empleada, mientras que algunas de sus características técnicas se presentan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Características de la pistola para aspersión de gelcoat MVP modelo ATG 3500.⁶⁵

Características
Consumo de aire:15-20 cfm
Dimensiones aproximadas
Longitud: 14,5 cm (5,7 in)
Ancho: 7 cm (2,7 in)
Altura:19,5 cm (7,6 in)
Masa:1,2 kg

⁶⁵<http://www.mvpind.com/products/gelcoat-equipment/atg-3500-gelcoat-gun.html>

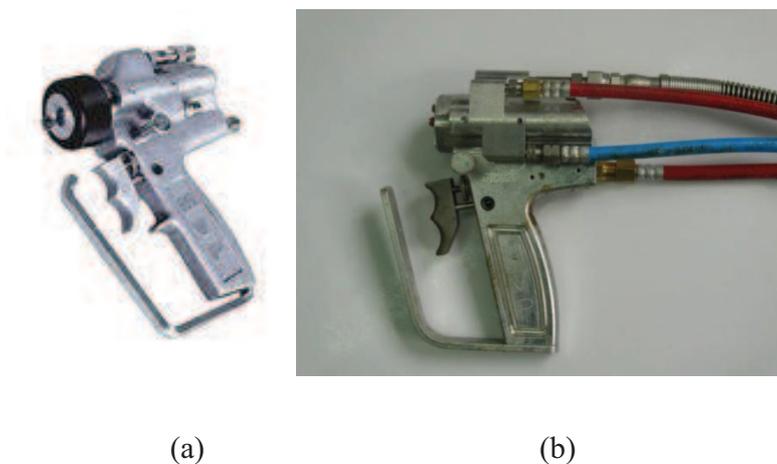


Figura 2.14. Pistola para aplicación de gelcoat MVP modelo ATG 3500 de mezcla externa: (a) vista en perspectiva; (b) vista lateral.⁶⁶

2.1.2.4 Estufa de secado VENTICELL

Para realizar el curado de los materiales compuestos fabricados a diferentes temperaturas, se utilizó una estufa marca VENTICELL, la cual se muestra en la Figura 2.15.

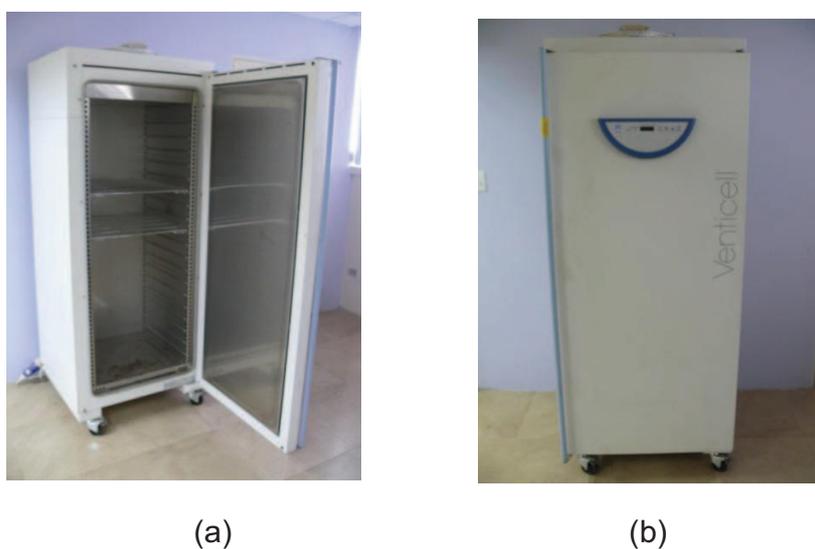


Figura 2.15. Estufa Venticell: (a) vista interior; (b) vista exterior.

⁶⁶<http://www.mvpind.com/products/gelcoat-equipment/atg-3500-gelcoat-gun.html>

En esta estufa se dio el curado a los materiales compuestos previamente elaborados, con aire forzado mediante un ventilador. El diseño posee un rango de temperatura que va desde 10 °C hasta 250 °C. Las dimensiones interiores de la estufa permitieron la colocación y secado de tableros de materiales compuestos realizados sobre moldes de vidrio de 40 x 40 cm.

2.1.2.5 Microscopio óptico MEIJI

El microscopio MEIJI modelo MX, que se encuentra en Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, fue utilizado para medir el espesor de las capas de recubrimiento superficial de gelcoat, en los materiales compuestos donde se requirió dicho recubrimiento. El microscopio descrito anteriormente, cuenta con 5 lentes objetivo y software propio, el cual permite la visualización de espesores de hasta 0,20 mm de una manera rápida. Para la visualización de las diferentes capas superficiales de gelcoat, en las diferentes configuraciones de materiales compuestos elaborados, se empleó la lente 50X. En la Figura 2.16 se muestra la imagen del microscopio empleado.



Figura 2.16. Microscopio MEIJI modelo MX.

2.1.2.6 Horno de cámara CWF

Para la incineración del material compuesto, con la finalidad de obtener la masa del refuerzo se utilizó un horno de cámara modelo CWF, el cual tiene un volumen de 13 litros y una velocidad de calentamiento de hasta 1000 °C en 30 minutos y 1200 °C en 40 minutos. En la Figura 2.17 se puede apreciar el horno de cámara con controlador 3216P1.



Figura 2.17. Horno eléctrico empleado en la incineración de las muestras.

2.1.2.7 Balanza electrónica digital

En el pesaje de diferentes materiales empleados se utilizó una balanza electrónica digital ADAM modelo PGL 6001, la cual tiene una capacidad de 6000 g y una apreciación de 0,1 g. La balanza se presenta en la Figura 2.18.



Figura 2.18. Balanza electrónica digital AE ADAM.

2.1.2.8 Máquina universal de ensayos

Las probetas de flexión y tracción fueron ensayadas en la máquina universal Tinius Olsen modelo H25K-S UTM. Las especificaciones de este equipo son detalladas a continuación en la Tabla 2.9.

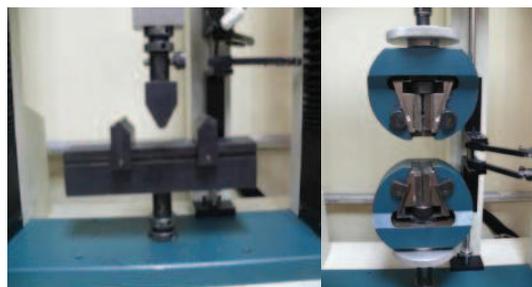
Tabla 2.9. Características de la máquina universal Tinius Olsen modelo H25K-S UTM.

Características	
Velocidades de prueba y desplazamiento	0,001 a 1000 mm (0,001 a 40 in) por minuto para fuerzas de 10 kN y 500 mm (20 in) por minuto para carga completa de 25 kN
Celda de carga	25 kN de capacidad
Velocidad de retorno	0,001 a 1000 mm (0,001 a 40 in)/min
Velocidad del cabezal	1100 mm/min (43,3 in/min) con celda de carga de 25 kN
Espacio de trabajo	Separación vertical de 1100 mm (43,3 in) sin ninguna herramienta y separación horizontal de 405 mm (16 in) entre columnas

Las probetas para tracción fueron ensayadas usando mordazas cuneiformes conjuntamente con un extensómetro de grandes deformaciones. Las probetas para flexión fueron ensayadas usando el equipo de flexión a tres puntos. Se presenta una imagen de la máquina universal de ensayos en la Figura 2.19.



(a)



(b)

(c)

Figura 2.19. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25K-S UTM: (a) vista general; (b) equipo para flexión a tres puntos; (c) mordazas cuneiformes.

2.1.2.9 Equipo de impacto por caída de dardo

Por último, las probetas de impacto fueron ensayadas con el equipo de caída de dardo. En el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones está disponible el equipo que se indica en la Figura 2.20.

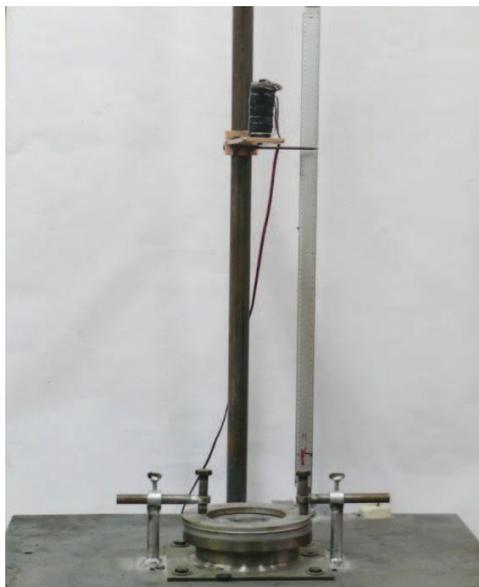


Figura 2.20. Equipo de caída de dardo.

El dardo tiene una longitud de 69 mm, una nariz semiesférica de 20 mm de diámetro y un peso de 0,0706 kg. El equipo está provisto de un anillo que posee 2 puntos de sujeción con un diámetro interno de 40 mm y un diámetro externo de 250 mm. Estos elementos se pueden apreciar en la Figura 2.21.



(a)



(b)

Figura 2.21. Accesorios de equipo de ensayos de impacto: (a) Anillo de sujeción;(b) dardo hemisférico para impacto.

2.2 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Inicialmente se estableció el tipo de molde adecuado para reducir los defectos superficiales de las probetas y también para disminuir las pérdidas de material que se dan en el proceso de aspersion. Luego se establecieron las presiones de la máquina de aspersion conforme la variación de los porcentajes volumétricos de los elementos constitutivos de la matriz poliéster (estireno + octoato de cobalto). La metodología de prueba consistió en rociar la matriz en hojas de papel periódico y encontrar el patrón de rociado apropiado para dicha mezcla. Cabe señalar que esto se consiguió variando la presión de bombeo resina/catalizador.

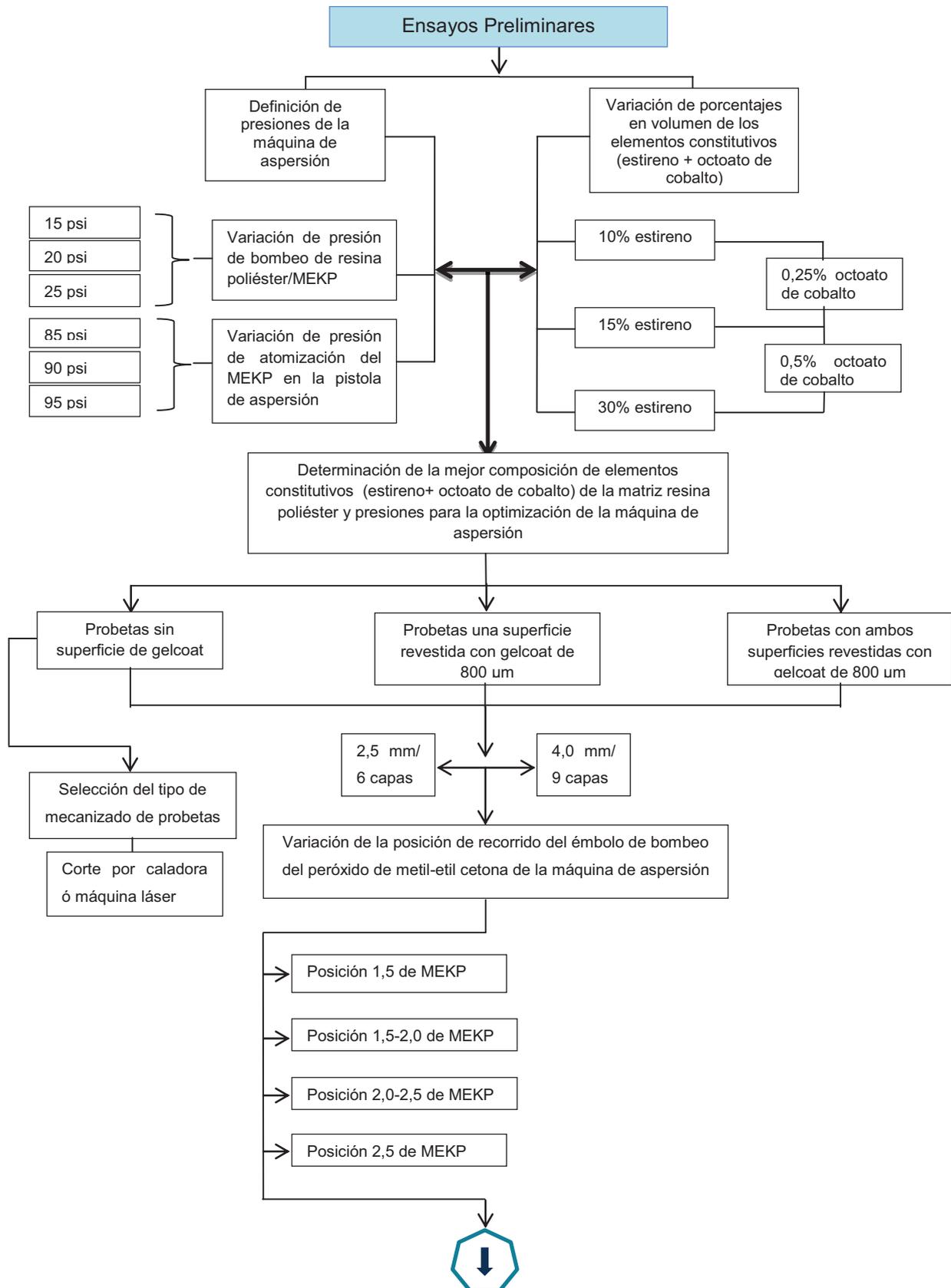
A continuación se obtuvieron tableros de material compuesto sin gelcoat, para lo cual se tomó como variable el espesor del tablero en función del número de capas de material compuesto. Una vez definido el número de capas para cada tablero se seleccionó el tipo de mecanizado de los tableros para la extracción de las probetas. Se debe señalar que en un inicio se propusieron dos tipos de corte para la extracción de las probetas requeridas, uno mediante caladora y el otro mediante corte por láser.

Posteriormente se desarrollaron tableros sin gelcoat y con gelcoat, teniendo como variable principal la posición de la bomba de MEKP. Transcurrido el tiempo de curado a temperatura ambiente se evaluaron las propiedades mecánicas a tracción y flexión de las probetas de material compuesto mediante moldeo por aspersion. Para determinar la configuración con mejores características, los resultados fueron evaluados con la ayuda del programa Statgraphics. Con la formulación que presentó la mejor combinación de propiedades mecánicas, se varió la temperatura y tiempo de curado para estudiar la influencia del curado sobre el material compuesto.

Con el material que presentó las mejores características y propiedades mecánicas, se fabricaron tableros para pruebas de ensayo de impacto. Finalmente se construyó un prototipo seleccionado de un producto existente en el mercado y se evaluó su desempeño en base a factores como: durabilidad, dimensiones y propiedades mecánicas.

Se indica además que para cada configuración se ensayaron siete probetas con el fin de descartar los dos valores menos representativos del grupo de datos con el propósito de analizar resultados más homogéneos y realizar un mejor análisis estadístico.

En la Figura 2.22 se esquematiza la metodología experimental seguida en el proyecto de investigación.



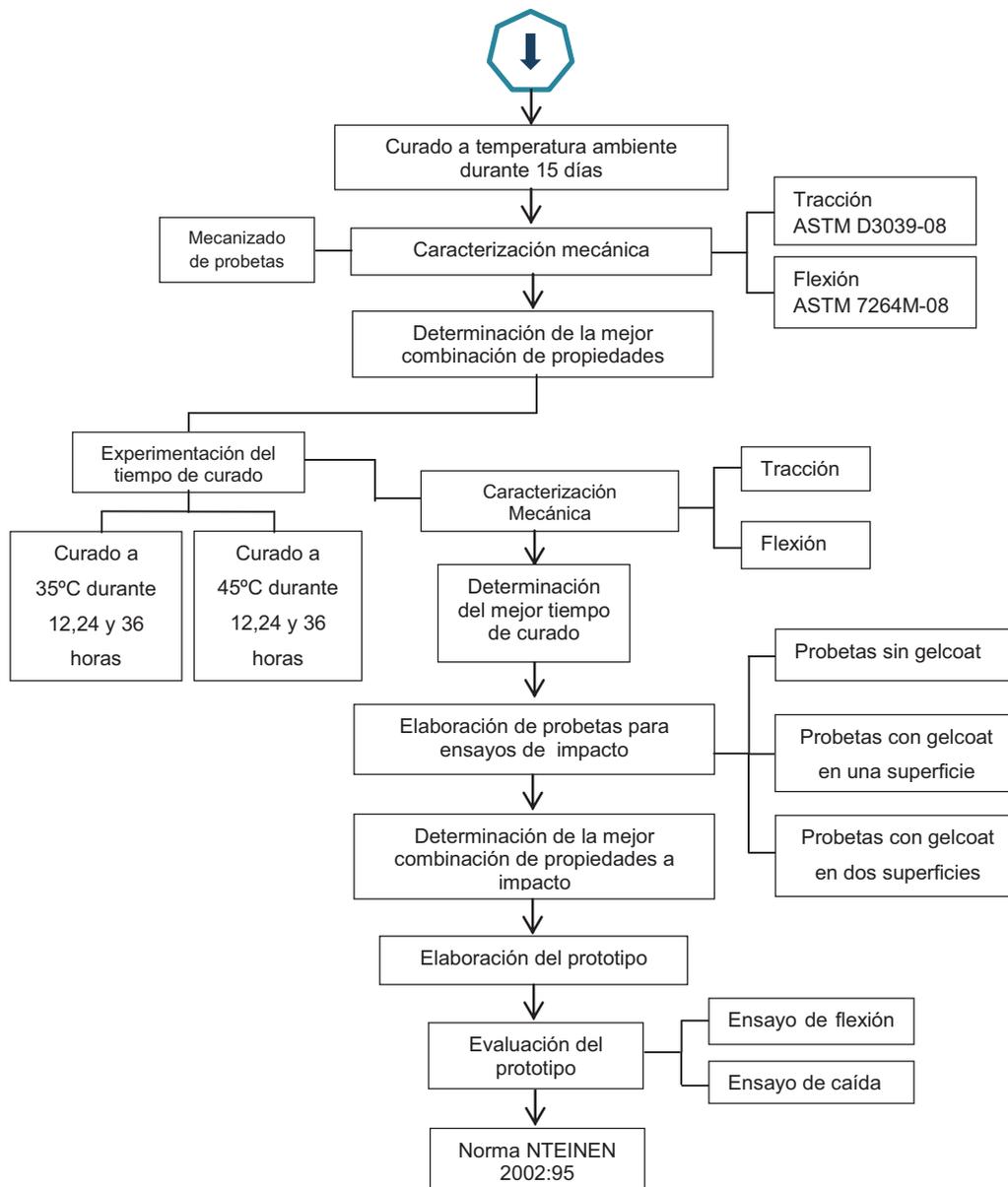


Figura 2.22. Esquema de la estrategia metodológica empleada.

2.3 ENSAYOS PRELIMINARES

En una primera fase se realizaron ensayos preliminares con el objetivo general de determinar las variables del proceso las que afectan significativamente las propiedades mecánicas del material.

Los objetivos específicos de estos ensayos fueron:

- i) Determinar la influencia que tiene la posición del dosificador de MEKP de la máquina de aspersión en las propiedades del material.
- ii) Determinar la influencia que tiene la adición de gelcoat (recubrimiento superficial) en las propiedades del material.

Previamente, se reguló y estableció el patrón de aspersión adecuado de la resina poliéster y la fibra de vidrio de la máquina de aspersión. La máquina depende directamente de la viscosidad de la resina para el correcto funcionamiento y facilidad de limpieza así como también la reducción de costos por mantenimiento.

Una vez regulado el patrón de aspersión se procedió a incorporar el bombeo del peróxido de metil-etil cetona, que se mezcla con la resina poliéster a la salida de la boquilla de la pistola. Por otro lado, se variaron las posiciones de recorrido del dispositivo dosificador embolo-pistón del MEKP desde la posición 0,5 hasta la posición 3,5 con intervalos de 0,5 dm.

Una vez determinada la mejor posición de bombeo de MEKP, se desarrollaron tableros sin gelcoat obteniendo materiales con acabado superficial de mala calidad. Con este precedente se elaboraron materiales aplicando una capa de gelcoat al molde para después de un tiempo prudencial de curado efectuar la aspersión y laminación, con lo que se obtuvo un recubrimiento de gelcoat en una de las superficies del tablero (configuración CG₁).

De la misma forma se obtuvieron materiales con dos capas de recubrimiento de gelcoat (configuración CG₂). La primera capa de recubrimiento de gelcoat se la obtuvo de la misma manera que para los materiales de configuración CG₁. La

segunda capa de gelcoat se la obtuvo aplicando esta resina luego de realizados los procesos de aspersión y laminado del material.

Luego de obtener los diferentes materiales, se determinaron varias propiedades físicas como la densidad y se examinaron visualmente los compuestos. Luego se efectuó la caracterización mecánica mediante ensayos de tracción y flexión.

2.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATRIZ POLIÉSTER

2.3.1.1 Densidad de la resina poliéster ANDERPOL 895

Es muy importante conocer la densidad de la matriz, ya que esto permite conocer las fracciones volumétricas de refuerzo obtenidas en las diferentes composiciones de los materiales obtenidos. Debido a que la hoja técnica de la resina ANDERPOL 859 no especifica el valor de su densidad, se elaboró una probeta de dimensiones nominales 119x129x27 mm, para determinar su volumen, su masa y finalmente su densidad. La probeta elaborada se muestra en la Figura 2.23.



Figura 2.23. Probeta de resina poliéster elaborada.

2.3.1.2 Caracterización mecánica de la matriz

Para la caracterización mecánica de la matriz se elaboraron 7 probetas para ensayos a tracción bajo la norma ASTM D3039-08. De los resultados obtenidos, se eliminaron tanto el valor más alto como el más bajo, por considerarlos no representativos. Se

debe señalar que esta norma establece los parámetros para ensayos de tracción en materiales compuestos. Sin embargo, se utilizó esta norma para realizar ensayos de tracción en probetas constituidas en su totalidad de resina poliéster, debido a que los resultados obtenidos se utilizaron en comparaciones posteriores con los materiales compuestos ensayados bajo la misma norma. En la Figura 2.24 se presenta una imagen del molde empleado en la obtención de éstas probetas.



Figura 2.24. Molde empleado en la obtención de probetas para ensayos de tracción de matriz poliéster.

De igual forma, se elaboraron 7 probetas para ensayos a flexión y 20 para los ensayos a impacto bajo la norma ASTM D7264-07 y ASTM D5628-10 respectivamente. En la Figura 2.25 se presentan imágenes de los moldes empleados en la obtención de las probetas a flexión, mientras que en la Figura 2.26 se observa el molde empleado para la obtención de las probetas de impacto.



Figura 2.25. Moldes empleados en la obtención de probetas para ensayos de flexión de matriz poliéster.



Figura 2.26. Molde empleado en la obtención de probetas para ensayos de impacto de matriz poliéster.

2.3.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS REFUERZOS

Para determinar la densidad de la fibra de vidrio se utilizó el método de Arquímedes. Este método consiste en sumergir una muestra de refuerzo de masa conocida en un volumen determinado de fluido colocado en un recipiente graduado. Una vez sumergido por completo el refuerzo se espera un lapso de tiempo prudencial (alrededor de 24 horas) y se vuelve a observar el nivel que el fluido alcanza en el recipiente graduado. En la Figura 2.27 se muestra una imagen de la inmersión de una muestra de roving de fibra de vidrio en un volumen de resina poliéster preparado.



Figura 2.27. Inmersión de la muestra de refuerzo en resina poliéster preparada.

2.3.3 DETERMINACIÓN DE LAS FRACCIONES VOLUMÉTRICAS DE LAS DIFERENTES COMPOSICIONES

Es necesario conocer la fracción volumétrica de fibra existente en las diferentes configuraciones de material compuesto elaborado. Como se ha mencionado, el proceso de aspersión es un proceso semiautomático y no se conoce con exactitud la proporción exacta de fibra que se adiciona como refuerzo al material compuesto. Por esto, la determinación de la fracción volumétrica se realizó incinerando las muestras según lo determina la norma ASTM D3171-11⁶⁷, la cual establece varios métodos para la determinación de fracciones volumétricas en materiales compuestos en los cuales se desconocen las cantidades constitutivas iniciales de refuerzo o de matriz.

Se extrajeron muestras cuadradas de 35 mm de lado de cada tipo de material elaborado. Una vez obtenidas las muestras se determinaron sus dimensiones promedio (largo, ancho y espesor), masas y se calcularon sus volúmenes. Después se colocaron las muestras en crisoles adecuados y seguidamente se las incineró en un horno a 500°C durante 6 horas. En la Figura 2.28 se observan las muestras que se prepararon para ser incineradas.



Figura 2.28. Muestras de materiales compuestos para incinerar.

Así, la matriz de resina poliéster se incineró por completo, obteniendo como residuo únicamente la masa de fibra presente en cada muestra de material. Se indica en la

⁶⁷ASTM D3171., (2011) “Métodos de Ensayos Normalizados para Determinación de Constituyentes de Materiales Compuestos”, EE.UU, pág.11.

norma ASTM D3171-11⁶⁸ que una vez extraídas las muestras del horno éstas se deben colocar en un desecador a fin de evitar la absorción de humedad del medio circundante. Finalmente se pudo determinar la masa presente en cada muestra con la ayuda de una balanza analítica. En la Figura 2.29 se muestran imágenes de los residuos posteriores a la incineración.



Figura 2.29. Muestras de material compuesto para determinación de la fracción volumétrica existente; a) colocada en crisoles; b) colocadas en un desecador.

En un material compuesto, el volumen total del material (V_t) se divide en tres partes: (i) Volumen de fibra (V_f); (ii) Volumen de matriz (V_m) y (iii) Volumen de vacíos (V_v). Donde el volumen de vacíos corresponde al volumen de burbujas de aire atrapado o de gases que emanan de la resina durante el proceso de curación. Matemáticamente se puede expresar como:⁶⁹

$$\text{Ecuación 2.1} \quad V_t = V_f + V_m + V_v$$

⁶⁸ASTM D3171., (2011) “*Métodos de Ensayos Normalizados para Determinación de Constituyentes de Materiales Compuestos*”, EE.UU, pág.4.

⁶⁹LEVY F., (2006) “*Compósitos Estructurais: Ciencia e Tecnologia*”, 1ra Edición, Edgard Blucher, Brasil, pág. 232, 233, 234.

Se pueden definir por lo tanto las fracciones volumétricas de las fibras (v_f), la fracción volumétrica de la matriz (v_m), y de los vacíos (v_v), respectivamente como:⁷⁰

$$\text{Ecuación 2.2} \quad v_f = \frac{V_f}{V_t}; v_m = \frac{V_m}{V_t}; v_v = \frac{V_v}{V_t}$$

Donde además debe cumplirse la igualdad:

$$\text{Ecuación 2.3} \quad v_f + v_m + v_v = 1$$

En materiales compuestos de buena calidad, la fracción volumétrica de los vacíos es baja, idealizándola con valores inferiores al 1%, por lo que las fracciones volumétricas de fibra y matriz tienen valores significativamente superiores a la de los vacíos. Por tanto, para muchos procesos donde se realizan operaciones de moldeo en vacío, y autoclaves se puede considerar la simplificación:

$$\text{Ecuación 2.4} \quad v_f + v_m = 1$$

Sin embargo, si se quiere controlar la calidad de un material compuesto de forma precisa, se necesita justamente conocer la fracción volumétrica de los vacíos existentes. Por tanto, si se conocen los valores de la masa del compuesto (m_c) así como su volumen (V_c), su densidad puede ser determinada de la forma:

$$\text{Ecuación 2.5} \quad \rho_{compuesto} = \frac{m_c}{V_c} = \frac{m_T}{V_t}$$

$$\text{Ecuación 2.6} \quad \rho_{compuesto} = \frac{m_c}{V_f + V_m + V_v}$$

La Ecuación 2.6 también puede escribirse de la forma:

$$\text{Ecuación 2.7} \quad \rho_{compuesto} = \frac{m_c}{\left[\left(\frac{m_{fibra}}{\rho_{fibra}} \right) + \left(\frac{m_{matriz}}{\rho_{matriz}} \right) + V_v \right]}$$

⁷⁰LEVY F., (2006) "Compósitos Estructurais: Ciencia e Tecnologia", 1ra Edición, Edgard Blucher, Brasil, pág. 235.

Las fracciones en masa de la fibra (M_f) y de la matriz (M_m) se definen como:

$$\text{Ecuación 2.8} \quad M_f = \frac{m_{fibra}}{m_c}; M_m = \frac{m_{matriz}}{m_c}$$

Finalmente se pueden dividir numerador y denominador de la Ecuación 2.7 para el término m_c , que al reordenar y despejar se tiene la expresión:⁷¹

$$\text{Ecuación 2.9} \quad V_v = 1 - \rho_{compuesto} \left[\left(\frac{M_{fibra}}{\rho_{fibra}} \right) + \left(\frac{M_{matriz}}{\rho_{matriz}} \right) \right]$$

O en forma de porcentaje como:⁷²

$$\text{Ecuación 2.10} \quad V_v\% = 100 - 100\rho_{compuesto} \left[\left(\frac{M_{fibra}}{\rho_{fibra}} \right) + \left(\frac{M_{matriz}}{\rho_{matriz}} \right) \right]$$

2.3.4 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DE GELCOAT

Como se mencionó en el literal 2.1.2.5, mediante la utilización del microscopio óptico MEIJI modelo MX se realizaron las mediciones del espesor de capa de recubrimiento de gelcoat en los materiales en los cuales se utilizó dicho recubrimiento. Estos materiales son los de configuración CG₁ (recubrimiento de gelcoat en una de las superficies del material) y CG₂ (recubrimiento de gelcoat en ambas superficies del material). La medición de la capa del recubrimiento se realizó en materiales que posteriormente sirvieron tanto para ensayos de tracción como de flexión. En la Figura 2.30 se observa la capa de recubrimiento observada en el microscopio con un lente de aumento de 50X en (a) un material con configuración CG₁, y (b) un material con configuración CG₂.

⁷¹LEVY F., (2006) "Compósitos Estructurais: Ciencia e Tecnologia", 1ra Edición, Edgard Blucher, Brasil, pág. 250.

⁷²LEVY F., (2006) "Compósitos Estructurais: Ciencia e Tecnologia", 1ra Edición, Edgard Blucher, Brasil, pág. 250.

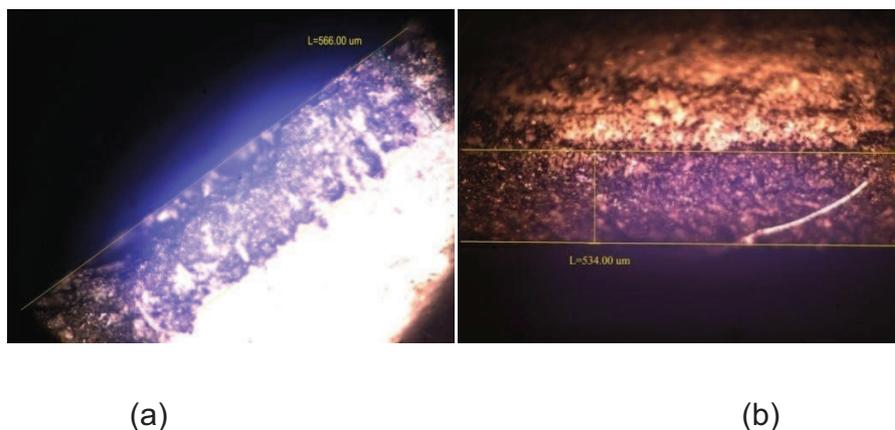


Figura 2.30. Micrografía óptica de muestras de materiales compuestos para la medición del espesor de la capa de gelcoat: (a) en un material de configuración CG_1 ; y (b) en un material de configuración CG_2 .

2.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental está respaldado en una estrategia metodológica que busca alcanzar los objetivos planteados. Se detalla el proceso para la obtención de cada una de las probetas propuestas que posteriormente fueron caracterizadas mecánicamente. Luego, se presenta la designación de las diferentes configuraciones a tracción, flexión e impacto con el objeto de facilitar la identificación de las probetas. En la Tabla 2.10 se resume el tipo y número de probetas elaboradas.

Tabla 2.10. Tipo y número de probetas elaboradas en el presente trabajo.

Ensayos preliminares										
Configuración de capas de resina y refuerzo	Curado	Espesor/ Número de capas	Variación de posición de MEKP	Máquina de Corte	Número de probetas para ensayos de:					
					Tracción	Flexión	Impacto			
Matriz de resina poliéster-refuerzo	Temperatura ambiente, 15 días	2,5/6	1,5	Caladora	7	-	-			
			1,5-2,0		7	-	-			
			2,0-2,5		7	-	-			
			2,5		7	-	-			
		4,0/9	1,5		-	7	-	-		
			1,5-2,0		-	7	-	-		
			2,0-2,5		-	7	-	-		
			2,5		-	7	-	-		
		Gelcoat+(Matriz de resina poliéster-refuerzo)	2,5/6		2,0-2,5	7	-	-		
					4,0/9	-	7	-		
Gelcoat+(Matriz de resina poliéster-refuerzo)+gelcoat	2,5/6	2,0-2,5	7	-	-					
		4,0/9	-	7	-					
Total probetas	84									
Experimentación										
Mejor combinación	Curado a 35°C - 12 horas	2,5	2,0-2,5	Caladora	7	-	-			
		4,0			-	7	-			
	Curado a 35°C - 24 horas	2,5			7	-	-			
		4,0			-	7	-			
	Curado a 35°C - 36 horas	2,5			7	-	-			
		4,0			-	7	-			
	Curado a 45°C - 12 horas	2,5			7	-	-			
		4,0			-	7	-			
	Curado a 45°C - 24 horas	2,5			7	-	-			
		4,0			-	7	-			
	Curado a 45°C - 36 horas	2,5			7	-	-			
		4,0			-	7	-			
	Total probetas	84								

Tabla 2.10. Tipo y número de probetas elaboradas en el presente trabajo (continuación).

Configuración de capas de resina y refuerzo	Curado	Espesor/ Número de capas	Variación de posición de MEKP	Máquina de Corte	Número de probetas para ensayos de:		
					Tracción	Flexión	Impacto
Matriz de resina poliéster-refuerzo	Curado a 35°C durante 12 horas	2,0	2,0-2,5	Caladora	-	-	20
Gelcoat+(Matriz de resina poliéster-refuerzo)					-	-	20
Gelcoat+(Matriz de resina poliéster-refuerzo)+gelcoat					-	-	20
Matriz de resina poliéster-refuerzo	Temperatura ambiente, 15 días				-	-	20
Prototipo							
Material Compuesto					-	2	2
Total probetas	252						

2.4.1 ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Para la caracterización del material se deben elaborar probetas normalizadas de acuerdo a los ensayos de tracción, flexión e impacto. Cada ensayo se encuentra especificado según la norma respectiva. Se deben seguir las especificaciones indicadas en cada norma para la correcta realización de cada ensayo.

Los volúmenes preparados de matriz poliéster son relativamente grandes. Esto se debe a la capacidad de succión de la máquina de aspersión. Además, es muy importante que la manguera por donde se succiona la resina poliéster se encuentre sumergida por completo, pues de no ser así, ingresa aire hacia los ductos y mangueras del equipo. Esto repercute de manera negativa en el proceso pues al accionar la pistola de aspersión se expulsa no sólo la resina sino también aire. Esto

provoca salpicaduras excesivas de resina y un patrón de rociado intermitente y descontrolado.

De igual manera cabe mencionar que es importante regular las presiones de bombeo, tanto para la resina como para el catalizador. Esto se debe a que con presiones demasiado altas estos materiales son atomizados en exceso, lo que incide en bajas tasas de aplicación y excesiva volatilización. Por otro lado, presiones de bombeo muy bajas inciden en que se forme un chorro a la salida de la pistola, con lo que se producen tasas de aplicación excesivas, ineficiente distribución de la matriz y aumento de desperdicios.

Ya en el proceso de elaboración, el primer paso consiste en obtener la mezcla que será usada como matriz. Primero se coloca una considerable cantidad de resina poliéster en un recipiente, se recomienda como mínimo de 5 a 10 litros de resina. Después se debe añadir una cantidad de estireno del 15% del volumen de resina para disminuir la viscosidad del poliéster. Cuando se consigue una mezcla homogénea, se coloca el 0,25% de octoato de cobalto para iniciar el curado y la mezcla adquiere una coloración violeta, como se observa en la Figura 2.31.



Figura 2.31. Resina poliéster mezclada con estireno y octoato de cobalto para utilizarla en el proceso de aspersion.

Una vez obtenida la mezcla se prepara de la máquina de aspersión. Se coloca el roving de fibra de vidrio en el dispositivo de corte ubicado en la parte superior de la pistola de aplicación y se regula la velocidad de corte, mediante la regulación de un tornillo de entrada de aire. Por otra parte, el molde debe ser previamente limpiado para remover residuos o impurezas que podrían afectar la calidad del material que se obtendrá. Seguidamente se aplican 5 capas de cera desmoldante en toda la superficie, las cuales tienen que seguir un proceso de pulido entre cada capa. En la Figura 2.32 se presenta la correcta colocación del roving de fibra de vidrio en el dispositivo cortador de fibra, que se localiza en la parte superior de la pistola de aspersión.



Figura 2.32. Colocación del roving de fibra de vidrio en el dispositivo de corte de la pistola de mezcla externa en la máquina de aspersión.

El siguiente paso es definir la posición de recorrido del brazo del dispositivo dosificador émbolo pistón del peróxido de metil-etil cetona que se encuentra en la máquina de aspersión. Se abre la válvula de compuerta para el ingreso del aire comprimido hacia la máquina, con lo cual se pone en funcionamiento el equipo. Es aquí donde la máquina de aspersión empieza a succionar simultáneamente la mezcla de resina y el peróxido de metil-etil cetona, que se combinarán a la salida de la pistola de aspersión al momento de presionar el gatillo de disparo. En la Figura

2.33 se muestra la selección de posición del dispositivo dosificador émbolo pistón del peróxido de metil-etil cetona.

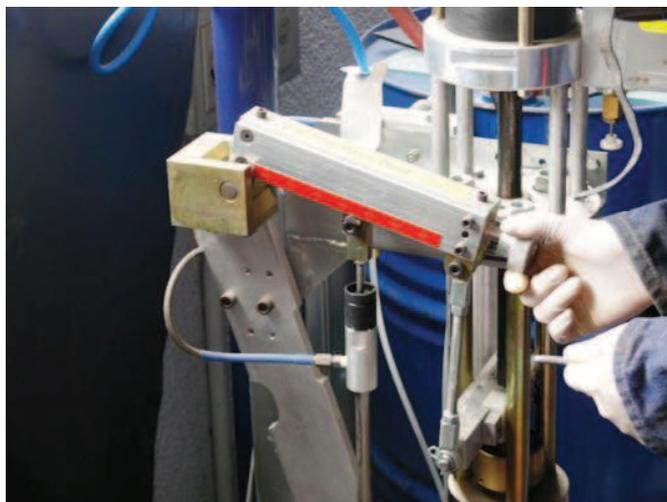


Figura 2.33. Selección de la posición de bombeo del dispositivo dosificador émbolo pistón del peróxido de metil-etil cetona.

Dependiendo de las características del material que se desea obtener, en los tableros se aplicó una capa de gelcoat mediante la máquina de aspersión de gelcoat del LANUM. Luego de aplicar el gelcoat y esperar alrededor de 30 minutos (tiempo de curado), se aplica la matriz de resina y su refuerzo. En la Figura 2.34 se puede observar la aplicación de gelcoat.



Figura 2.34. Aplicación de gelcoat.

Una vez aplicada la capa de gelcoat, se procede a la aspersión de una única capa de matriz poliéster, con el fin de tener una mejor impregnación y humectación de la fibra de vidrio en la posterior capa. Luego se aplican las sucesivas capas de matriz-fibra de vidrio, como se puede observar en la Figura 2.35.



Figura 2.35. Moldeo por aspersión (capa simultánea de fibra de vidrio y matriz resina poliéster).

Para obtener un determinado espesor se debe depositar un número correspondiente de capas de fibra de vidrio, por lo que es necesario laminar entre capas para retirar el exceso de fibra y también aire atrapado entre capas. En la Figura 2.36 se observa el proceso de laminación (compactación entre capas) de la matriz poliéster y la fibra de vidrio que se realizó con ayuda de rodillos.



Figura 2.36. Proceso de laminación con rodillo.

Después de 15 minutos de haber finalizado el proceso de moldeo por aspersión, cuidadosamente con la ayuda de una herramienta cortante se recorta el exceso del material compuesto, como se puede observar en la Figura 2.37.



Figura 2.37. Recorte de exceso de material compuesto.

Aproximadamente en 24 horas, el tablero de material compuesto puede ser desmoldado. Para evitar posibles deformaciones se recomienda desmoldar después de un tiempo prudencial de 72 horas. Finalmente, de cada tablero de material compuesto se extrae el número suficiente de probetas para los ensayos correspondientes, sin olvidar que cada probeta requiere un lijado de las aristas y bordes para eliminar concentradores de esfuerzo y asegurar un buen acabado. En la Figura 2.38 se puede observar el corte del material compuesto mediante caladora eléctrica.

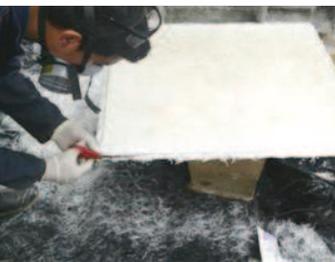


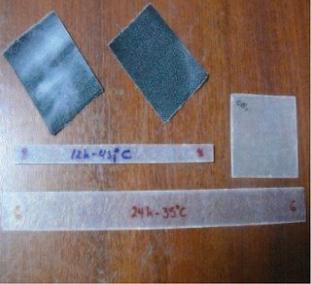
Figura 2.38. Extracción de probetas normalizadas de los tableros de material compuesto.

En cuanto al control de las dimensiones es crucial el espesor de la probeta, debido a que influye directamente en los requerimientos de los ensayos. Como este proceso tiene diferentes variables, el número de capas viene establecido de acuerdo a la velocidad del operador. Además después de cada aplicación de resina y fibra es necesario laminar; esto ayudará a humectar y retirar las fibras de vidrio que se encuentren en exceso. Es decir se procura que los tableros tengan un espesor lo más homogéneo posible alrededor de la superficie del tablero. En la Tabla 2.11 se puede apreciar el proceso reproducible para la obtención de probetas para los diferentes requerimientos.

Tabla 2.11. Proceso de elaboración de probetas.

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
1	Almacenamiento de resina y fibras	Se recomienda mantener la resina y la fibra a temperatura ambiente.	
2	Preparación de molde	Limpieza y aplicación de cera desmoldante.	

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
3	Preparación de mezcla	<p>Mezcla de poliéster, estireno y octoato de cobalto.</p> <p>Depende del área del tablero y espesor a realizar.</p>	
4	Colocación de capa de gelcoat	<p>Distribución uniforme, se requiere 3 capas.</p> <p>Depende del acabado que se quiera tener.</p>	
5	Colocación de matriz y refuerzo mediante pistola de aspersión.	Distribución uniforme de resina y fibra dentro del tablero.	
6	Laminación	Retirar material en exceso y humectar fibra de vidrio.	
7	Retirar material	<p>Esperar tiempo de gelificación.</p> <p>10 min.</p>	

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
8	Curado	<p>Depende del proceso:</p> <p>15 días a temperatura ambiente.</p> <p>12,24,36 horas a 35°C ó 45°C</p>	
9	Desmoldeo	Retirar el material compuesto del tablero que sirvió como molde.	
10	Cortar probetas	Trazar las dimensiones de las probetas y cortar mediante caladora.	
12	Lijado de aristas	<p>Mejorar acabado superficial.</p> <p>Comprobar dimensiones normalizadas.</p>	
13	Inspección del acabado	Revisión visual del acabado final de las probetas comprobación dimensional.	

2.4.1.1 Probetas para ensayos de tracción

Se elaboraron diferentes configuraciones que fueron el resultado de variaciones de algunos parámetros y variables del proceso como posición de bombeo del dispositivo dosificador de peróxido metil-etil cetona, el tiempo y temperatura de curado. En cuanto a la composición de la matriz de resina poliéster se estableció previamente las cantidades de estireno y octoato de cobalto. La codificación de las probetas se presenta en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Designación y significado para probetas de tracción.

Configuración	Designación	Significado
1	T.SG.15d.(1,5M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 1,5 dosificador MEKP
2	T.SG.15d.(1,5-2,0M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 1,5-2,0 dosificador MEKP
3	T.SG.15d.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
4	T.SG.15d.(2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 2,5 dosificador MEKP
5	T.CG ₁ .15d.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, con gelcoat en una sola superficie, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
6	T.CG ₂ .15d.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, con gelcoat en las dos superficies, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
7	T.SG.35-12h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat , curado por 12 horas a temperatura de 35°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
8	T.SG.35-24h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat , curado por 24 horas a temperatura de 35°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
9	T.SG.35-36h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat , curado por 36 horas a temperatura de 35°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
10	T.SG.45-12h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat , curado por 12 horas a temperatura de 45°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
11	T.SG.45-24h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat , curado por 24 horas a temperatura de 45°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
12	T.SG.45-36h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de tracción, sin gelcoat , curado por 36 horas a temperatura de 45°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP

La codificación representa las condiciones de elaboración del material. En inicio se establece el tipo de ensayo para el cual será utilizada (en este caso ensayo de tracción). Seguidamente se indica la utilización de gelcoat, por lo que en esta sección existen tres tipos de códigos, así:

- SG: Probeta sin gelcoat.
- CG₁: Probeta con gelcoat sobre una sola superficie.
- CG₂: Probeta con gelcoat sobre ambas superficies.

Después de esto se encuentra especificado el tipo de curado en el cual existen varias posibilidades, por ejemplo, en la sexta configuración se encuentra "15d" que indica el curado durante 15 días a temperatura ambiente, o en la configuración 14 se encuentra "35-12h" que se refiere a la temperatura de curado de 35°C durante 12 horas. El siguiente indicador se refiere a la posición de bombeo de peróxido metil-etil cetona seleccionada en la máquina de aspersion. Las probetas empleadas en los ensayos a tracción se pueden observar en la Figura 2.39.



Figura 2.39. Probetas para ensayos de tracción.

2.4.1.2 Probetas para ensayos de flexión

Se elaboraron diferentes configuraciones tomando en cuenta los mismos parámetros y variables del proceso que para la obtención de probetas para ensayos de tracción. En la Tabla 2.13 se puede observar la codificación de las distintas configuraciones.

Tabla 2.13. Designación y significado para probetas de flexión.

Configuración	Designación	Significado
1	F.SG.15d.(1,5M)	Probeta para ensayo de flexión, sin gelcoat, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 1,5 dosificador MEKP
2	F.SG.15d.(1,5-2,0M)	Probeta para ensayo de flexión, sin gelcoat, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 1,5-2,0 dosificador MEKP
3	F.SG.15d.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, sin gelcoat, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
4	F.SG.15d.(2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, sin gelcoat, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 2,5 dosificador MEKP
5	F.CG ₁ .15d.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, con gelcoat en una sola superficie, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
6	F.CG ₂ .15d.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, con gelcoat en las dos superficies, curado por 15 días a temperatura ambiente y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
7	F.CG ₁ .35-12h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, con gelcoat en una sola superficie, curado por 12 horas a temperatura de 35°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
8	F.CG ₁ .35-24h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, con gelcoat en una sola superficie, curado por 24 horas a temperatura de 35°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
9	F.CG ₁ .35-36h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, con gelcoat en una sola superficie, curado por 36 horas a temperatura de 35°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
10	F.CG ₂ .45-12h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, con gelcoat en las dos superficies, curado por 12 horas a temperatura de 45°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
11	F.CG ₂ .45-24h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, con gelcoat en las dos superficies, curado por 24 horas a temperatura de 45°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP
12	F.CG ₂ .45-36h.(2,0-2,5M)	Probeta para ensayo de flexión, con gelcoat en las dos superficies, curado por 36 horas a temperatura de 45°C y posición 2,0-2,5 dosificador MEKP

La codificación de las probetas para los ensayos a flexión contiene la misma designación de las probetas a tracción, con la única diferencia en la primera letra, en

este caso “F” que hace referencia al ensayo a flexión. Las probetas empleadas en los ensayos a flexión se pueden observar en la Figura 2.40.



Figura 2.40. Probetas para ensayos a flexión.

2.4.1.3 Probetas para ensayos de impacto

Para realizar los ensayos a impacto se utilizó la información previamente recolectada de los resultados preliminares tanto de la variación de la posición de bombeo del peróxido metil-etil cetona en la máquina de aspersion, así como los resultados de la experimentación con el tipo de curado. Las características de cada tablero se muestran a continuación en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Características de los tableros para ensayos a impacto.

Configuración del material	Curado
Matriz	Medio ambiente
Sin gelcoat	Medio ambiente
Sin gelcoat	45°C – 24 horas
Con gelcoat en una superficie	
Con gelcoat en dos superficies	

En la Figura 2.41 se puede apreciar el tablero para ensayo a impacto de la mejor configuración que se obtuvo.



Figura 2.41. Tablero para ensayo a impacto.

De la misma manera que en los tableros elaborados para probetas de tracción y flexión, los tableros para impacto permiten obtener las probetas necesarias para la realización de los ensayos. De cada uno de los tableros se extrajeron 20 especímenes que fueron evaluados visualmente en cuanto a defectos y dimensiones. Las probetas obtenidas a partir del tablero se muestran en la Figura 2.42.



Figura 2.42. Probetas para ensayo de impacto.

2.4.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS

Transcurrido el periodo necesario de curado, para que los materiales adquieran las mejores propiedades mecánicas (15 días),⁷³ se extrajeron las probetas de los tableros elaborados para su caracterización mecánica, la misma que tiene por objeto determinar el comportamiento que presenta un material frente a diferentes tipos de carga. Se evaluaron las propiedades mecánicas de las diferentes configuraciones de compuestos obtenidos, mediante ensayos normalizados de tracción y flexión, tomando como referencia las normas correspondientes. Luego de analizar los resultados de estas pruebas se obtuvieron probetas para ensayos de impacto por caída de dardo del compuesto que presentó los mejores resultados en los ensayos de tracción y flexión.

2.4.2.1 Ensayos de tracción

Para obtener el esfuerzo máximo a tracción y el porcentaje de elongación de los materiales se realizaron ensayos a tracción con base en la norma ASTM D 3039-08⁷⁴, para lo cual se empleó la máquina universal de ensayos. Los ensayos se realizaron a siete probetas de cada configuración pero la norma señala que se deben realizar los ensayos a un mínimo de cinco especímenes. La velocidad establecida en la norma es de 2 mm/min, mientras que las dimensiones y tolerancias indicadas para las probetas de tracción son:

- Longitud: 250 mm
- Ancho: 25 mm $\pm 1\%$
- Espesor: 2,5 mm $\pm 4\%$

⁷³VILLACÍS, H.,(2011) *“Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación”*, Ecuador; Proyecto de titulación EPN págs. 59,60.

⁷⁴ASTM D3039., (2208) *“Métodos de Ensayo Normalizados para propiedades a tracción en materiales compuestos de matriz polimérica”*, EE.UU, págs. 3, 4, 7.

Cabe mencionar que para obtener la elongación se utilizó el extensómetro, con una abertura entre 10 a 50 mm (0,5 a 2 in) según lo que recomienda la norma. Se calculó también el módulo de elasticidad mediante la gráfica de esfuerzo y deformación en la sección donde existe una tendencia recta.

2.4.2.2 Ensayos de flexión

En los ensayos de flexión los esfuerzos máximos y la deflexión máxima a tres puntos se obtuvieron con base en la norma ASTM D 7264M-08⁷⁵, en la máquina universal de ensayos. Los ensayos se realizaron en siete probetas de cada configuración pero la norma señala que se deben realizar los ensayos un mínimo de cinco especímenes. La velocidad establecida en la norma es de 1mm/min, mientras que las dimensiones y tolerancias indicadas para los especímenes son:

- Longitud: 160 mm
- Ancho: 13 mm
- Espesor: 4 mm

Cabe mencionar que la distancia entre apoyos corresponde a una relación de 32:1 con respecto al espesor. En este caso se estableció una longitud entre apoyos de 128 mm, de acuerdo al espesor ensayado. También se calculó el módulo de elasticidad mediante la gráfica de esfuerzo y deformación en la parte donde existe una proporcionalidad directa.

⁷⁵ASTM D7264., (2008)“Métodos de Ensayo Normalizados para propiedades a flexión en materiales compuestos de matriz polimérica”, EE.UU, págs. 2, 3, 4, 5, 7.

2.4.2.3 Ensayos de impacto

Para los ensayos de impacto por caída de dardo se escogió la geometría FE cuyas dimensiones son:

- Longitud: 60 mm $\pm 2\%$
- Ancho: 60 mm $\pm 2\%$
- Espesor: 2 mm $\pm 5\%$

El método del ensayo consiste en impactar la muestra con un dardo desde una determinada altura de lanzamiento. Si en la primera prueba la muestra falla se disminuye la altura de lanzamiento para la siguiente prueba, de lo contrario se incrementa la altura. De esta manera se prueba la muestra de material a diferentes cargas de impacto, con lo cual en el reporte final se busca establecer entre otras cosas la altura media de falla en al menos el 50% de las muestras, la desviación estándar de la altura media de falla, la energía media de falla y la desviación estándar de la energía media de falla del material analizado.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos experimentalmente de los ensayos realizados a los materiales compuestos fabricados mediante el proceso de moldeo por aspersión. Se presentan en un inicio las propiedades de los compuestos que se estudiaron en el capítulo anterior y que sirvieron para un análisis del material. Seguidamente se analizan los resultados de los ensayos de tracción y flexión. Las fórmulas de cálculo de las propiedades mecánicas presentadas en este capítulo se describen en el Anexo 6.

Además, se realizan comparaciones con materiales de diferentes configuraciones, refuerzos, matrices y procesos de fabricación obtenidos en otras investigaciones.

3.1 OBTENCIÓN DE PROBETAS

Una vez establecidas las fracciones volumétricas óptimas de los elementos constitutivos de la matriz poliéster (15% de estireno y 0,25% de octoato de cobalto) como se puede observar en la Tabla 3.1, se determinaron las presiones de bombeo de resina/catalizador y de atomización del catalizador tanto para la máquina de aspersión de resina/fibra y gelcoat. Esta última dependerá de la viscosidad del gelcoat. En la Tabla 3.2, se indican las presiones de accionamiento de las diferentes máquinas de aspersión y la posición de succión de peróxido de metil-etil cetona.

Tabla 3.1. Composición de elementos constitutivos de matriz poliéster para el correcto funcionamiento y limpieza de la máquina de aspersión.

Resina Poliéster (l)	Estireno (%)	Octoato de cobalto (%)	Funcionamiento de la máquina de aspersión	Limpieza de la máquina de aspersión
8	30	0,5	Deficiente	Fácil/No costoso
8	30	0,25	Deficiente	Fácil/No costoso
8	15	0,5	Correcto	Fácil/No costoso
8	15	0,25	Correcto	Fácil/No costoso
8	10	0,5	Deficiente	Complicada/Costosa
8	10	0,25	Deficiente	Complicada/Costosa

Tabla 3.2. Variables de operación óptima en la máquina de aspersión de resina/fibra-gelcoat del LANUM.

Variables	Máquina de aspersión de resina/fibra	Máquina de aspersión de gelcoat
	Presión	
	psi	
Variación de presión de bombeo de gelcoat y MEKP	20	20
Variación de presión de atomización del MEKP en la pistola	90	40
Posición de MEKP	2,0-2,5	

De acuerdo a la tabla anterior, se obtuvo como rango de variación adecuado de 2,0-2,5. Esto se obtuvo después de realizar varios tableros, donde se modificó el posicionador de la bomba del MEKP. Este rango se considera como el más adecuado debido a que en las posiciones de 0,5 y 1,0 la cantidad de MEKP aplicada no fue suficiente para curar el material después de transcurridas varias horas, presentando una coloración rojiza. Mientras tanto en las posiciones de 3,0 y 3,5 la coloración de las probetas fue verdosa, lo que indicó una sobresaturación de

peróxido de metil-etil cetona (MEKP). En la Figura 3.1 se presenta un tablero con deficiencia de MEKP, mientras que en la Figura 3.2 se presenta un tablero con exceso de MEKP, para las posiciones del dispositivo dosificador de 0,5-1,0 y 3,0-3,5 respectivamente.



Figura 3.1. Tablero con deficiencia de catalizador en el curado, posiciones del dispositivo dosificador de MEKP entre 0,5 y 1,0.



Figura 3.2. Tablero con exceso de catalizador en el curado, posiciones del dispositivo dosificador de MEKP entre 3,0 y 3,5.

Para los diferentes tableros se estableció un número de capas así: para los tableros de probetas a tracción se requirieron seis capas de matriz con refuerzo, los tableros destinados para flexión necesitaron nueve capas y para los tableros para extraer probetas a impacto cinco capas de material compuesto. Esto se logró estableciendo una velocidad de aproximadamente 0,02 m/s del operador de la pistola de resina/fibra. En cuanto a la adición de gelcoat al material compuesto, visualmente se

obtuvo una mejora de apariencia y acabado superficial. En la Figura 3.3 se puede observar un tablero sin gelcoat, mientras que en la Figura 3.4 se puede observar un tablero con gelcoat.



Figura 3.3. Tablero sin gelcoat.



Figura 3.4. Tablero con gelcoat.

Además, se determinó la factibilidad de corte por medio de caladora, ya que el láser resultó ser ineficiente en materiales compuestos de fibras sintéticas como la de vidrio. En el caso de materiales compuestos con fibras naturales, como la fibra de abacá, resultó ser efectivo ya que el láser no presenta dificultad para atravesar las capas de fibra natural.

3.2 DENSIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS POR ASPERSIÓN

Para determinar la densidad teórica de los compuestos para las distintas fracciones volumétricas se requiere conocer las densidades de la matriz poliéster y del refuerzo de fibra de vidrio. Estas densidades fueron determinadas experimentalmente debido a que no se encontraron fichas técnicas donde se señalen dichos valores.

3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA RESINA POLIÉSTER

La probeta elaborada de matriz poliéster fue dimensionada tomando 10 medidas de sus tres longitudes (largo, ancho y espesor), para determinar su volumen. Para esto se utilizó un calibrador pie de rey. En la Tabla 3.3 se muestran las dimensiones promedio del material de resina poliéster.

Tabla 3.3. Dimensiones de la probeta de resina poliéster elaborada.

Espesor promedio (mm)	Ancho promedio (mm)	Largo promedio (mm)
26,94	118,55	128,82
Volumen: 411,53 cm ³		
Masa promedio: 493,1 g		

La densidad calculada de la mezcla de resina poliéster utilizada que sirvió como matriz de los diferentes materiales compuestos fue 1,19 g/cm³.

3.2.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL REFUERZO

De acuerdo al acápite 2.3.2, el aumento de volumen medido en el recipiente graduado donde se sumergió la fibra de vidrio, corresponde al volumen ocupado por la masa de refuerzo sumergido en él. En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de las densidades obtenidas para el refuerzo de roving empleado. Debe indicarse, que el fluido que se utilizó para la inmersión de las muestras de refuerzo fue la resina

poliéster utilizada en la elaboración de todos los materiales compuestos de este trabajo de investigación.

Tabla 3.4. Volúmenes, masas y densidades de los refuerzos empleados.

ROVING	
Volumen (ml)	4
Masa (g)	4,96
Densidad (g/ml)	1,24

3.3 DETERMINACIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LOS DIFERENTES MATERIALES

Una vez determinadas las densidades de la matriz poliéster y del material de refuerzo, se calculó la fracción volumétrica de las diferentes configuraciones. En la Tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos con base en el procedimiento indicado en la norma ASTM D3171-11, y mediante las relaciones matemáticas señaladas anteriormente.

Tabla 3.5. Resultados obtenidos para las fracciones volumétricas de fibra, resina y vacíos en los diferentes materiales compuestos elaborados.

Muestras de material compuesto sin gelcoat							
Densidad de fibra ρ_{fibra} : 2,5 g/cm ³							
Densidad de matriz ρ_{matriz} : 1,2 g/cm ³							
Muestra	\bar{V}_c	m_c	ρ_c	m_{fibra}	m_{matriz}	Fracción volumétrica (%)	
	cm ³	g	g/cm ³	g	g	v_f	v_m
1	4,51	6,61	1,46	2,87	3,73	30,95	69,05
2	4,49	6,54	1,45	2,78	3,75	30,35	69,65
3	4,55	6,65	1,46	2,84	3,80	30,29	69,71
4	4,48	6,49	1,44	2,87	3,61	32,82	67,18
5	4,57	6,69	1,46	2,82	3,87	29,42	70,58
Promedio	4,40	6,60	1,45	2,83	3,75	30,85	69,23

Tabla 3.5. Resultados obtenidos para las fracciones volumétricas de fibra, resina y vacíos en los diferentes materiales compuestos elaborados (continuación).

Muestras de material compuesto con gelcoat en una superficie							
Muestra	\bar{V}_c	m_c	ρ_c	m_{fibra}	m_{matriz}	Fracción volumétrica (%)	
	cm ³	g	g/cm ³	g	g	v_f	v_m
1	4,54	6,39	1,40	2,51	3,88	28,70	71,20
2	4,64	6,47	1,39	2,46	4,00	28,16	71,84
3	4,47	6,32	1,41	2,43	3,89	27,56	72,44
4	4,62	6,53	1,41	2,51	4,02	27,46	72,54
5	4,53	6,41	1,41	2,46	3,95	27,32	72,68
Promedio	4,56	6,42	1,40	2,47	3,94	27,84	72,14
Muestras de material compuesto con gelcoat en ambas superficies							
Muestra	\bar{V}_c	m_c	ρ_c	m_{fibra}	m_{matriz}	Fracción volumétrica (%)	
	cm ³	g	g/cm ³	g	g	v_f	v_m
1	4,50	6,22	1,38	2,18	4,03	25,28	74,72
2	4,63	6,36	1,37	2,15	4,20	24,29	75,71
3	4,45	6,26	1,40	2,21	4,05	24,24	75,76
4	4,60	6,43	1,39	2,18	4,24	23,21	76,79
5	4,81	6,48	1,34	2,15	4,32	25,09	74,91
Promedio	4,59	6,35	1,37	2,17	4,16	24,42	75,57

Como se puede apreciar en la tabla anterior el material sin gelcoat es el que posee mayor fracción volumétrica. Esto establece que al rociar al material con gelcoat y mantener un mismo volumen para las probetas, disminuye la cantidad de refuerzo que ingresa en el material compuesto. En cuanto a su densidad, de igual forma se ve afectada con una disminución del 3,4 % y 5,5 % del material sin gelcoat con respecto al material con gelcoat en una superficie y en ambas superficies respectivamente.

3.4 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DE GELCOAT

Una vez determinadas las fracciones volumétricas de las configuraciones fue fundamental verificar las dimensiones de la capa de gelcoat. El dimensionamiento se realizó tomando cinco medidas a través de la superficie de los especímenes de prueba. Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas se observan en la Tabla 3.6 y en la Tabla 3.7. El espesor nominal de los materiales en los cuales se realizó la medición de espesor de la capa de recubrimiento es 2,5 mm para los materiales de la Tabla 3.6 y 4 mm para los materiales de la Tabla 3.7 respectivamente.

Tabla 3.6. Mediciones de espesor de gelcoat obtenidos en materiales fabricados con este recubrimiento (espesor nominal del material compuesto 2,5 mm).

Posición del dosificador de MEKP	1,5M	1,5-2,0M	2,0-2,5M	2,5M
Configuración de material TCG1	Espesor	Espesor	Espesor	Espesor
	µm	µm	µm	µm
Promedio	576,40	599,00	613,40	578,00
Desviación estándar	43,15	55,86	45,67	80,14
CV	7,48%	9,32%	7,40%	10,86%

Tabla 3.7. Mediciones de espesor de gelcoat obtenidos en materiales fabricados con este recubrimiento (espesor nominal del material compuesto 4,0 mm).

Posición del dosificador de MEKP	1,5M	1,5-2,0M	2,0-2,5M	2,5M
Configuración de material FCG2	Espesor	Espesor	Espesor	Espesor
	µm	µm	µm	µm
Promedio	556,80	572,20	550,20	638,40
Desviación estándar	26,77	42,52	61,52	74,65
CV	4,80%	7,43%	11,18%	11,69%

3.5 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO

En este apartado se exponen los resultados de los ensayos realizados a tracción, flexión e impacto de los materiales. Se incluyen gráficos y tablas, así como también la discusión de dichos resultados. Las fórmulas de cálculo de las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto se describen en el Anexo 6.

3.5.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

Los ensayos a tracción se realizaron a todas las configuraciones que se indicaron en el acápite 2.4.1.1. Las propiedades más importantes obtenidas se muestran detalladamente en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resultados de ensayos de tracción de los compuestos obtenidos.

Designación	δ_{real}	$\sigma_{m\acute{a}x}$	σ	$CV\sigma$	E	S_E	CV_E	ϵ	S_ϵ	CV_ϵ
	[g/cm ³]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm/mm]	[mm/mm]	[%]
T.SG.15d.(1,5M)	1,51	37,93	3,39	8,9	4155	343,97	8,3	0,01056	0,00068	6,44
T.SG.15d.(1,5-2,0M)	1,50	39,19	3,05	7,8	3907	163,95	4,2	0,01170	0,00063	5,41
T.SG.15d.(2,0-2,5M)	1,53	80,71	3,46	4,3	5068	167,64	3,3	0,01948	0,00104	5,36
T.SG.15d.(2,5M)	1,32	63,12	3,15	5,0	4273	125,02	2,9	0,01666	0,00053	3,19%
T.CG ₁ .15d.(2,0-2,5M)	1,32	71,27	4,78	6,7	4897	283,17	5,8	0,01610	0,00084	5,20
T.CG ₂ .15d.(2,0-2,5M)	1,43	77,24	5,45	7,1	4792	303,15	6,3	0,01802	0,00113	6,30
T.SG.35°C12h.(2,0-2,5M)	1,49	96,05	8,67	9,0	8011	935,90	11,7	0,01330	0,00067	5,02
T.SG.35°C24h.(2,0-2,5M)	1,53	99,36	8,79	8,8	8328	705,24	8,5	0,01234	0,00134	10,86
T.SG.35°C36h.(2,0-2,5M)	1,50	100,13	8,81	8,8	9234	919,54	10,0	0,01129	0,00094	8,31
T.SG.45°C12h.(2,0-2,5M)	1,54	98,68	8,45	8,6	8445	902,91	10,7	0,01069	0,00121	11,36
T.SG.45°C24h.(2,0-2,5M)	1,57	125,74	6,94	5,5	10692	660,05	6,2	0,01266	0,00161	12,69
T.SG.45°C36h.(2,0-2,5M)	1,55	112,40	5,81	5,2	8728	718,91	8,2	0,01313	0,00099	7,58
Resina matriz	1,20	27,98	1,55	5,6	1387	147,11	10,6	0,02020	0,00170	8,39

En la Tabla 3.8 se resumen los resultados obtenidos de densidad, esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y densidad de todas las probetas obtenidas para los ensayos a tracción.

Se pueden observar los valores de densidad de cada uno de los compuestos en la Tabla 3.8, teniendo un rango de valores entre 1,3 y 1,5 g/cm³. Esta variación se atribuye en sí al proceso de aspersion, donde es complicado tener uniformidad a lo largo del material. En la tabla de igual manera se mencionan los valores de desviación estándar y coeficiente de variación para cada una de las propiedades mecánicas, teniendo como resultado que los coeficientes de variación para las tres propiedades mecánicas son medios, lo que señala que el conjunto de probetas ensayadas para cada una de las configuraciones tienden a ser similares; es decir, son reproducibles.

Establecidas las cantidades de estireno y octoato de cobalto de la matriz de resina poliéster, se elaboraron en un inicio las primeras cuatro configuraciones de la Tabla 2.12 para poder compararlas y obtener la posición de bombeo de MEKP adecuada. Así, se buscó obtener la mejor composición de la matriz de resina poliéster como se indicó en el acápite 2.2 en donde se señalan las posiciones preestablecidas. En la Figura 3.5 se presentan las curvas esfuerzo vs. deformación de las configuraciones sin gelcoat teniendo como variable principal la posición del dosificador de MEKP. Aquí, se puede apreciar el comportamiento mecánico de las muestras al variar la cantidad de MEKP en el proceso de aspersion.

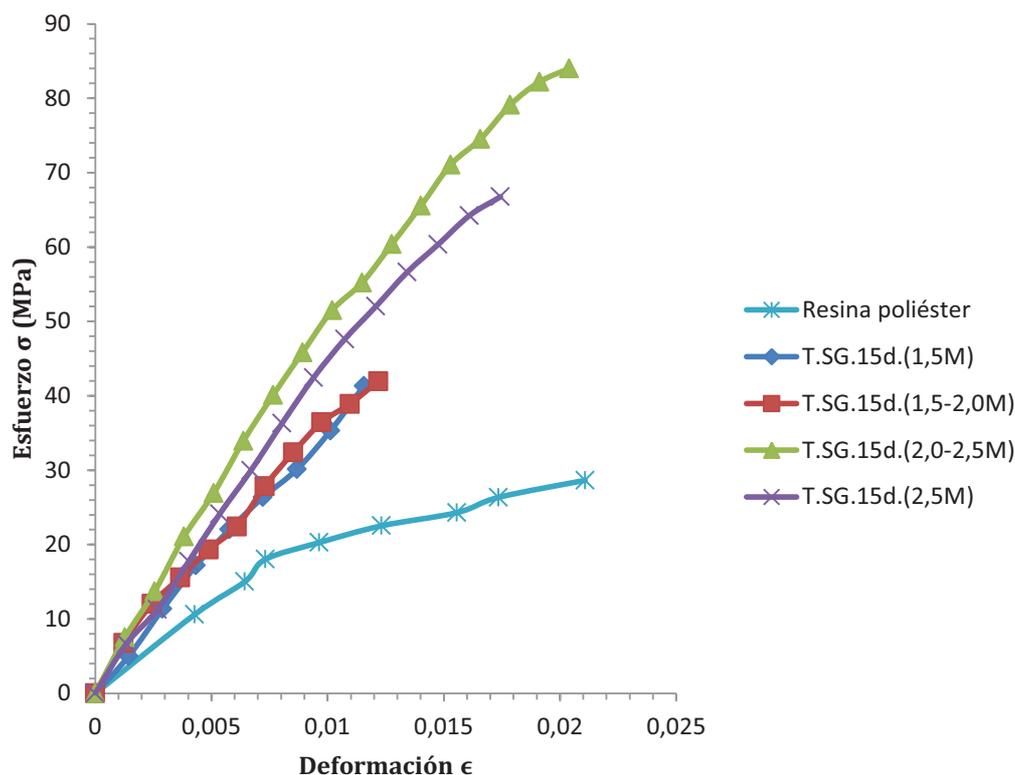


Figura 3.5. Curvas esfuerzo vs. deformación de las formulaciones sin revestimiento de gelcoat y posición de bombeo variable de MEKP (peróxido de metil-etil cetona).

Como se puede apreciar en la figura anterior, existe una diferencia marcada entre las distintas configuraciones. Con ayuda del análisis ANOVA se pudo sustentar esta diferencia estadísticamente significativa entre las muestras de material compuesto. Se determinó que la configuración T.SG.15d.(2,0-2,5) (probeta a tracción, sin gelcoat, curado al ambiente durante 15 días y posición del dosificador de MEKP entre 2,0-2,5) presenta el valor más alto entre las medias del esfuerzo máximo de todas las configuraciones. Es así, que se elaboraron probetas de la matriz de resina poliéster con esta configuración.

Al comparar las probetas de matriz poliéster con las cuatro configuraciones de material compuesto de la Tabla 3.8, se observa claramente un aumento en el esfuerzo máximo a tracción de cada una de ellas y de igual manera un incremento en

el módulo elástico. Este aumento de la rigidez del material significó en este caso también un incremento en la capacidad de elongación.

A partir de los datos de las primeras cuatro configuraciones, se elaboró la Tabla 3.9, donde se observan los valores de esfuerzo máximo, módulo elástico y sus respectivos incrementos con respecto a la matriz de resina poliéster.

Tabla 3.9. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a tracción de las formulaciones sin revestimiento de gelcoat y posición de bombeo variable de MEKP.

Probeta	$\sigma_{\text{máx}}$	Incremento	E	Incremento	δ	Incremento
	MPa	%	MPa	%	[g/cm ³]	%
T.SG.15d.(1,5M)	37,93	35,56	4155	199,62	1,51	25,8
T.SG.15d.(1,5-2,0M)	39,19	40,06	3907	181,76	1,50	25,0
T.SG.15d.(2,0-2,5M)	80,71	188,46	5068	265,50	1,53	27,5
T.SG.15d.(2,5M)	63,12	125,59	4273	208,19	1,32	10,0
Resina	27,98	---	1387	---	1,20	---

En las cuatro configuraciones se obtuvo un incremento del esfuerzo máximo a tracción y la rigidez al introducir la fibra de vidrio como refuerzo. El material T.SG.15d.(2,0-2,5M) presentó la mayor resistencia a tracción con un valor de 80,71 MPa, lo que significa un incremento del 188,46% con respecto a la resina poliéster. Al igual que la resistencia a la tracción la probeta T.SG.15d.(2,0-2,5M) ofreció la mayor rigidez con un valor de 5068,04 MPa, teniendo un incremento del 265,5% con respecto a la resina. Al tener una cantidad adecuada de MEKP la resina poliéster adquiere las mejores propiedades mecánicas, lo que explica los resultados logrados. En cuanto a las dos primeras configuraciones, al no tener la cantidad suficiente de MEKP no llegaron a curarse por completo y la matriz no aportó las propiedades necesarias a la probeta. Por otro lado, cuando se presentó un exceso de MEKP como la composición T.SG.15d.(2,5M), la resina poliéster se fragilizó, de manera que se redujo su resistencia.

Además, el mayor incremento que se registró en la densidad fue del 27,5% correspondiente a la configuración de dosificador de MEKP entre (2,0-2,5) respecto a la matriz. Esto justificaría el valor más alto conseguido de esfuerzo a la tracción de esta configuración respecto al grupo de probetas analizadas. Sin embargo, al comparar la densidad de dicha configuración con las probetas T.SG.15d.(1,5M) y T.SG.15d.(1,5-2,0M), no se observa una diferencia estadísticamente significativa, lo que indica que la cantidad de MEKP en la matriz influye en parte en las características mecánicas del material compuesto.

Definida la posición de bombeo de MEKP (2,0-2,5M) en la máquina de aspersion y en busca de obtener un mejor acabado en la superficie se aplicó gelcoat en el material compuesto. Para este propósito se elaboraron dos tipos de configuraciones T.CG₁.15d.(2,0-2,5M), con gelcoat en una superficie y T.CG₂.15d.(2,0-2,5M), con gelcoat en ambas superficies. En la Figura 3.6 se puede observar las curvas esfuerzo vs. deformación de las nuevas configuraciones junto con la mejor configuración escogida T.SG.15d.(2,0-2,5M) con el objetivo de observar la influencia del gelcoat en las propiedades mecánicas.

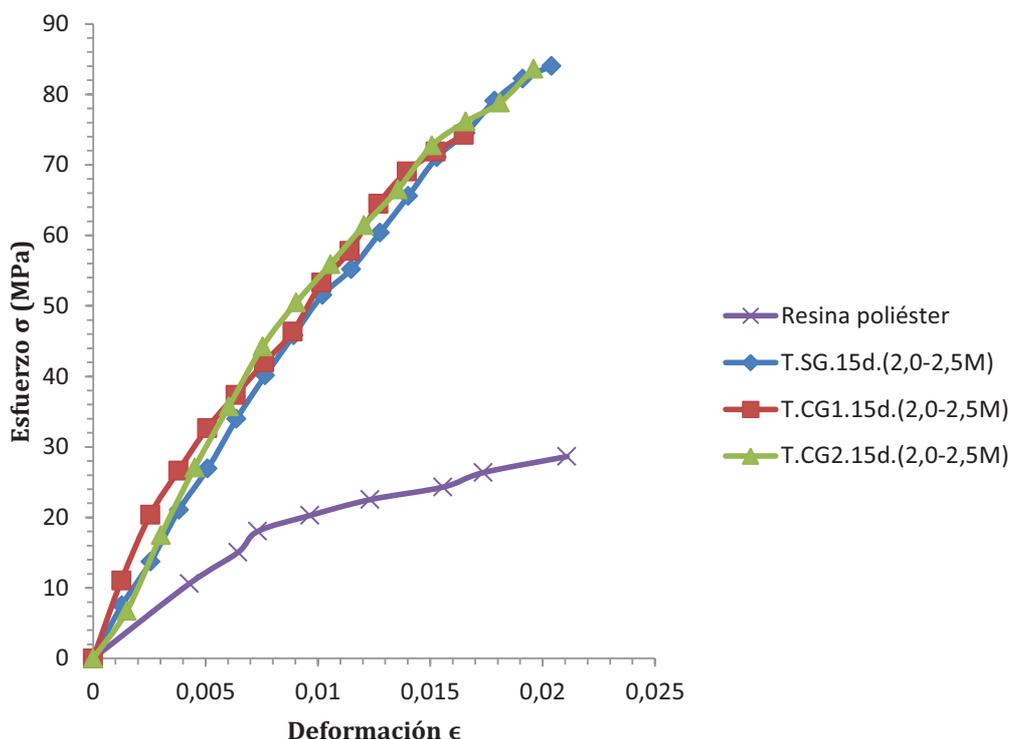


Figura 3.6. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones sin gelcoat y con gelcoat en una y ambas superficies del compuesto, manteniendo el dosificador de MEKP en la posición entre (2,0-2,5).

Se puede observar que las dos composiciones CG_1 y CG_2 (con gelcoat en una superficie y con gelcoat en ambas superficies), tienen propiedades menores a las del material sin gelcoat (SG). Esto se debe a que existe una cantidad menor de refuerzo en el compuesto. La configuración $T.CG_1.15d.(2,0-2,5M)$ presenta un esfuerzo máximo a tracción de 71,27 MPa, lo que representa un incremento del 154,72% con respecto a la resina poliéster y una disminución del 11,70% respecto a la composición SG. Para la probeta $T.CG_2.15d.(2,0-2,5M)$ que tiene una resistencia de 77,24 MPa, el incremento es del 176,05% respecto a la resina poliéster y de igual manera presenta una disminución del 4,30% respecto a la composición SG. En cuanto al módulo elástico se aprecia una disminución del 3,37% y 5,45% para las configuraciones CG_1 y CG_2 , con respecto a la probeta SG, respectivamente. Estos nuevos materiales al presentar propiedades similares al original, resultarían

beneficiosos para el acabado estético final de un prototipo a fabricarse. El material CG₂ (con gelcoat en las 2 superficies del material) no presentó una diferencia estadísticamente significativa según reveló el análisis ANOVA.

Se buscó reducir el tiempo de fabricación del material al aumentar su temperatura de curado mediante el uso de una estufa. Para un mejor análisis y estudio se plantearon dos temperaturas de curado: 35°C y 45°C. Adicionalmente, con cada temperatura de curado se experimentaron tiempos de curado de 12,24 y 36 horas. En la Figura 3.7 se pueden observar las curvas esfuerzo vs. deformación de los diferentes curados realizados.

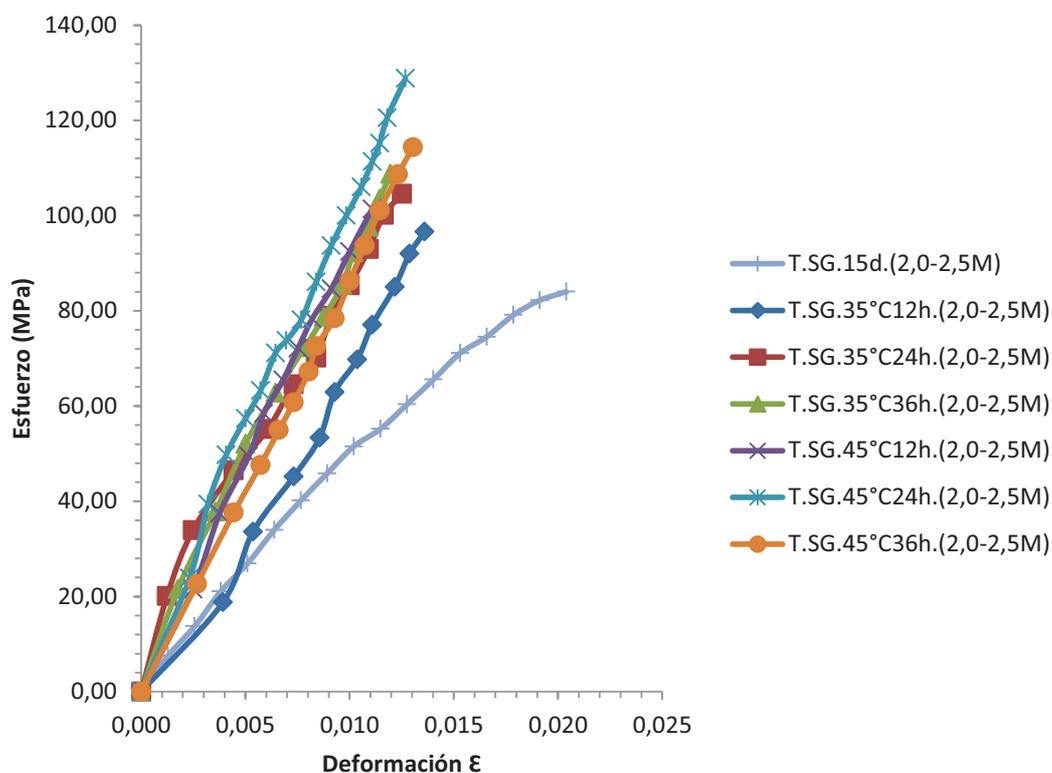


Figura 3.7. Curvas esfuerzo vs. deformación de las diferentes configuraciones de curado.

Como se puede apreciar, las curvas de las probetas de curado en estufa incrementaron sus propiedades en comparación al material curado durante 15 días al

medio ambiente. Así, para la configuración T.SG.45-24h.(2,0-2,5M) se tuvo un esfuerzo máximo de 125,74 MPa, es decir, un incremento del 56% en relación a la probeta curada al ambiente. De igual manera, el valor del módulo elástico aumentó en un 111%. Este material alcanzó las mejores propiedades de las seis configuraciones, pero su producción no sería tan rentable por la utilización de recursos energéticos adicionales y el mayor costo asociado. Cabe indicar que el aumento de la rigidez del material produjo una disminución en su capacidad de elongación.

Como resultado del análisis se tiene que el esfuerzo máximo a tracción y el módulo elástico se incrementaron a mayor temperatura de curado, tanto a 35°C como a 45°C. Además, estos resultados se complementan con la disminución de la elongación a la ruptura de estos materiales. Las probetas curadas a 45°C durante 24 y 36 horas presentaron una diferencia estadísticamente significativa respecto a las demás y entre ellas, pero al tener un proceso a esa temperatura y durante esos periodos de tiempo su costo de producción aumenta considerablemente. Por lo tanto, se debería trabajar con la configuración en la cual se utilice menos energía y tiempo, en la que se obtengan probetas con elevadas propiedades mecánicas y en el menor tiempo. Por otra parte, al aumentar la temperatura, el proceso de curado se puede reducir de días a pocas horas, provocando un aumento en la productividad, por lo que es necesario realizar un análisis costo-beneficio.

Evalrados todos los resultados, se tiene que el material muestra las mejores características es el obtenido con una posición de bombeo del MEKP de (2,0-2,5M). Además se determinó que la adición de gelcoat a las superficies del nuevo material resultó en una disminución de las propiedades con respecto al material sin gelcoat. El uso de este recubrimiento se justificaría en un prototipo que necesite una buena presentación y acabado.

Para las diferentes temperaturas y tiempos de curado ensayadas, se consiguió aumentar el esfuerzo máximo a tracción y su módulo de elasticidad. Sin embargo, este aumento registró una disminución en la capacidad de elongación de los

materiales. Al tener un incremento de sus propiedades y al mismo tiempo una reducción del tiempo de curado a unas cuantas horas, se decidió seleccionar un material con la mejor combinación de propiedades.

El material seleccionado fue el T.SG.35-12h.(2,0-2,5M), es decir, la probeta de tracción con curado a 35°C durante 12 horas y posición del dosificador de MEKP en (2,0-2,5M). Este material cumplió con las condiciones propuestas, posición de bombeo de MEKP adecuado para el incremento de las propiedades y el correcto funcionamiento de la máquina de aspersión. El curado a 35°C redujo el tiempo de producción de 15 días a medio día y contribuyó al incremento del esfuerzo máximo y su rigidez. No contiene gelcoat ya que el acabado sólo es primordial en un futuro prototipo. En la Figura 3.8, se muestran las curvas esfuerzo vs. deformación para los compuestos que presentaron la mejor combinación de propiedades, como resistencia a la tracción, apariencia, y utilidad a menor costo.

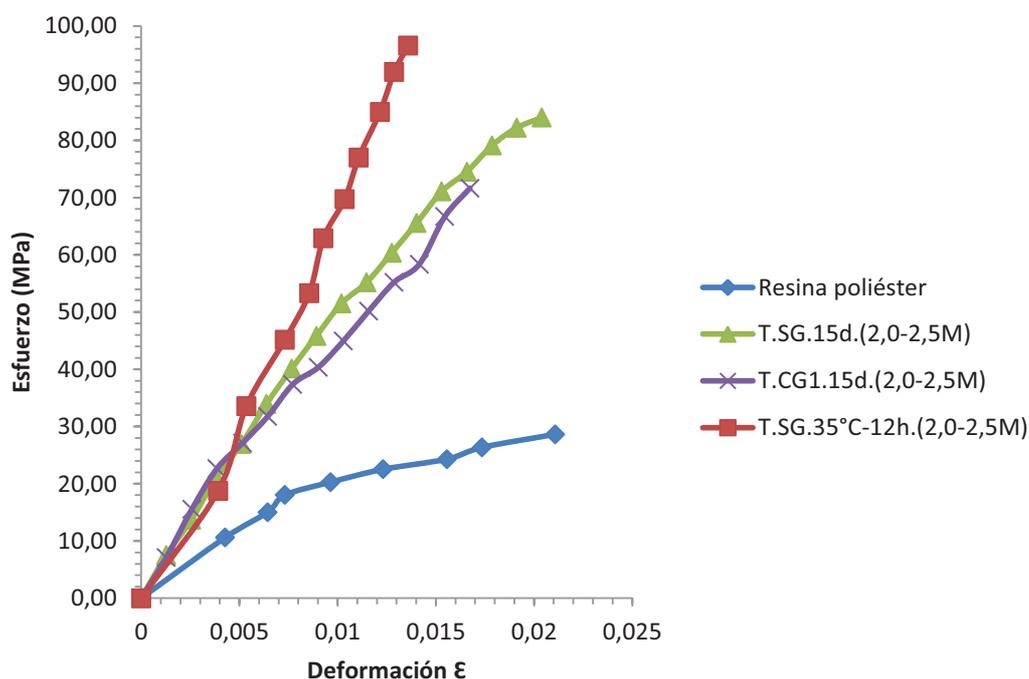


Figura 3.8. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de la resina poliéster y las configuración T.SG.15d.(2,0-2,5M); T.CG₁.15d.(2,0-2,5M); T.SG.35°C12h.(2,0-2,5M).

Como se puede apreciar el esfuerzo máximo a tracción para el material T.SG.35 12h.(2,0-2,5M) es de 96,05 MPa, al compararlo con la resina poliéster y las configuraciones T.CG₁.15d.(2,0-2,5M) y T.SG.15d.(2,0-2,5M) se tienen incrementos del 243,28%; 34,77% y 19,01% respectivamente. En la Figura 3.9 se pueden observar los módulos de elasticidad de los tres materiales, donde la configuración T.SG.35 12h.(2,0-2,5M) muestra un incremento del 478% comparada con la resina y del 58% con respecto a la configuración curada al ambiente.

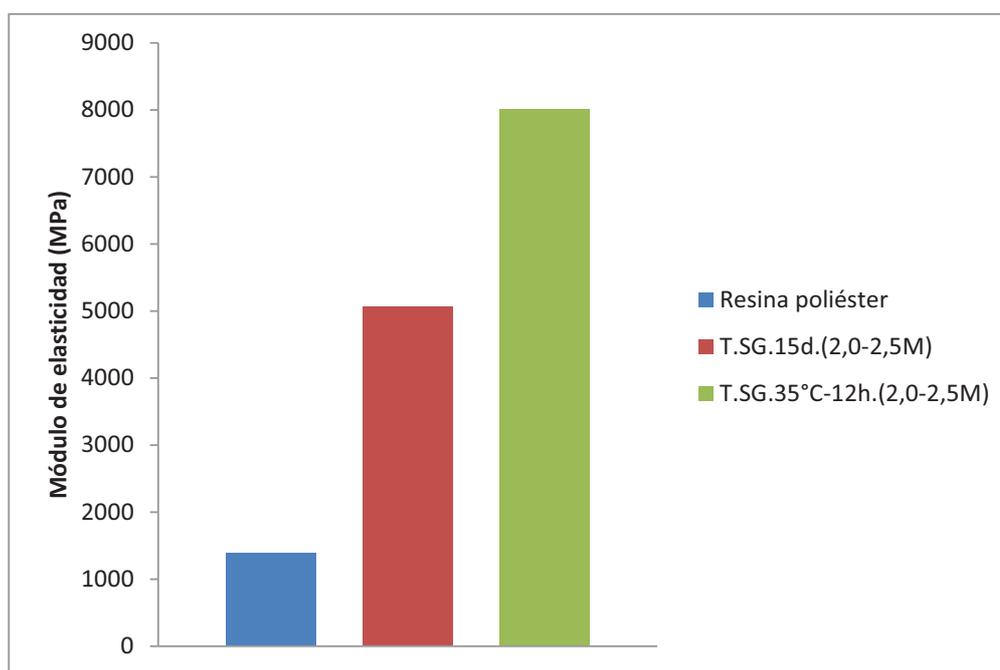
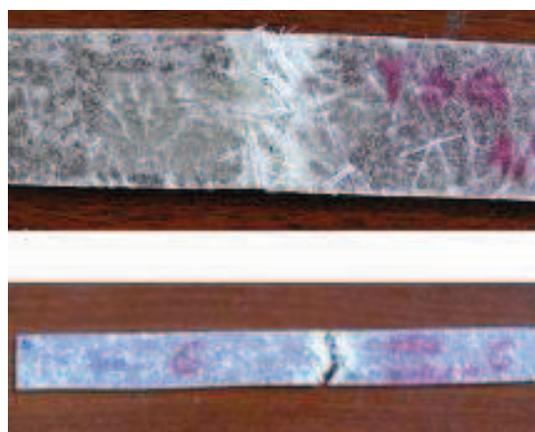


Figura 3.9. Módulo de elasticidad de la resina poliéster y las configuraciones: T.SG.15d.(2,0-2,5M) y T.SG.35°C.12h.(2,0-2,5M).

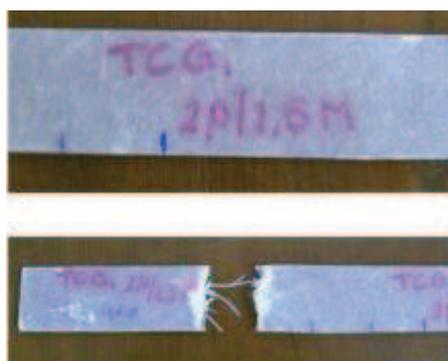
A continuación, en la Figura 3.10 se presentan las fracturas que exhibieron las probetas ensayadas. Se hace un enfoque en el tipo de falla ya que todas las probetas presentan la misma distribución de fibra (aleatoriamente distribuida) y el mismo tipo de refuerzo (fibra de vidrio). Algunas probetas presentaron fractura parcial, mientras que otras presentaron fractura total.



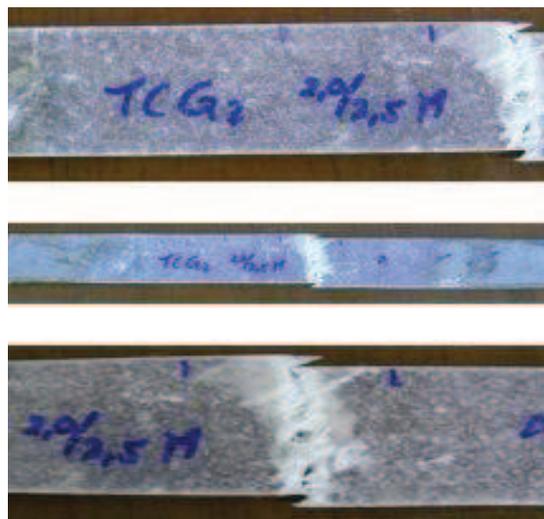
a) Resina poliéster.



b) T.SG.15d.(2,0-2,5M).



c) T.CG₁.15d.(2,0-2,5M).



d) T.CG2.15d.(2,0-2,5M).



e) T.SG.45°C12h.(2,0-2,5M).

Figura 3.10. Fracturas observadas en probetas de materiales compuestos de diferentes configuraciones: (a) Matriz de resina poliéster; (b) TSG.15d.(2,0-2,5M); (c) TCG₁.15d.(2,0-2,5M); (d) CG₂.15d.(2,0-2,5M); (e) T.SG.45°C12h.(2,0-2,5M).

En la Figura 3.10 a, se observa la fractura frágil de la matriz sin producirse una reducción de la sección de la probeta. Se observa además el seccionamiento de la matriz en múltiples partes. En la Figura 3.10 b, se observa la fractura de la matriz y

de las fibras además que se produce el seccionamiento de la probeta. En la Figura 3.10 c, se observa la fractura de la matriz y las fibras. Se produce el seccionamiento de la probeta. Adicionalmente se observa la extracción parcial de algunas fibras de la matriz. En la Figura 3.10 d, se observa la fractura parcial de la matriz, y ruptura parcial de las fibras. No se produce el seccionamiento de la probeta. Finalmente en la Figura 3.10 e, se observa la fractura parcial de la matriz y ruptura parcial las fibras. No se produce el seccionamiento de la probeta.

3.5.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN

Los ensayos a flexión se realizaron a las probetas de matriz poliéster con las configuraciones que se indicaron en el acápite 2.4.1.2. Las propiedades más importantes obtenidas se resumen en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Resultados de ensayos de flexión de los compuestos obtenidos.

Designación	δ_{real}	$\sigma F_{m\acute{a}x}$	σF	$CV\sigma F$	EF	S_{EF}	CV_{EF}	ϵF	$S_{\epsilon F}$	$CV_{\epsilon F}$
	[g/cm ³]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm/mm]	[mm/mm]	[%]
F.SG.15d.(1,5M)	1,52	80,74	4,36	5,4	4875	315,64	6,5	0,01910	0,00178	9,3
F.SG.15d.(1,5-2,0M)	1,63	176,57	5,07	2,9	5584	318,24	5,7	0,03204	0,00328	10,2
F.SG.15d.(2,0-2,5M)	1,54	200,02	1,95	1,0	5144	261,54	5,1	0,03998	0,00237	5,9
F.SG.15d.(2,5M)	1,55	178,93	5,80	3,2	5424	255,65	4,7	0,03218	0,00539	16,7
F.CG ₁ .15d.(2,0-2,5M)	1,35	176,53	6,72	3,8	6297	247,61	3,9	0,02764	0,00430	15,6
F.CG ₂ .15d.(2,0-2,5M)	1,52	117,24	4,22	3,6	4329	177,25	4,1	0,02622	0,00229	8,7
F.SG.35°C12h.(2,0-2,5M)	1,52	178,79	10,32	5,8	6907	378,90	5,5	0,02617	0,00143	5,5
F.SG.35°C24h.(2,0-2,5M)	1,57	183,07	12,28	6,7	7133	532,66	7,5	0,02503	0,00105	4,2
F.SG.35°C36h.(2,0-2,5M)	1,53	207,36	14,75	7,1	8188	638,97	7,8	0,02475	0,00134	5,4
F.SG.45°C12h.(2,0-2,5M)	1,54	170,80	13,02	7,6	6330	626,69	9,9	0,02839	0,00230	8,1
F.SG.45°C24h.(2,0-2,5M)	1,48	208,09	14,13	6,8	7607	637,82	8,4	0,02935	0,00213	7,3
F.SG.45°C36h.(2,0-2,5M)	1,59	198,13	8,50	4,3	7303	459,58	6,3	0,02586	0,00113	4,4
Resina matriz	1,20	70,33	3,06	4,3	2129	139,25	6,5	0,03809	0,00119	3,1

En la Tabla 3.10 se resume los datos obtenidos de densidad, esfuerzo máximo y módulo de elasticidad de todas las probetas desarrolladas para los ensayos a flexión. La designación de cada una de las configuraciones se definió en el acápite 2.4.1.2.

Se pueden observar los valores de densidad de cada uno de los compuestos en la Tabla 3.10, teniendo un rango entre 1,3 y 1,5 g/cm³. Esta variación se otorga en sí al proceso de aspersión, donde es complicado tener uniformidad a lo largo del material. En la tabla de igual manera se mencionan los valores de desviación estándar y coeficiente de variación para cada una de las propiedades mecánicas, teniendo como resultado que los coeficientes de variación para las tres propiedades mecánicas son medios, lo que señala que el conjunto de probetas ensayadas para cada una de las configuraciones tienden a ser similares, es decir son reproducibles.

Establecidas las cantidades de estireno y octoato de cobalto de la matriz resina poliéster como se lo hizo para los tableros de ensayo a tracción, se elaboraron en un inicio las primeras cuatro configuraciones de la Tabla 2.13 para poder compararlas y obtener la posición adecuada del dosificador de MEKP. Así, se buscó obtener el mejor comportamiento de la matriz de resina poliéster al ser añadida MEKP como se indicó en el acápite 0 en donde se señala las posiciones preestablecidas. En la Figura 3.11 se señalan las curvas esfuerzo vs. deformación de las configuraciones sin gelcoat teniendo como variable la posición del dosificador de MEKP. Aquí, se puede apreciar el comportamiento mecánico al variar la posición de bombeo de MEKP en el proceso de aspersión.

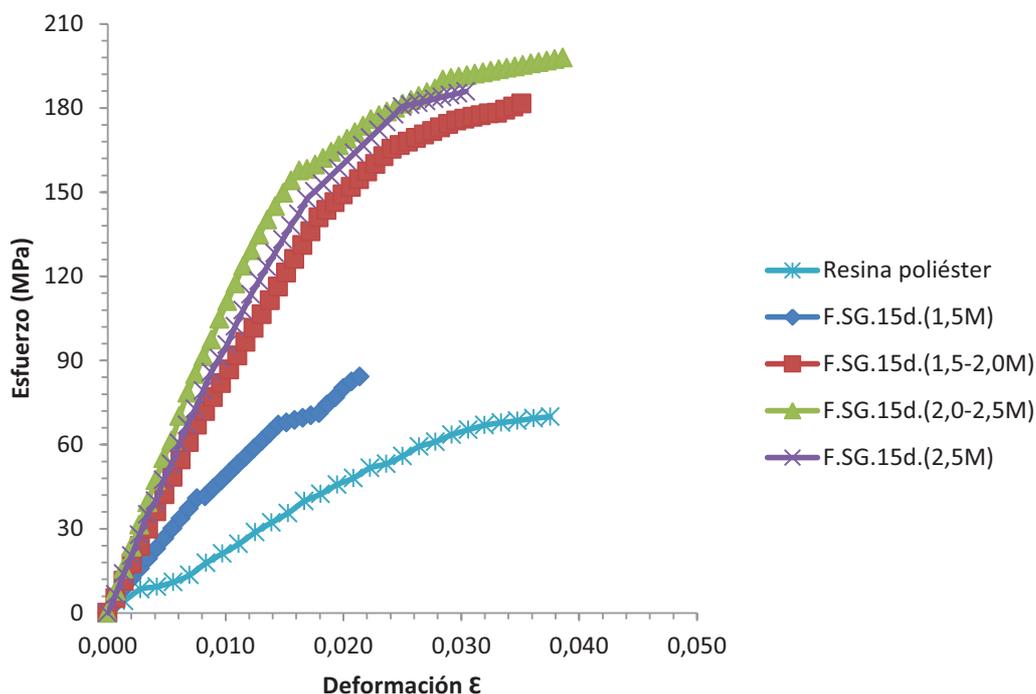


Figura 3.11. Curva esfuerzo vs. deformación de las formulaciones sin revestimiento de gelcoat y posición de bombeo de MEKP variable.

Como se puede apreciar en la figura anterior, existe una diferencia marcada entre las distintas configuraciones. Con ayuda del análisis ANOVA se pudo sustentar esta diferencia estadísticamente significativa entre las muestras de material compuesto. Se determinó que la configuración F.SG.15d.(2,0-2,5) (probeta a flexión, sin gelcoat, curado al ambiente durante 15 días y posición del dosificador de MEKP entre 2,0-2,5) presenta el valor más alto entre las medias del esfuerzo máximo de todas las configuraciones. Es así, que se elaboraron probetas de la matriz de resina poliéster con esta configuración.

Al comparar las probetas de matriz poliéster con las cuatro configuraciones de cantidad de MEKP variable, se observa claramente un aumento en el esfuerzo máximo a flexión de cada una de ellas y de igual manera un incremento en el módulo elástico. Este incremento de la rigidez del material significó en este caso también un incremento en la capacidad de elongación.

A partir de los datos de las primeras cuatro configuraciones, se elaboró la Tabla 3.11 donde se observan los valores de esfuerzo máximo, módulo elástico y sus respectivos incrementos con respecto a la matriz de resina poliéster.

Tabla 3.11. Incremento del esfuerzo máximo y módulo elástico a flexión de las formulaciones sin revestimiento de gelcoat y posición de bombeo de MEKP variable.

Probeta	$\sigma_{\text{máx}}$	Incremento	E	Incremento	δ	Incremento
	MPa	%	MPa	%	[g/cm ³]	%
F.SG.15d.(1,5M)	80,74	14,80	4875	128,95	1,52	26,7
F.SG.15d.(1,5-2,0M)	176,57	151,06	5584	162,27	1,63	35,8
F.SG.15d.(2,0-2,5M)	200,02	184,40	5144	141,59	1,54	28,3
F.SG.15d.(2,5M)	178,93	154,41	5424	154,74	1,55	29,2
Resina	70,33	---	2129	---	1,2	---

En las cuatro configuraciones se obtuvo un incremento del esfuerzo máximo a la flexión y la rigidez al introducir la fibra de vidrio como refuerzo, el material F.SG.15d.(2,0-2,5M) presentó la mayor resistencia a flexión con un valor de 200,02 MPa, lo que representó un incremento del 184% con respecto a la resina poliéster. Al tener una cantidad adecuada de MEKP la resina poliéster adquiere las mejores propiedades mecánicas, lo que explica los resultados logrados. En tanto las dos primeras configuraciones al no tener la cantidad suficiente de MEKP no llegaron a curarse por completo y la matriz no aportó las propiedades necesarias a la probeta. Por otro lado cuando se presenta un exceso de MEKP como la composición F.SG.15d.(2,5M), la resina poliéster se fragiliza, reduciendo su resistencia.

Además, el mayor incremento que se registró en la densidad fue del 35,8% correspondiente a la configuración de dosificador de MEKP entre (1,5-2,0), esto indicaría que existió una cantidad mayor de refuerzo en la probeta. Es decir, que este exceso de refuerzo incrementaría su esfuerzo máximo a flexión considerablemente respecto al resto de configuraciones analizadas hasta el momento. Es importante señalar que la cantidad de MEKP en la matriz influyó de igual forma en las

características mecánicas del material compuesto ya que el material con posición de bombeo de MEKP de (2,0-2,5), presentó la mayor resistencia a flexión con un incremento menor de la densidad respecto a la matriz.

Definida la posición de bombeo de MEKP (2,0-2,5M) en la máquina de aspersión y en busca de obtener un buen acabado superficial, al igual que en los materiales a tracción, se añadió gelcoat en la superficie de éstos materiales. Para este propósito se elaboraron dos tipos de configuraciones F.CG₁.15d.(2,0-2,5M) con gelcoat en una superficie y F.CG₂.15d.(2,0-2,5M) con gelcoat en las ambas superficies. En Figura 3.12 se puede observar las curvas esfuerzo vs. deformación de las configuraciones descritas junto con la mejor configuración escogida F.SG.15d.(2,0-2,5M) con el objetivo de observar la influencia del gelcoat en las propiedades mecánicas.

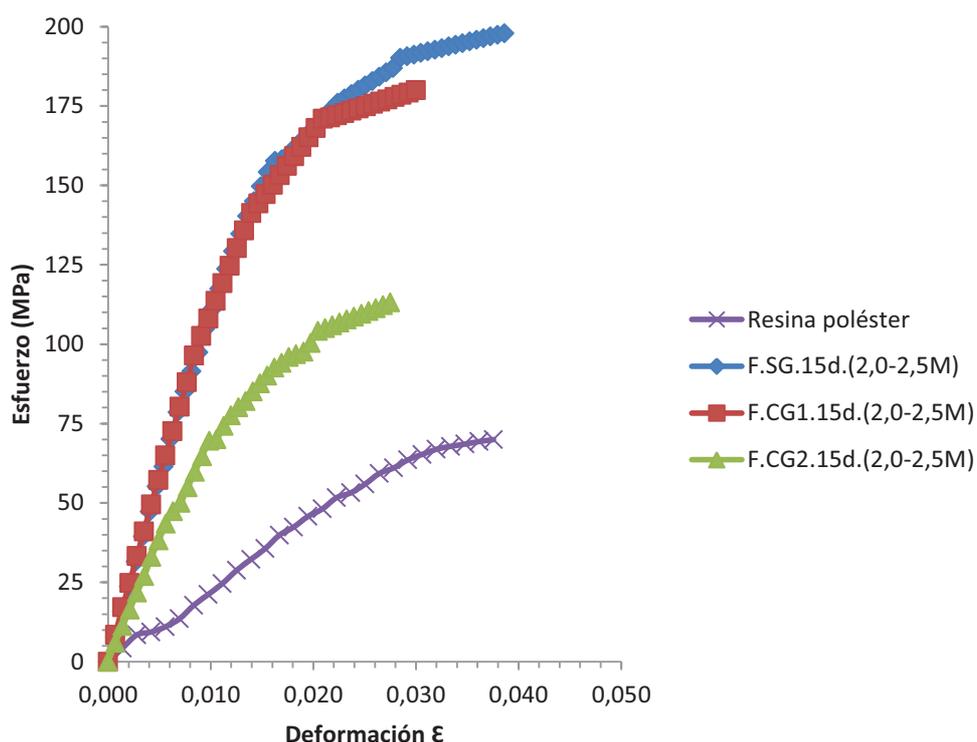


Figura 3.12. Curva esfuerzo vs. deformación a flexión de las configuraciones sin gelcoat y con gelcoat en una y ambas superficies del compuesto, con posición del dosificador de MEKP entre (2,0-2,5).

Se puede observar que la composición F.CG₂.15d.(2,0-2,5M) tiene propiedades menores al material SG y al material CG₁, esto se debe a que existe una cantidad menor de refuerzo. La configuración F.CG₁.15d.(2,0-2,5M) presenta un esfuerzo máximo a flexión de 176,53 MPa, con lo que posee un incremento del 150,72% con respecto a la resina poliéster y una disminución del 11,74% respecto a la composición SG. La probeta F.CG₂.15d.(2,0-2,5M) presentó una resistencia de 117,24 MPa, lo que representa un incremento del 166,70% respecto a la resina poliéster y una disminución del 41,39% respecto a la composición SG. En cuanto al módulo elástico se aprecia un aumento del 22,42% y una disminución del 15,84% para las configuraciones CG₁ y CG₂, comparadas con la probeta SG, respectivamente. El material F.CG₁.15d.(2,0-2,5M) al presentar propiedades similares a la original, resultaría beneficioso para el acabado superficial de un prototipo a fabricarse. Sin embargo debe considerarse que este material presenta un aumento en su costo de fabricación.

En busca de reducir el tiempo de fabricación y conociendo que el material desarrolla por completo sus propiedades mecánicas y químicas al cabo de 15 días de curado, se trató de reducir este tiempo al incrementar la temperatura de curado mediante el uso de una estufa. Para un mejor análisis y estudio se plantearon dos temperaturas de 35°C y 45°C. Adicionalmente, se experimentó con tiempos de curado de 12, 24 y 36 horas respectivamente. En la Figura 3.13 se pueden observar las curvas esfuerzo vs. deformación de los diferentes curados realizados.

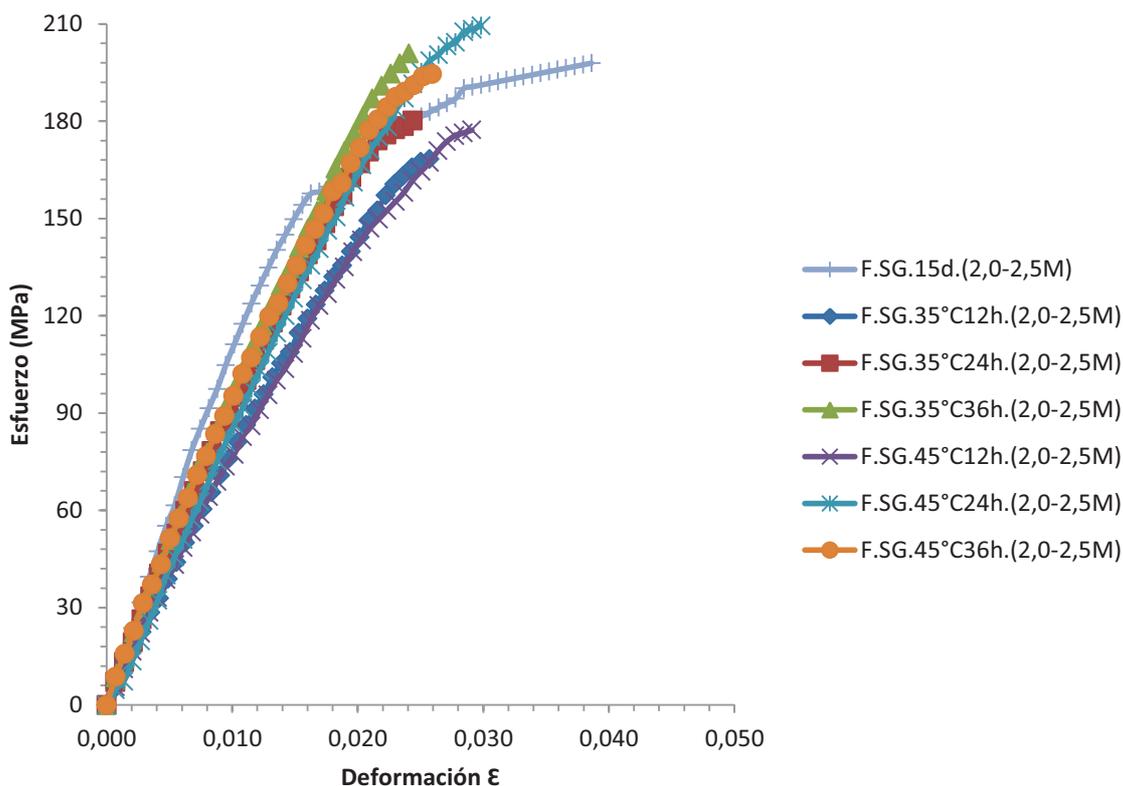


Figura 3.13. Curvas esfuerzo vs. deformación de las diferentes configuraciones de curado.

Como se puede apreciar, las curvas de las probetas de curado en estufa son de similares características al material curado durante 15 días al medio ambiente. Así, para la configuración F.SG.45°C-24h.(2,0-2,5M) se tiene un esfuerzo máximo de 208,09 MPa. Es decir, presentó un incremento del 4% en relación a la probeta curada a temperatura ambiente. De igual manera, el valor del módulo elástico se incrementó en un 48% con respecto a la configuración F.SG.15d.(2,0-2,5M). Este material alcanzó las mejores propiedades de las seis configuraciones, pero su producción no es muy rentable por la utilización de más recursos energéticos y el mayor costo asociado. Además que no existe una diferencia estadísticamente significativa según el análisis ANOVA presentado en el Anexo 7. Cabe indicar que el aumento de la rigidez del material produjo una disminución en su capacidad de elongación.

Como resultado del análisis se tiene que el esfuerzo máximo a flexión y el módulo elástico no se incrementaron a excepción de las probetas curadas a temperatura de 35°C y 45°C durante 36 y 24 horas respectivamente. Estas probetas no presentaron una diferencia estadísticamente significativa respecto a las demás ni entre ellas. Además al tener un proceso a esa temperatura y durante esos periodos de tiempo su costo aumenta considerablemente. Por lo tanto, se debería trabajar con la configuración en la cual se utilice menos energía y tiempo, en la que se obtengan probetas con altas características mecánicas. Por otra parte, al aumentar la temperatura, el proceso de curado se puede reducir de días a pocas horas, provocando un aumento en la productividad, por lo que es necesario realizar un análisis costo-beneficio.

Obtenidos todos los resultados, se tiene que el material que brinda los mejores resultados es el obtenido cuando la posición del dosificador de bombeo del MEKP se encuentra entre (2,0-2,5M). Además, la adición de gelcoat en las superficies del nuevo material resultó en una disminución de las propiedades con respecto al material sin gelcoat. El material CG₁ (gelcoat en una sola superficie del material) no presentó una diferencia significativa, lo que da una alternativa nueva para prototipos en los que sea necesaria una buena presentación y acabado.

Para las diferentes temperaturas y tiempos de curado ensayadas, se consiguió aumentar el módulo de elasticidad en cada una de ellas, sin embargo este aumento registró una disminución en la capacidad de elongación. Al tener un incremento en una de sus propiedades y al mismo tiempo reducciones en el tiempo de curado a unas cuantas horas, se decidió seleccionar un material que adquiriera la mejor combinación de propiedades.

El material seleccionado fue el F.SG.35-12h.(2,0-2,5M), es decir la probeta de flexión con curado a 35°C durante 12 horas y posición del dosificador de MEKP de (2,0-2,5M). Este material cumplió con las condiciones propuestas, posición de bombeo de MEKP adecuado para el incremento de las propiedades y el correcto funcionamiento de la máquina de aspersión. El curado a 35°C redujo el tiempo de producción de 15

días a medio día y contribuyó al incremento de su rigidez, manteniendo el esfuerzo máximo a flexión sin una variación significativa respecto al material curado al medio ambiente. No contiene gelcoat ya que el acabado solo es primordial en un futuro prototipo y además aumenta el costo del compuesto. En la Figura 3.14 se indican las curvas esfuerzo vs. deformación para los compuestos que presentaron la mejor combinación de propiedades como: resistencia mecánica, apariencia y utilidad a menor costo.

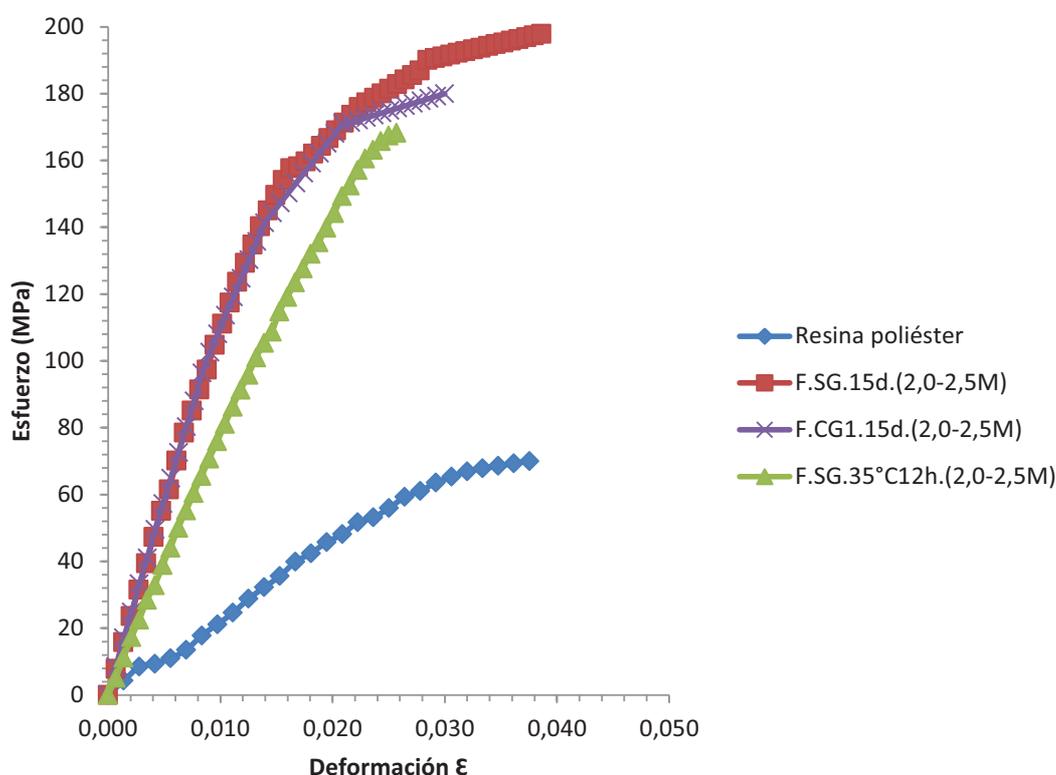


Figura 3.14. Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de la resina poliéster y las configuración F.SG.15d.(2,0-2,5M); F.CG₁.15d.(2,0-2,5M); F.SG.35-12h.(2,0-2,5M).

Como se puede apreciar el esfuerzo máximo a flexión para el material F.SG.35 12h.(2,0-2,5M) es de 178,79 MPa, al compararlo con la resina poliéster y la configuración F.CG₁.15d.(2,0-2,5M) se tiene un incremento del 160,30% y 1,28%, respectivamente, en cambio con respecto a la configuración y F.SG.15d.(2,0-2,5M),

disminuyó en un 8,47%. En la Figura 3.15 se pueden observar los módulos de elasticidad de los tres materiales, donde la configuración F.SG.35 12h.(2,0-2,5M) posee un incremento del 224,39% comparada con la resina y del 34,27% respecto a la configuración F.SG.15d.(2,0-2,5M).

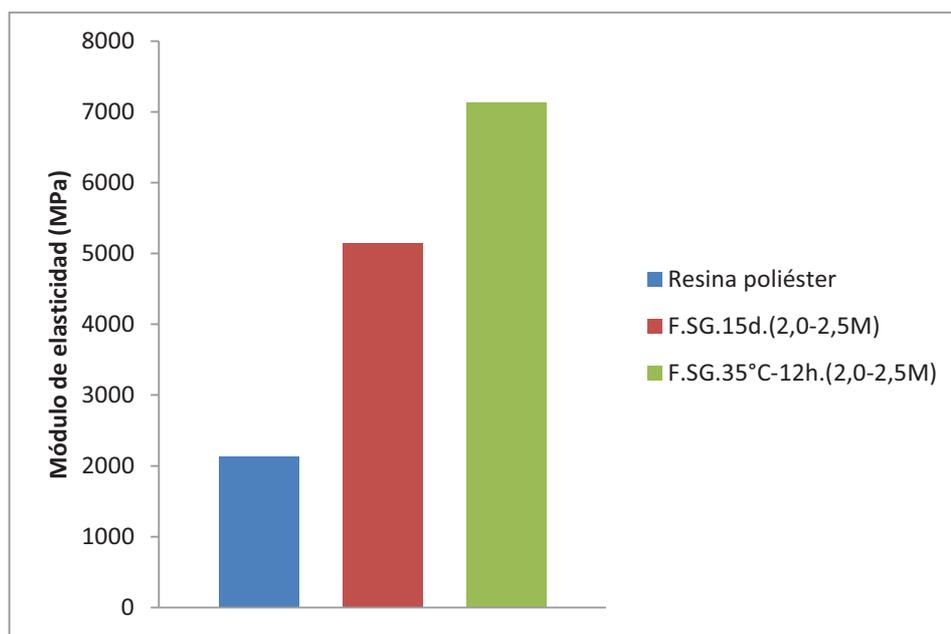
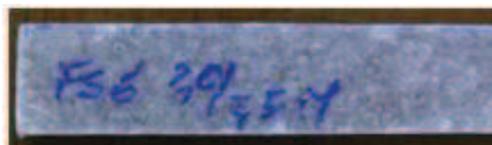


Figura 3.15. Módulo de elasticidad de la resina poliéster y las configuraciones:F.SG.15d.(2,0-2,5M) y F.SG.35 12h.(2,0-2,5M).

En la Figura 3.16 se presentan fotografías de probetas ensayadas a flexión. Algunas de ellas presentaron fractura parcial mientras que otras presentaron fractura total. Se especifica si la fractura fue netamente de la matriz o de la matriz y de las fibras.



a) Resina poliéster.



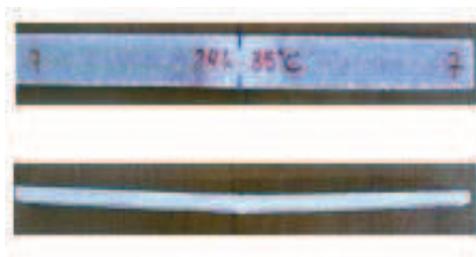
b) F.SG.15d.(2,0-2,5M).



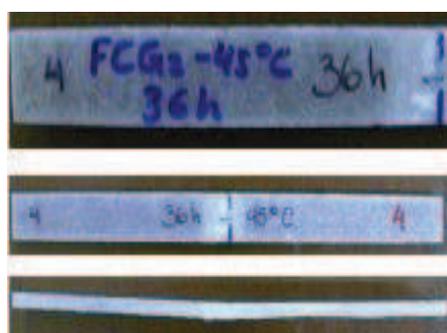
c) F.SG.15d.(2,5M).



d) F.CG2.15d.(2,0-2,5M).



e) F.CG1.35°C-24h.(2,0-2,5M).



f) F.CG2.45°C36h.(2,0-2,5M).

Figura 3.16. Fracturas observadas en probetas de materiales compuestos de diferentes configuraciones: (a) Matriz de resina poliéster; (b) F.SG.15d.(2,0-2,5M); (c) F.SG.15d.(2,5M); (d) F.CG2.15d.(2,0-2,5M); (e) F.CG1.35°C-24h.(2,0-2,5M); (f) F.CG2.45°C36h.(2,0-2,5M).

En la Figura 3.16 a, se observa la fractura frágil de la matriz sin producirse una reducción de la sección de la probeta. Se observa además el seccionamiento de la

matriz en múltiples partes. En la Figura 3.16 b, se observa la fractura de la matriz y fractura parcial de las fibras. Se observa una marcada línea de falla, sin seccionamiento de la probeta. En la Figura 3.16 c, se observa la fractura de la matriz y una marcada línea de falla. Hay una ruptura parcial en una de las capas del material. Se observa fisuramiento. En la Figura 3.16 d, se observa la fractura de la matriz y una marcada línea de falla. Hay una ruptura parcial en una de las capas del material. Se observa fisuramiento. En la Figura 3.16 e, se observa la fractura parcial de la matriz pero no de las fibras, se observa una marcada línea de falla, sin seccionamiento de la probeta. Finalmente, en la Figura 3.16 f, se observa la fractura de la matriz pero no de las fibras. Se presenta una marcada línea de falla, sin seccionamiento de la probeta.

3.5.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO

Las probetas para ensayos de impacto fueron obtenidas de acuerdo a las condiciones que se establecieron en el acápite 2.4.1.3. El ensayo de impacto consistió en liberar un dardo de masa conocida desde una altura determinada, la cual provocó la falla de la probeta. Si no se observó ninguna fisura o imperfección en el material, se realizó el incremento (d_h) de la altura de lanzamiento en el siguiente ensayo. Si por el contrario a la altura inicial de lanzamiento ocurrió alguna falla o imperfección en la probeta después del lanzamiento, se disminuyó la altura de lanzamiento en el siguiente ensayo. Lo que se buscó determinar es la altura a la que falla al menos el 50% de las muestras. Se realizaron ensayos de impacto únicamente a los materiales que presentaron las mejores características respecto a los resultados previamente obtenidos en las pruebas de tracción y flexión. En la Tabla 3.12 se resumen los resultados de los ensayos de impacto. Debe notarse también que se ensayaron probetas de matriz poliéster a modo de comparación con los demás resultados obtenidos. En el Anexo 8 se muestran los cuadros correspondientes a los ensayos de impacto.

Tabla 3.12. Resultado de los ensayos de impacto realizados en materiales compuestos obtenidos mediante el proceso de aspersión.

Probeta	Masa de prueba w	Altura inicial de lanzamiento ho	Incremento en altura de lanzamiento dh	Altura de falla h	Desviación estándar de la altura de falla S _h	Energía media de falla MFE	Desviación estándar de la energía media de falla S _{MFE}
	kg	mm	mm	mm	mm	J	J
Matriz	0,04	130	10	135	20,72	0,05	0,008
Sin gelcoat (curado medio ambiente)	0,07	160	10	185	28,7	0,128	0,019
Sin gelcoat (curado 45°C-24h)		200	20	216	14,22	0,149	0,009
Gelcoat en una superficie (curado 45°C-24h)		140	20	158	21,67	0,109	0,015
Gelcoat en dos superficie (curado 45°C-24h)		110	10	115	12,25	0,079	0,008

De la tabla anterior se puede observar que el material sin gelcoat curado a 45°C durante 24 horas presenta la mayor resistencia al impacto con un valor de 0,149 J y una altura media de falla de 216 mm. Esto representa un incremento de 198% con respecto a la matriz. La desviación estándar de la energía media de falla es significativamente baja. El material sin gelcoat curado a temperatura ambiente, presenta en segundo orden la mejor resistencia al impacto con un valor de 0,128 J, lo que representa un incremento de 156% respecto de la resistencia al impacto de la matriz, con un valor de altura media de falla de 185 mm. Este material presentó la más grande desviación estándar de la energía media de falla (0,019 J) entre todas las muestras analizadas. El material que presentó la menor resistencia al impacto fue el material recubierto con dos capas de gelcoat, curado a 45 °C durante 24 horas. Esta muestra presentó un incremento del 58% con respecto a la resistencia al

impacto de la matriz. Su altura media de falla es menor en comparación a las demás muestras analizadas. En la Figura 3.17 se puede observar un gráfico de barras comparativo entre las diferentes muestras analizadas.

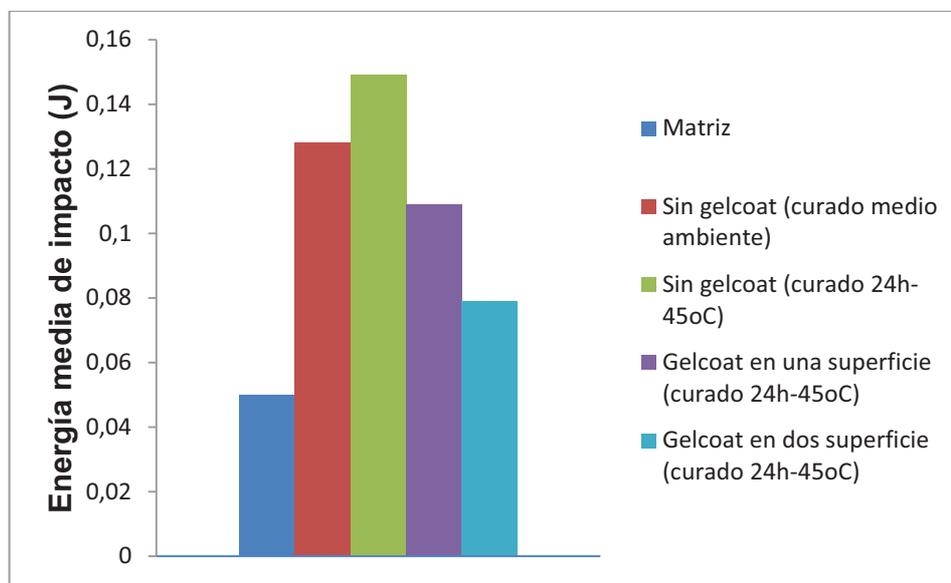
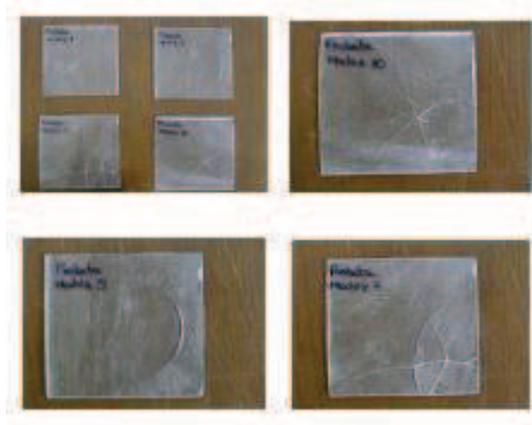


Figura 3.17. Resistencia al impacto de la matriz poliéster empleada y de los materiales con mejores propiedades a tracción y flexión.

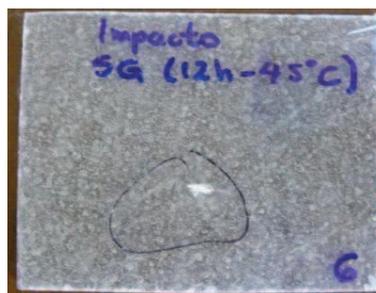
Se observa del análisis anterior que las muestras que presentan menor resistencia en cuanto a impacto son los materiales que presentan gelcoat en su superficie. En la Figura 3.18 se presentan fotografías de probetas ensayadas a impacto. Se puede observar claramente que las fallas se producen netamente en la matriz debido al impacto del dardo.



a) Matriz de resina poliéster.



b) Probeta sin gelcoat (curado medio ambiente).



c) Probeta sin gelcoat (curado a 45 °C, durante 12 horas).

Figura 3.18. Fracturas observadas en probetas de materiales compuestos de diferentes configuraciones: (a) Matriz de resina poliéster; (b) Probeta sin gelcoat (curado medio ambiente); (c) Probeta sin gelcoat (curado a 45 °C, durante 12 horas).

En las Figuras 3.18 a, b y c se observa el fisuramiento de la matriz del material.

3.6 EVALUACIÓN DE COMPUESTOS DE RESINA POLIÉSTER Y FIBRA DE VIDRIO MOLDEADOS POR ASPERSIÓN

En este apartado, se comparan las propiedades y el desempeño de los materiales desarrollados en este estudio con otros materiales compuestos de diferente matriz y fibra de refuerzo. Los valores presentados corresponden a proyectos de titulación y tesis de grado desarrollados en la Escuela Politécnica Nacional, además de otros recolectados de fuentes bibliográficas.

A continuación, se presentan las propiedades mecánicas de tracción de las 12 configuraciones que son comparadas mediante un gráfico de resistencia específica vs. módulo específico en la Figura 3.19. Las configuraciones curadas a 45°C durante 24 y 36 horas presentaron las mejores propiedades mecánicas a tracción tomando en cuenta su densidad. De idéntica manera en la Figura 3.20 se tiene el gráfico de resistencia específica vs. módulo específico a flexión, donde se observa que no existe una marcada diferencia de las propiedades a flexión.

El resumen de las propiedades mecánicas a tracción como flexión de las diferentes configuraciones elaboradas por moldeo por aspersión, se presentan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Resultados de las propiedades mecánicas de compuestos de resina poliéster y fibra de vidrio mediante moldeo por aspersión.

Configuración	Ensayos de tracción						
	δ_{real}	$\sigma_{m\acute{a}x}$	E	ϵ	Esfuerzo específico a tracción	Módulo específico	
	[g/cm ³]	[MPa]	[MPa]	[mm/mm]	[MPa*cm ³ /g]	[MPa*cm ³ /g]	
T.SG.15d.(1,5M)	1,51	37,93	4155	0,01056	25,12	2751,66	
T.SG.15d.(1,5-2,0M)	1,50	39,19	3907	0,01170	26,13	2604,67	
T.SG.15d.(2,0-2,5M)	1,53	80,71	5068	0,01948	52,75	3312,42	
T.SG.15d.(2,5M)	1,32	63,12	4273	0,01666	47,82	3237,12	
T.CG ₁ .15d.(2,0-2,5M)	1,32	71,27	4897	0,01610	53,99	3709,85	
T.CG ₂ .15d.(2,0-2,5M)	1,43	77,24	4792	0,01802	54,01	3351,05	
T.SG.35°C12h.(2,0-2,5M)	1,49	96,05	8011	0,01330	64,46	5376,51	
T.SG.35°C24h.(2,0-2,5M)	1,53	99,36	8328	0,01234	64,94	5443,14	
T.SG.35°C36h.(2,0-2,5M)	1,50	100,13	9234	0,01129	66,75	6156,00	
T.SG.45°C12h.(2,0-2,5M)	1,54	98,68	8445	0,01069	64,08	5483,77	
T.SG.45°C24h.(2,0-2,5M)	1,57	125,74	10692	0,01266	80,09	6810,19	
T.SG.45°C36h.(2,0-2,5M)	1,55	112,4	8728	0,01313	72,52	5630,97	
Resina matriz	1,20	27,98	1387	0,02020	23,32	1155,83	

Tabla 3.13. Resultados de las propiedades mecánicas de compuestos de resina poliéster y fibra de vidrio mediante moldeado por aspersión (continuación).

Configuración	Ensayos de flexión						
	δ_{real}	σF_{max}	EF	ϵF	Esfuerzo específico a tracción	Módulo específico	
	[g/cm ³]	[MPa]	[MPa]	[mm/mm]	[MPa* cm ³ /g]	[MPa* cm ³ /g]	
F.SG.15d.(1,5M)	1,52	80,74	4875	0,01910	53,12	3207,24	
F.SG.15d.(1,5-2,0M)	1,63	176,57	5584	0,03204	108,33	3425,77	
F.SG.15d.(2,0-2,5M)	1,54	200,02	5144	0,03998	129,88	3340,26	
F.SG.15d.(2,5M)	1,55	178,93	5424	0,03218	115,44	3499,35	
F.CG ₁ .15d.(2,0-2,5M)	1,35	176,53	6297	0,02764	130,76	4664,44	
F.CG ₂ .15d.(2,0-2,5M)	1,52	117,24	4329	0,02622	77,13	2848,03	
F.SG.35°C12h.(2,0-2,5M)	1,52	178,79	6907	0,02617	117,63	4544,08	
F.SG.35°C24h.(2,0-2,5M)	1,57	183,07	7133	0,02503	116,61	4543,31	
F.SG.35°C36h.(2,0-2,5M)	1,53	207,36	8188	0,02475	135,53	5351,63	
F.SG.45°C12h.(2,0-2,5M)	1,54	170,8	6330	0,02839	110,91	4110,39	
F.SG.45°C24h.(2,0-2,5M)	1,48	208,09	7607	0,02935	140,60	5139,86	
F.SG.45°C36h.(2,0-2,5M)	1,59	198,13	7303	0,02586	124,61	4593,08	
Resina matriz	1,2	70,33	2129	0,03809	58,61	1774,17	

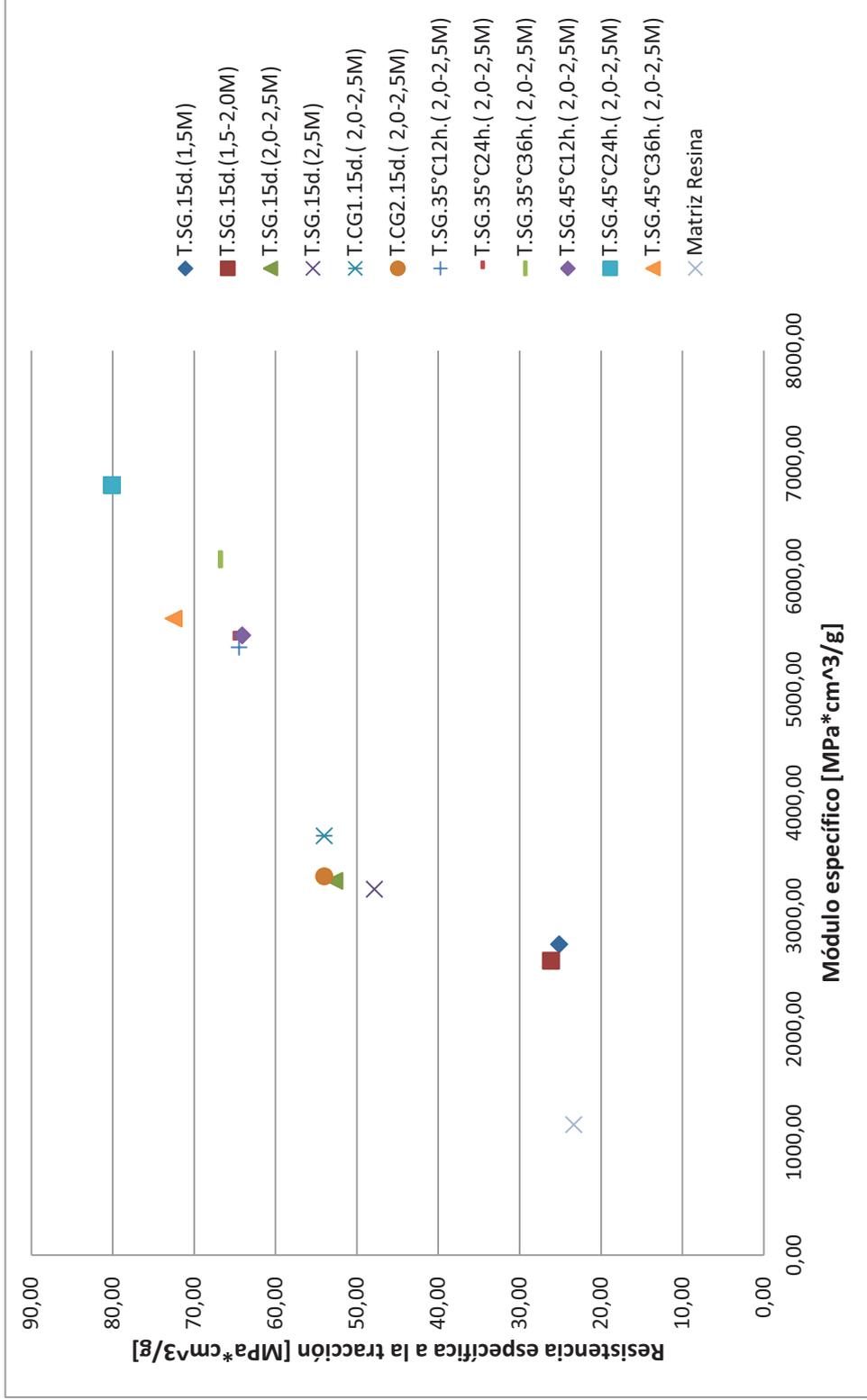


Figura 3.19. Resistencia específica vs. módulo específico a tracción de las 12 configuraciones elaboradas en este estudio.

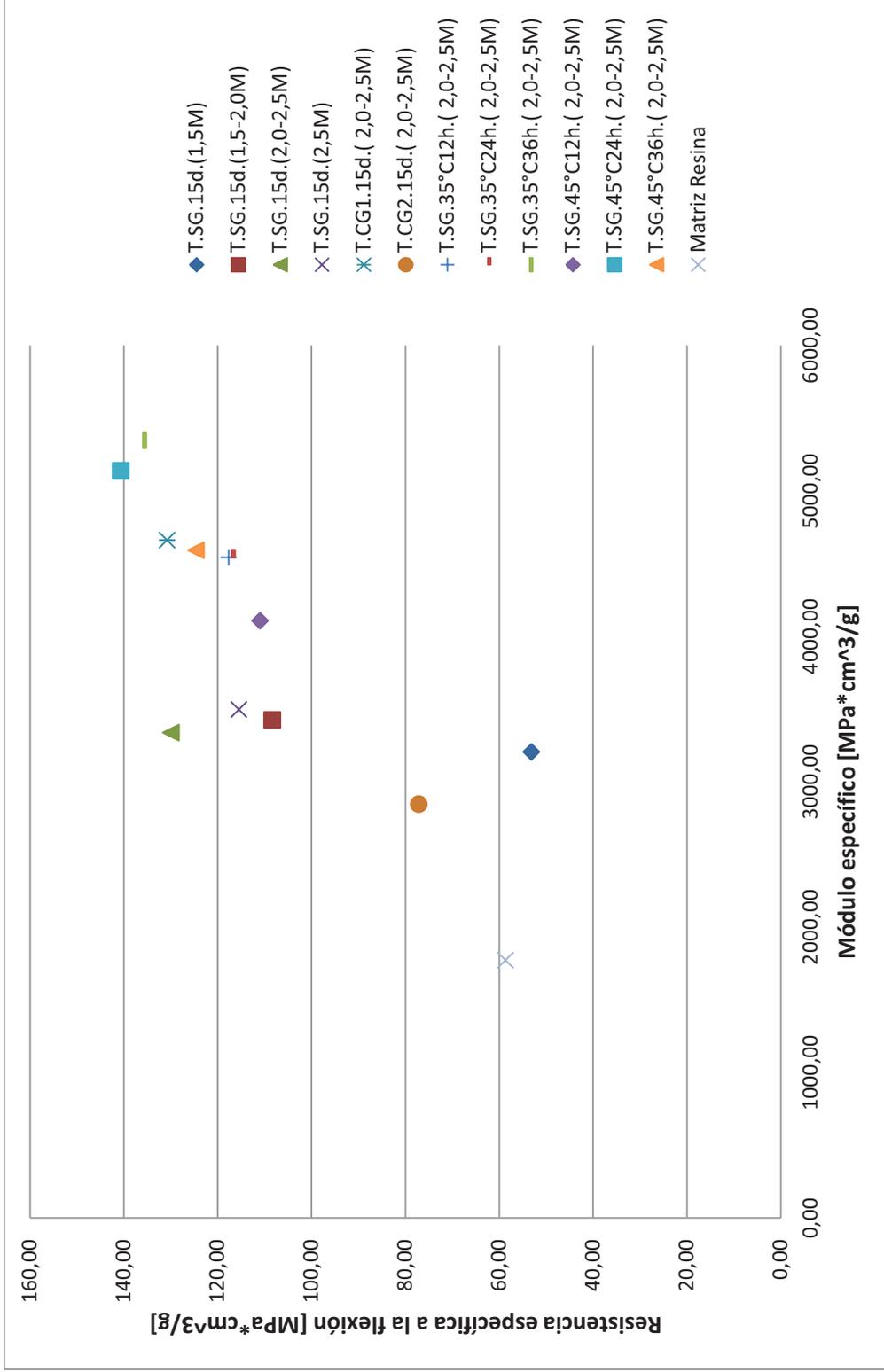


Figura 3.20. Resistencia específica vs. módulo específico a flexión de las 12 configuraciones elaboradas en este estudio.

Por otro lado, en la Tabla 3.14 se indican los resultados de algunos materiales compuestos desarrollados en el proyecto de titulación: “Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en Guardachoques para Buses” en la Universidad Técnica de Ambato, y que fueron obtenidos en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones.

Tabla 3.14. Resultados de ensayos de impacto en algunos materiales compuestos caracterizados en el LAEV.

Identificación	h	MFE	Proceso de fabricación
	mm	J	
Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en Guardachoques para Buses. ⁷⁶			
Resina Poliéster + fibra de vidrio	800	2,24	Estratificación manual
Fibra corta 30% (Fibra de Vidrio + Fibra de Cabuya + Fibra de Vidrio)	850	2,38	
Fibra larga 40% (Fibra de Vidrio + Fibra de Cabuya + Fibra de Cabuya + Fibra de Vidrio)	550	1,54	
Tejido plano 30% (Fibra de Vidrio + Fibra de Cabuya + Fibra de Vidrio)	850	2,38	

Si se realiza una comparación entre la energía media absorbida en el ensayo de impacto por el material “Fibra corta 30% (Fibra de Vidrio + Fibra de Cabuya + Fibra

⁷⁶PAREDES J., (2012), “Estudio de polímeros híbridos estratificados de matriz poliéster reforzada con fibra de vidrio y cabuya como material alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en guardachoques para buses”, Ecuador; Proyecto de tesis UTA.

de Vidrio)” y el material con la mayor energía media absorbida durante el ensayo de impacto material “compuesto sin gelcoat curado a una temperatura de 45°C durante 24 horas y fracción volumétrica 0,3” se puede observar un incremento de 1497%. Esto muestra que los materiales compuestos híbridos obtenidos mediante estratificación manual presentan una resistencia al impacto superior a la de los materiales obtenidos por moldeo por aspersion.

En algunos proyectos de titulación desarrollados en el Laboratorio de Nuevos Materiales LANUM de la Escuela Politécnica Nacional se han obtenido diferentes materiales compuestos con diferentes tipos de matrices como de refuerzos. En la Tabla 3.15 se presenta una tabla con valores obtenidos en pruebas de resistencia a impacto realizadas.

Tabla 3.15. Resistencia al impacto de algunos materiales obtenidos en el LANUM.⁷⁷⁷⁸⁷⁹

Configuración	Resistencia al impacto [J]	Tipo de matriz	Tipo de refuerzo
FV25	12,37	Polipropileno	Fibra de vidrio, fracción volumétrica: 0,25
FL2502	11,13		Fibra continua de abacá de 250 mm, 75% fibra de vidrio, 25 % fibra de abacá; frac. Vol. 0,2.
FL2004	10,99		Fibra continua de abacá de 250 mm, 25% de fibra de vidrio, 75 % fibra de abacá; frac. Vol. 0,2.
FC252002	9,99		Fibra de abacá corta de 25 mm de longitud, 75% de fibra de vidrio, 25 % fibra de abacá; frac. Vol. 0,25

⁷⁷ VILLACÍS H., (2011), “Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación”, Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

⁷⁸ CEVALLOS J, TENESACA G, (2010) “Obtención y caracterización de materiales compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante moldeo por compresión”, Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

⁷⁹ TAMAYO A., (2012), “Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación”, Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

Tabla 3.15. Resistencia al impacto de algunos materiales obtenidos en el LANUM (continuación).

Configuración	Resistencia al impacto [J]	Tipo de matriz	Tipo de refuerzo
FC201002	8,35	Polipropileno	Fibra de abacá corta de 20 mm de longitud, 75% de fibra de vidrio, 25 % fibra de abacá; frac. Vol. 0,2
FV20	8,12		Fracción volumétrica: 0,2 ; 100% de fibra de vidrio
FC251002	7,92		Fibra de abacá corta de 10 mm de longitud, 75% de fibra de vidrio, 25 % fibra de abacá, frac. Vol. 0,25
FC202002	7,51		Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud, 75% de fibra de vidrio, 25 % fibra de abacá; frac. Vol. 0,20
Matriz	3,64		
75 FLA/25FV	0,2	Poliéster	Fibra larga de abacá orientada longitudinalmente, 75% fibra de abacá, 25 % de fibra de vidrio; frac Vol. 0,2.
Mat de fibra de vidrio	0,2		Mat de fibra de vidrio; frac. Vol. 0,2
Poliéster	0,07		
Fibra de cabuya alternado y poliéster	0,15	Poliéster	Material alternado de fibra de cabuya sin estireno, curado 16 horas a 40°C; frac. Vol. 0,2.

En el proyecto de titulación “Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación”⁸⁰, se indica que el material que obtuvo las mejores propiedades mecánicas fue el material alternado de fibra de cabuya sin estireno con curado de 16 horas a 40°C y fracción volumétrica de 0,26. Este compuesto presentó una resistencia al impacto de 0,15 J,

⁸⁰TAMAYO A., (2012), “Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación”, Ecuador; Proyecto de titulación EPN

este valor es muy cercano al obtenido en el presente estudio para la mejor composición.

Se puede observar que los materiales de matriz polipropileno reforzada con fibra de vidrio y abacá⁸¹ presentan una resistencia al impacto muy superior con respecto a los materiales obtenidos por aspersion. Así, por ejemplo se puede observar que el material FV25 (Fibra de vidrio, fracción volumétrica de 0,25) presenta un incremento de 8200% con respecto al material "Sin gelcoat (curado 45°C-24h)". Inclusive la matriz de polipropileno sin refuerzo presenta un porcentaje de resistencia al impacto de 2342% con respecto al material "Sin gelcoat (curado 45°C-24h)".

Por último en la Tabla 3.15 se puede observar que en el proyecto desarrollado por Villacís⁸² el material de fibra larga de abacá orientada longitudinalmente, 75% fibra de abacá, 25 % de fibra de vidrio y fracción volumétrica de 0,2 (75 FLA/25FV) presenta una resistencia al impacto mayor en un 34,2 % al obtenido por el material "Sin gelcoat (curado 45°C-24h)". Este valor es más cercano que los valores alcanzados por los materiales de matriz polipropileno, los cuales tienen incrementos muy grandes en la resistencia a impacto en comparación con los materiales obtenidos por aspersion.

Por lo anterior se puede decir que la resistencia a impacto de un composite está dado por la matriz que lo conforma, por el tipo y orientación del refuerzo, así como también por la influencia de la temperatura y el tiempo de curado de la resina. Esto último tiene indudable relación con el fenómeno de reticulación que se inicia en el proceso de curado. De ahí el comportamiento de éstos materiales.

⁸¹CEVALLOS J, TENESACA G, (2010) "*Obtención y caracterización de materiales compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante moldeo por compresión*", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

⁸²VILLACÍS H., (2011), "*Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación*", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

3.6.1 COMPARACIÓN DE LOS COMPUESTOS MOLDEADOS POR ASPERSIÓN CON LOS COMPUESTOS OBTENIDOS POR OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN

Con el fin de comparar las características mecánicas que los materiales compuestos ofrecen según el proceso mediante el cual fueron fabricados, se presentan en la Tabla 3.16 varios procesos de manufactura de composites con sus principales valores de resistencia a la tracción como a la flexión. Cabe mencionar que el refuerzo de estos compuestos es fibra de vidrio tipo E.

Tabla 3.16. Propiedades mecánicas basadas en diversos procesos de fabricación.⁸³

Proceso de fabricación del compuesto	Resistencia a la tracción	Módulo a tracción	Resistencia a la flexión	Módulo a flexión
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Estratificación manual/Moldeo por aspersión*	68,90	---	117,20	6900,0
Moldeo de compuesto a granel*	20,70	---	68,90	11000,0
Moldeo de compuesto de lámina*	68,90	---	151,70	10300,0
Preformado estructural con mat*	103,40	---	206,8	9000,0
Preformado estructural con mat de baja concentración*	72,40	---	165,5	7600,0
Pultrusión (longitudinalmente)*	206,8	---	206,8	17200,0
SG.15d.(2,0-2,5M)	80,71	5068,04	200,0	5144,1
CG ₁ .15d.(2,0-2,5M)	71,27	4897,43	176,5	6297,2
SG.45°C24h.(2,0-2,5M)	125,74	10692,28	208,09	7606,6

*83

⁸³LEVY F., (2006), "Compósitos Estructurais: Ciencia e Tecnologia", 1ra Edición, Edgard Blucher, Brasil.

De acuerdo a la tabla anterior se puede observar que el proceso de pultrusión presenta propiedades superiores al resto, mientras el moldeado de compuesto a granel tiene propiedades inferiores. Ahora, al comparar el proceso de aspersion de este estudio con el de pultrusión se observa una diferencia notable tanto para el esfuerzo a tracción como para el módulo de elasticidad a flexión, mientras que el esfuerzo a flexión de la configuración SG.45°C24h.(2,0-2,5M) presenta un aumento del 1% con respecto al esfuerzo de flexión de pultrusión. La diferencia del proceso de pultrusión respecto al resto de procesos se debe a que éste es un proceso automático, mientras los demás son manuales o semiautomáticos como el proceso de aspersion, objeto de estudio de este proyecto.

3.6.2 COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER CON DIFERENTES TIPOS DE REFUERZO Y CONFIGURACIONES

En la Tabla 3.17 se resumen las propiedades alcanzadas en los materiales compuestos de matriz poliéster reforzada con diferentes tipos de fibra, cabe mencionar que estos materiales se obtuvieron mediante estratificación manual a diferencia del proceso de este estudio. Además, se muestran gráficos multieje para comparar los diferentes materiales expuestos en las tablas.

Tabla 3.17. Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzado con diferentes tipos de fibra.

Configuración	Densidad	Esfuerzo máximo tracción	Módulo a tracción	Esfuerzo máximo flexión	Módulo a flexión
	[g/cm ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Resina poliéster	1,20	28,0	1386,6	70,3	2129,2
Fibra de vidrio ⁸⁴	1,45	117,4	6080,0	138,2	4020,0
Fibra de vidrio 0,15 ⁸⁵	1,38	74,0	5330,3	111,1	4482,7
Fibra de vidrio (Mat) 0,3 ⁸⁶	1,50	90,0	7000,0	145,0	7000,0
Fibra de vidrio (Mat) 0,5 ⁸²	1,75	170,0	10000,0	220,0	11000,0
SG.15d.(2,0-2,5M)	1,50	80,7	5068,0	200,0	5144,1
CG ₁ .15d.(2,0-2,5M)	1,50	71,3	4897,4	176,5	6297,2
SG.45°C24h.(2,0-2,5M)	1,50	125,7	10692,3	208,1	7606,6
RM Solution-Aspersión-Fibra de vidrio	---	49,3	4935,5	85,1	2819,0
Fibra 10mm abacá 0,30 ⁸⁷	---	29,8	5323,0	47,5	2685,0
Fibra longitudinal abacá 0,35 ⁸³	---	137,0	3990,0	109,9	4605,0
Fibra longitudinal cabuya 0,39 ⁸⁸	1,08	74,3	4025,6	61,8	2953,5
Tejido alternado cabuya 0,34/0,30* ⁸⁴	1,23	60,6	6508,2	76,3	4434,1
UTA-Fibra larga de cabuya (FL) 40%	---	91,9	---	63,2	3769,8
UTA-Fibra corta de cabuya (FCo1) 30%	---	24,4	---	126,3	6581,5
Fibra de yute ⁸¹	1,25	44,3	2880,0	60,1	2970,0
Fibra de vidrio 38%/fibra de yute 10%wt ⁸⁰	---	200,0	18000,0	229,0	18000,0
Fibra longitudinal de sisal 40%wt ⁸⁰	---	129,0	8500,0	192,0	7500,0
Fibra corta de sisal 40%wt ⁸⁰	---	34,5	1900,0	86,4	---
Fibra longitudinal de coco 30%wt ⁸⁰	---	45,0	4000,0	56,0	4000,0
Fibra corta coco 0,15 Fc50-Fv50 ⁸¹	1,23	38,6	3960,0	89,2	4094,9

⁸⁴CHAND N., FAHIM M., (2008), "Tribology of natural fiber polymer composites", Woodhead Publishing, Inglaterra.pág. 46

⁸⁵DELGADO F., (2012), "Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzada con fibra de coco y fibra de vidrio para la elaboración de tableros", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

⁸⁶BIRON M., (2004), "Thermosets and composites: Technical information for plastics users", Elsevier Ltd, pág. 222.

⁸⁷GUERRERO V.H, Y OTROS, (2011), "Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales", Ecuador.

⁸⁸TAMAYO A., (2012), "Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

En la tabla anterior, los compuestos reforzados con fibra de vidrio presentan propiedades muy superiores a los compuestos de fibra natural, esto es debido a que las fibras sintéticas son más resistentes que las fibras naturales. El roving de fibra de vidrio utilizado en este proyecto muestra un mejor comportamiento que el resto de fibras naturales a excepción de la fibra longitudinal de abacá que posee una mayor resistencia. Este resultado se dio debido a que la fibra natural estaba orientada de manera longitudinal y continua a través de la matriz, mientras que el roving de fibra de vidrio fue cortado en longitudes más pequeñas por la pistola de aspersión y distribuida de manera aleatoria. Por otro punto, al comparar entre fibras naturales se puede observar que las fibras longitudinales de abacá y sisal tienen propiedades mayores que las fibras de cabuya o yute, esto puede deberse al tratamiento que recibe la fibra antes de ser utilizadas y la naturaleza misma de las fibras. En cuanto a las fibras cortas tanto sintéticas como naturales muestran propiedades bajas respecto a las fibras longitudinales o tejidas. Esto se da, porque la carga no es aplicada en la dirección de las fibras, como es en el caso de las fibras tejidas.

Acerca de los compuestos híbridos observados en la tabla anterior, se puede señalar que el refuerzo híbrido de yute presenta propiedades mecánicas excelentes, sobre todo a esfuerzos de tracción. Este resultado contrasta con lo señalado anteriormente, debido a que se unen dos tipos de fibras diferentes, una fibra natural que es continua a través de la probeta y una sintética que al unirse presenta valores superiores a un material que no es híbrido. Ahora, tomando en cuenta los compuestos de fibra de vidrio, se aprecia que a medida que aumenta el contenido de fibra se incrementan sus propiedades mecánicas, por ejemplo, el compuesto de fibra de vidrio con 0,5 de fracción volumétrica posee la mayor resistencia a tracción. En cuanto al compuesto desarrollado por aspersión presenta propiedades mayores tanto a tracción como a flexión en comparación con varios compuestos híbridos ya que las características de las fibras naturales utilizadas no son lo suficientemente buenas para mejorar la resistencia del compuesto. En la Figura 3.21 se aprecia un gráfico multiteje y en la Figura 3.22 se presentan los gráficos de resistencia específica a la tracción vs. módulo específico de los diferentes refuerzos.

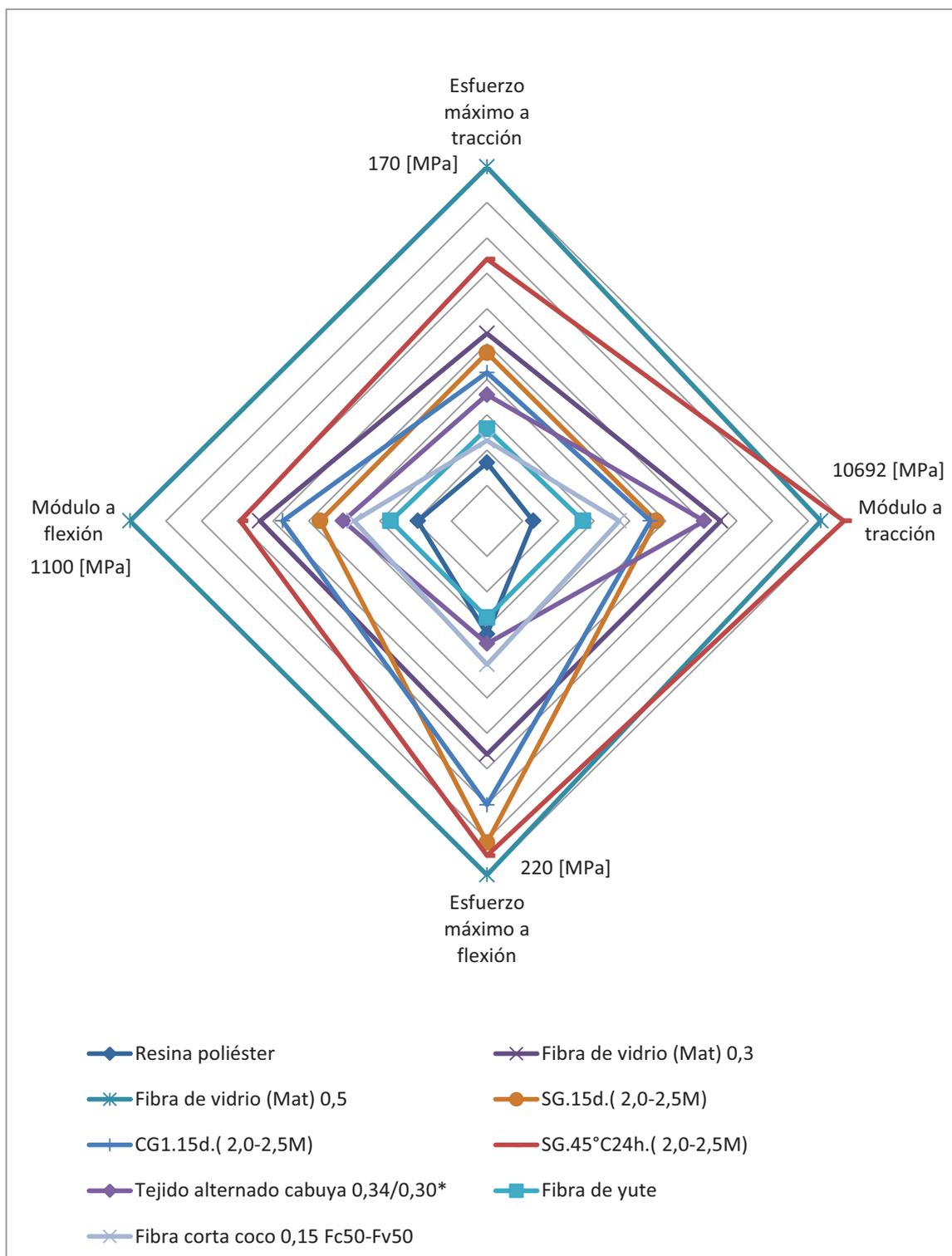


Figura 3.21. Gráfico multieje de compuestos elaborados con matriz de poliéster reforzados con diferentes tipos de fibra.

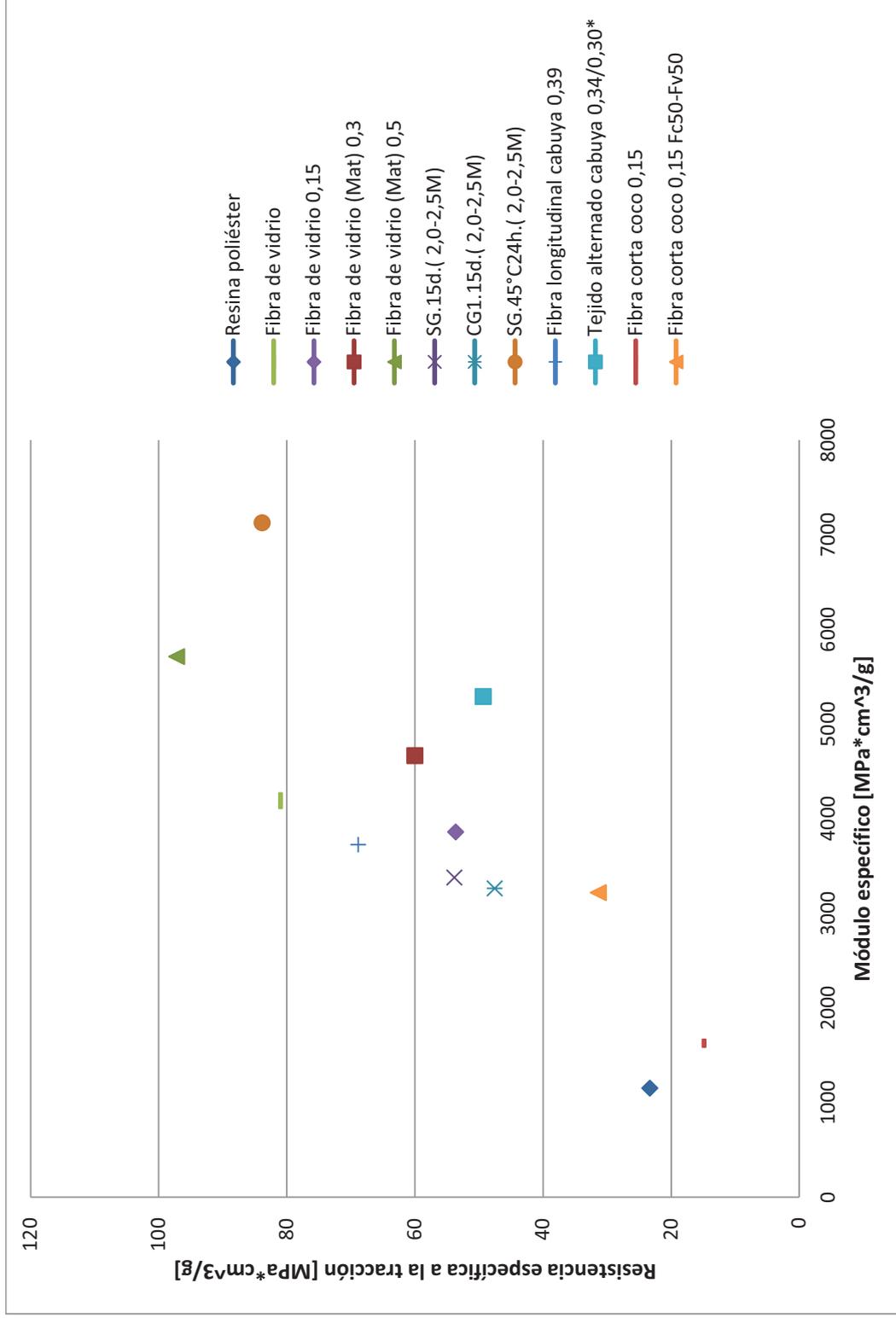


Figura 3.22. Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico de compuestos de matriz poliéster reforzados con diferentes tipos de refuerzo.

3.6.3 COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS DE DIFERENTES MATRICES

En un último análisis, a fin de conocer la variabilidad que se tiene al utilizar diferentes tipos de matriz y comparar con el material desarrollado, se tabularon los resultados de las propiedades mecánicas a tracción y flexión para algunos compuestos, que se muestran en la Tabla 3.18. Además se presenta un gráfico multieje en la Figura 3.23.

Tabla 3.18. Propiedades mecánicas de compuestos de otras matrices poliméricas.

Matriz	Refuerzo	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo a tracción [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Módulo a flexión [MPa]
Uretano Acrilato	Fibra de vidrio (Roving 50%) ⁸⁹	260,0	17000,0	380,0	10000,0
Uretano Acrilato	Fibra de vidrio (Mat 33%) ⁹⁰	112,0	6000,0	206,0	6000,0
Poliéster	Aspersión-SG.15d.(2,0-2,5M)	80,7	5068,0	200,0	5144,1
Poliéster	Aspersión-CG1.15d.(2,0-2,5M)	71,3	4897,4	176,5	6297,2
Poliéster	Aspersión-SG.45°C24h.(2,0-2,5M)	125,7	10692,3	208,1	7606,6
Epoxy	Yute 14%wt/vidrio 40%wt ⁹⁰	238,0	31000,0	624,0	28000,0
Epoxy	Fibra de vidrio (68%) ⁹¹	429,0	41000,0	938,0	37000,0
Epoxy	Fibra de vidrio (65%) ⁹⁰	400,0	24000,0	---	---
Polietileno	Fibra corta de abacá 30mm (35%) ⁹¹	15,0	406,0	19,0	252,0
Polietileno	Fibra longitudinal abacá (35%) ⁹²	102,0	1667,0	38,0	507,0
PP	Fibra corta de abacá 30mm (35%) ⁹²	37,0	1278,0	52,0	1952,0

⁸⁹BIRON M., (2004), "Thermosets and composites: Technical information for plastics users", Elsevier Ltd, pág. 219.

⁹⁰CHAND N, FAHIM M, (2008), "Tribology of natural fiber polymer composites", Woodhead Publishing, Inglaterra.

⁹¹SALAS A, (2009), "Obtención de compuestos de polietileno reforzados con fibra de abacá mediante moldeo por compresión", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

Tabla 3.18. Propiedades mecánicas de compuestos de otras matrices poliméricas (continuación).

Matriz	Refuerzo	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo a tracción [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Módulo a flexión [MPa]
PP	Fibra longitudinal abacá (35%) ⁹³	87,0	2400,0	124,0	5175,0
PP	Fibra corta de abacá 20mm/fibra de vidrio (75%A25%V) ⁹³	78,0	5224,4	52,9	5288,4
PP	Fibra longitudinal abacá/fibra de vidrio (50%A50%V) ⁹⁴	139,8	11096,4	74,8	4415,2
PP	Malla de fibra de vidrio (30%) ⁹⁰	90,0	4500,0	---	---
PLA	Fibra corta de abacá 10mm (13%) ⁹⁴	38,0	3980,0	61,0	3592,0
PLA	Fibra longitudinal abacá (20%) ⁹⁵	132,0	9223,0	104,4	5570,0

En esta tabla se puede observar que los materiales de matriz termoestable alcanzan los mejores valores a tracción y flexión. Una matriz que destaca es la epoxy con valores muy superiores al resto. La matriz de polipropileno al tener un refuerzo híbrido de fibras longitudinal de abacá con vidrio posee una gran resistencia al impacto. En cuanto al material del presente estudio, poliéster-roving de fibra de vidrio mediante proceso de aspersion, presentó mejores propiedades que las matrices termoplásticas y en cuanto al costo es muy inferior que una resina epoxy.

⁹²MOSCOSO J, (2007), "Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibra de abacá mediante moldeo por compresión", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

⁹³CEVALLOS J, TENESACA G, (2012), "Obtención y caracterización de materiales compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzada con fibras de abacá mediante moldeo por compresión"; Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

⁹⁴PONCE D, (2011), "Obtención de materiales compuestos de matriz polimérica biodegradable reforzada con fibra natural", Ecuador; Proyecto de titulación EPN.

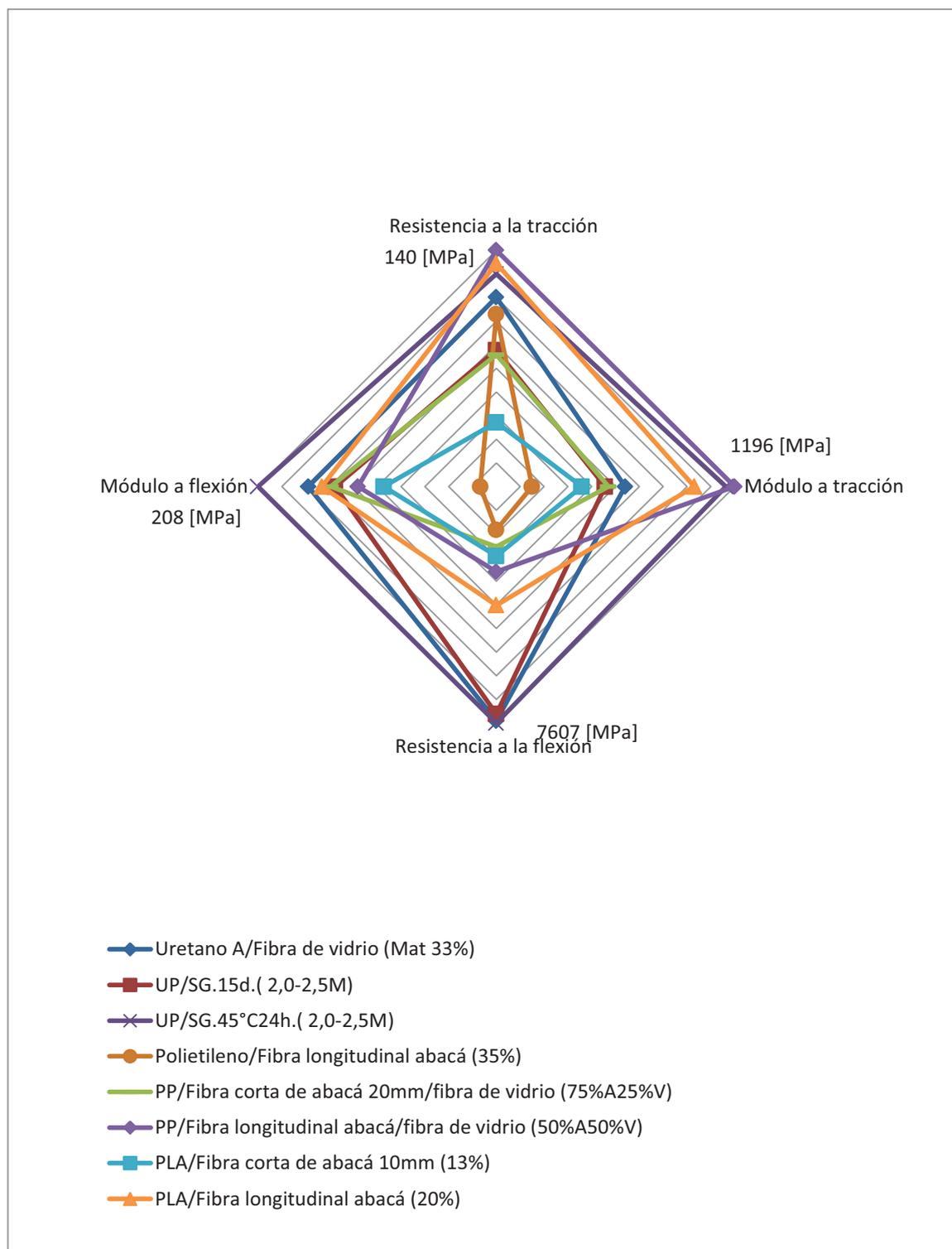


Figura 3.23. Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico de compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y fibra de vidrio.

Por último, al comparar la resistencia a la tracción de la resina obtenida en la ficha técnica que se muestra en el Anexo 1 con el valor de la matriz caracterizada en este trabajo, se observa una disminución del 42%. Y al compararla con la matriz poliéster del proyecto de titulación: "Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación" elaborada en la EPN, también se observa una disminución del 2%. Mientras tanto, la resistencia a la flexión de la matriz de resina obtenida y comparada con el proyecto de titulación "Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación", elaborada en la EPN, se observa un incremento del 24%.

CAPÍTULO 4

OBTENCIÓN DEL PROTOTIPO

Una vez definido el material compuesto que presenta las mejores propiedades mecánicas, así como las variables del proceso que intervienen en su fabricación, se describe el procedimiento para obtener un prototipo. Es primordial en una primera fase, realizar el análisis funcional del material para poder determinar qué aplicaciones son las más adecuadas para éste, con base en las propiedades que presenta. Una vez realizado esto, se presentan diferentes alternativas de prototipos a desarrollar. Luego, se analizan los criterios de selección del material valorados usando el método ordinal de criterios ponderados. Finalmente se selecciona el prototipo con mejores resultados de acuerdo a los parámetros de ponderación.

4.1 ANÁLISIS FUNCIONAL DEL MATERIAL COMPUESTO A SER EMPLEADO EN LA FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

Las propiedades físicas de un material tienen un papel muy importante en la selección de la combinación material-proceso para la producción de un producto en general.⁹⁵ Por ello se realiza el análisis funcional del composite obtenido, con el fin de identificar un prototipo adecuado para el mismo.

Las características a evaluar son las siguientes:

- i) **Aspecto del material:** La resina poliéster insaturada ortoftálica sin adición de refuerzo presenta una coloración amarillenta. Sin embargo, al finalizar el proceso de curado adquiere una apariencia transparente. Cuando se adiciona refuerzo de fibra de vidrio, adquiere algunos tipos de coloración

⁹⁵CORRADO P.,(2001) "*Design for Manufacturing: A Structured Approach*", Elsevier Science & Technology Books, pág. 17, 22.

que van desde una coloración rojiza, pasando por otra blanca e inclusive otra de tono verdoso, dependiendo de la presencia de octoato de cobalto, fibra de vidrio y MEKP respectivamente.

- ii) **Resistencia:** Al evaluar las diferentes propiedades, de las diferentes configuraciones de materiales propuestos en este trabajo de investigación, se observó que al introducir los diferentes refuerzos empleados, mejoran las propiedades de tracción, flexión e impacto. Sin embargo, la energía absorbida por impacto resulta relativamente baja.
- iii) **Costo del material:** La mayoría de los materiales empleados en el proceso de moldeo por aspersion son de fácil adquisición en el mercado local, además de que su costo es relativamente bajo. Únicamente los refuerzos de fibra tienen un costo que podría calificarse como medio. Además, existen algunos distribuidores locales que pueden facilitar la adquisición de dichas fibras.
- iv) **Biodegradabilidad:** La resina poliéster insaturada ortoftálica es una resina del tipo termoestable, lo cual quiere decir que una vez realizado el proceso de polimerización (curado), no se puede volver a moldear. Por lo cual no es un material fácilmente reciclable.
- v) **Acabado superficial:** Se obtienen excelentes acabados superficiales (liso y brillante) si adicionalmente se aplica gelcoat en una o ambas superficies del material compuesto. Además, el gelcoat puede servir como base para la aplicación de pinturas acrílicas por la capacidad que tiene de brindar protección a los rayos ultravioletas.⁹⁶
- vi) **Versatilidad de color:** Se pueden aplicar una variedad de pigmentos de diferentes colores a las superficies de los materiales terminados. Por ello

⁹⁶GUERRERO V. Y OTROS, (2011) “*Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales*”, Ecuador, pág. 102.

es posible obtener acabados de muy buena calidad y elevada estética superficial.

- vii) **Durabilidad del material:** La resina ortoftálica insaturada ANDERPOL 589 tiene un tiempo de vida útil de 6 meses a partir de su fabricación según información suministrada por el fabricante. Sin embargo, una vez reforzada con fibra puede llegar a ser muy resistente aunque también mucho más frágiles que los materiales a base de resinas termoplásticas.
- viii) **Versatilidad de geometría y tamaño:** Tanto el proceso de fabricación como los materiales empleados se prestan para la obtención piezas de geometría variada, desde formas planas, hasta curvaturas muy complicadas, además de piezas de tamaño medio y grande. El proceso empleado no es el más adecuado para fabricación de piezas pequeñas.
- ix) **Radios de acuerdo:** En el proceso de laminación se hace difícil el acceso a lugares muy estrechos, por lo que no es apropiado para piezas con radios de acuerdo inferiores a 20 mm.
- x) **Permeabilidad:** En general todos los materiales obtenidos presentan muy buena permeabilidad, debido a las propiedades hidrofóbicas que presenta la fibra de vidrio.
- xi) **Resistencia a altas temperaturas:** En general los polímeros termoestables no tienen una temperatura de fusión fija. Por lo que no es recomendable exponerlos a altas temperaturas.
- xii) **Inflamabilidad:** No se recomienda la exposición de estos materiales a elevadas temperaturas ya que se inicia un proceso de incineración con elevado desprendimiento de residuos gaseosos tóxicos.
- xiii) **Resistencia a agentes de limpieza:** Todos los composites elaborados no son afectados por contacto directo o indirecto con productos de limpieza.
- xiv)

4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS FUNCIONAL

Una vez que se han discutido las características del material, se presenta una tabla de ponderación de las mismas. En la Tabla 4.1 se muestra esta ponderación.

Tabla 4.1. Ponderación de las características del material planteado para la obtención del prototipo.

Características evaluadas	Ponderación				
	A	B	C	D	E
Aspecto del material				X	
Resistencia					X
Costo del material			X		
Biodegradabilidad	X				
Acabado superficial					X
Versatilidad de color					X
Durabilidad del material					X
Versatilidad de geometría y tamaño					X
Radios de acuerdo	X				
Permeabilidad				X	
Resistencia a altas temperaturas	X				
Inflamabilidad	X				
Resistencia a agentes de limpieza					X

Las categorías de ponderación corresponden a los siguientes criterios:

A = muy mala, B = mala, C = media, D = buena, E = muy buena

En la tabla anterior se puede observar, que el material puede ser moldeado en piezas con geometrías sencillas y complicadas, pero con radios de acuerdo que no sean pequeños (menores a 20 mm). Presenta además buenas propiedades estéticas tanto de acabado superficial como de color. Sin duda estas propiedades deben ser aprovechadas en una aplicación donde la apariencia exterior sea importante. Las peores propiedades que se presentan son las propiedades térmicas, por lo que es difícil pensar en una aplicación de este tipo. Destacan además la resistencia y durabilidad del material.

4.3 POSIBLES PROTOTIPOS A CONSTRUIR

Tomando en cuenta que la máquina de moldeo por aspersión está diseñada para obtener piezas de dimensiones medianas y grandes, es inadecuado proponer la fabricación de piezas de tamaño muy pequeño y que además contengan formas o canales reducidos donde no se pueda realizar un correcto proceso de laminado del material. Además, se debe tomar en cuenta el tipo de curado, ya que al elegir una pieza de dimensiones grandes (mayores a 1 m²) se limita su procesamiento, debido a que en los Laboratorios de la EPN no existe una estufa de tal capacidad. Por lo anterior no se podría realizar el curado de dicho prototipo a temperatura mayor a la del medio ambiente (18 – 24 °C para el caso de Quito), por lo que se seleccionó el curado a temperatura ambiental. Es factible producir prototipos que estén expuestos a ambientes corrosivos o que tengan alto contenido de humedad, debido a que el material es impermeable. Además, se debe considerar que dado el caso se puede aplicar una capa superficial de gelcoat que proporciona una excelente estética superficial e incrementa la resistencia al desgaste. En la Tabla 4.2 se pueden observar las diferentes propuestas para la fabricación del prototipo.

Tabla 4.2. Alternativas para fabricación de prototipo.

Alternativa	Nombre	Producto	Razones para su selección
A	Cobertor de llanta de emergencia de automóvil		<ul style="list-style-type: none"> • Molde de fácil elaboración • Posible buena acogida en el mercado • Utilidad media
B	Casa para animal doméstico		<ul style="list-style-type: none"> • Geometría sencilla • No requiere tolerancias dimensionales exigentes • Buena acogida en el mercado • Utilidad elevada
C	Tina de baño de bebe		<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Fácil elaboración • Utilidad media
D	Raquetas de ping-pong		<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Geometría sencilla • Utilidad media
E	Sillón de espera		<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Fácil elaboración • Geometría sencilla • Utilidad elevada

4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ALTERNATIVAS A CONSTRUIR

4.4.1 ALTERNATIVA DE DISEÑO A

Ventajas

- i) Prototipo vistoso e innovador.
- ii) Molde de una sola pieza.

Desventajas

- i) Exigentes requerimientos dimensionales y geométricos.
- ii) Utilización de pinturas especiales para obtener un buen acabado.
- iii) Difícil desmoldeo por la geometría de la pieza.

4.4.2 ALTERNATIVA DE DISEÑO B

Ventajas

- i) Geometría en su mayoría formada de áreas planas.
- ii) No requiere gran precisión dimensional.
- iii) Su acabado superficial puede estar dado inclusive por un estilo rústico, sin utilización de pinturas.

Desventajas

- i) Requiere utilización de dos moldes.
- ii) Existe gran oferta de este tipo de productos en el mercado.
- iii) Aplicación convencional muy conocida.

4.4.3 ALTERNATIVA DE DISEÑO C

Ventajas

- i) Espesor requerido menor a 4 mm.
- ii) Se requiere un solo molde para su elaboración.

Desventajas

- i) Pieza presenta radios de acuerdo pequeños.
- ii) Posible exposición a niveles de toxicidad bajos, por la composición de la resina.
- iii) Alta oferta en el mercado de este tipo de productos.

4.4.4 ALTERNATIVA DE DISEÑO D

Ventajas

- i) Fácil geometría.
- ii) Poca demanda en el mercado.

Desventajas

- i) Requeriría la adición de un reforzamiento adicional en la matriz para obtener propiedades mecánicas adecuadas contra cargas de impacto.
- ii) Excesivos desperdicios asociados con la producción de este prototipo debido a las dimensiones pequeñas del mismo.

4.4.5 ALTERNATIVA DE DISEÑO E

Ventajas

- i) Dimensiones de la pieza a fabricar acorde con las características de producción de moldeo por aspersión.
- ii) Fácil y rápida fabricación, que se la realiza en una sola pieza.
- iii) Utilización de un solo molde para su elaboración.

Desventajas

- i) Presenta un diseño tradicional y no innovador.
- ii) El diseño es rígido.

4.5 SELECCIÓN DEL PROTOTIPO A CONSTRUIR

Se tienen varias alternativas para seleccionar el prototipo, por lo que se empleó el método ordinal de criterios ponderados para escoger el prototipo más adecuado acorde a las diferentes propiedades y cualidades del material. A continuación se plantean los diferentes criterios de selección:

- i) **Conformabilidad:** Se refiere al pos-maquinado que debe recibir la pieza luego de ser retirada del molde para tener un producto de calidad. Además consiste en la facilidad que brinda el material en procesos de corte, taladrado y pulido.
- ii) **Costo:** Se debe analizar el costo del prototipo. Piezas con superficies y volúmenes mayores requerirán mayores cantidades de materiales y tiempos de fabricación para su elaboración.
- iii) **Funcionalidad:** Contempla qué tan factible y con qué tipos de materiales puede fabricarse el prototipo sin menoscabo de las funciones que debe desempeñar.
- iv) **Resistencia al desgaste:** Se debe asegurar que el prototipo a fabricar no tendrá requerimientos de desgaste demasiado exigentes. Recordando además que los polímeros termoestables tienen un amplio rango de utilización debido a su buena resistencia y propiedades mecánicas.
- v) **Utilidad:** Debe garantizarse que el prototipo tenga utilidad prolongada, ya que al estar conformado por una matriz polimérica termoestable no será fácil de reciclar ni reutilizar.

En la Tabla 4.3 se muestra la valoración de los criterios de selección.

Tabla 4.3. Resultado de la valoración de los criterios de selección del prototipo.

Criterio	Conformabilidad	Costo	Funcionalidad	Resistencia al desgaste	Utilidad	$\Sigma,+1$	Ponderación
Conformabilidad		0,5	0	1	0	2,5	0,18
Costo	0,5		1	1	0,5	4	0,29
Funcionalidad	0	0		1	0	2	0,14
Resistencia al desgaste	0	0	0		0	1	0,07
Utilidad	1	0,5	1	1		4,5	0,32
Sumatoria						14	1

donde:

1: si el criterio de las filas es superior que el de las columnas

0,5: si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas

0: si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas

Con la ponderación obtenida en la tabla anterior se evaluaron las diferentes alternativas multiplicándolas por los pesos específicos. La valoración se desarrolla en las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, y 4.8.

Las alternativas son las siguientes:

A: Cobertor de llanta de emergencia de automóvil

B: Casa para animal doméstico

C: Tina de baño de bebé

D: Raquetas de ping-pong

E: Sillón de espera

Tabla 4.4. Peso específico del criterio de conformabilidad.

Conformabilidad	A	B	C	D	E	$\Sigma+1$	Ponderación
A		0	0	0	0	1	0,06
B	1		1	0,5	0	3,5	0,23
C	1	0		0	0	2	0,13
D	1	0,5	1		0,5	4	0,27
E	1	1	1	0,5		4,5	0,31
Sumatoria						15	1

Tabla 4.5. Peso específico del criterio de costo

Costo	A	B	C	D	E	$\Sigma+1$	Ponderación
A		1	0,5	0	0	2,5	0,17
B	0		0	0	0	1	0,07
C	0,5	1		0	0,5	3	0,20
D	1	1	1		1	5	0,34
E	1	1	0,5	0		3,5	0,22
Sumatoria						15	1

Tabla 4.6. Peso específico del criterio de funcionalidad.

Funcionalidad	A	B	C	D	E	$\Sigma+1$	Ponderación
A		0	1	1	0	3	0,20
B	1		1	1	0,5	3,5	0,23
C	0	0		1	0	2	0,13
D	0	0	0		1	2	0,13
E	1	0,5	1	1		4,5	0,31
Sumatoria						15	1

Tabla 4.7. Peso específico del criterio de resistencia al desgaste.

Resistencia al desgaste	A	B	C	D	E	$\Sigma+1$	Ponderación
A		1	0,5	0	0	2,5	0,17
B	0		0	0	0	1	0,06
C	0,5	1		0,5	0	3	0,20
D	1	1	0,5		0,5	4	0,26
E	1	1	1	0,5		4,5	0,31
Sumatoria						15	1

Tabla 4.8. Peso específico del criterio de utilidad.

Utilidad	A	B	C	D	E	$\Sigma+1$	Ponderación
A		0	0,5	1	0	2,5	0,16
B	1		1	1	0	4	0,27
C	0,5	0		1	0	2,5	0,17
D	0	0	0		0	1	0,06
E	1	1	1	1		5	0,34
Sumatoria						15	1

Los resultados del método de comparación de alternativas se pueden apreciar en la Tabla 4.9. Las alternativas E, D y B tienen la ponderación más alta, por lo que representarían la mejor elección para el prototipo. La alternativa que alcanzó la mayor ponderación es la opción E, que corresponde al sillón de espera, por lo cual éste fue el prototipo elegido.

Tabla 4.9. Conclusión del método de selección de alternativas.

Opción	Procesabilidad	Costo	Funcionalidad	Resistencia al desgaste	Utilidad	Σ	Prioridad
A	0,06	0,17	0,20	0,17	0,16	0,76	5
B	0,23	0,07	0,23	0,06	0,27	0,86	3
C	0,13	0,20	0,13	0,20	0,17	0,78	4
D	0,27	0,34	0,13	0,26	0,06	1,06	2
E	0,31	0,22	0,31	0,31	0,34	1,49	1

4.5.1 SELECCIÓN DEL DISEÑO A CONSTRUIR

Se determinó que el prototipo a realizarse corresponde a un sillón de espera. Sin embargo debe considerarse que existen muchos y diversos diseños de sillones de espera. Por lo anterior, fue necesaria la selección adecuada de un diseño que se adapte a las condiciones existentes en el entorno en el cual será fabricado el prototipo, así como la maquinaria existente. De este modo se optimiza el proceso de fabricación y se conocen las limitantes operacionales así como los costos de producción.

Para conocer los diferentes tipos de modelos existentes en el mercado, se realizó una visita a una empresa manufacturera de muebles en la ciudad de Quito. Estos productos estarían destinados principalmente a los siguientes mercados:

- Servicios: restaurantes, comedores, consultorios de especialidades médicas, jurídicos y sociales de carácter público y privado.
- Transporte: paradas de bus.
- Educativo: instituciones educativas de instrucción secundaria y universitaria.

En la Tabla 4.10 se observa la información recopilada.

Tabla 4.10. Diseños, precios y usos de sillas de espera existentes en el mercado.

Diseño	Unidades vendidas	Precio de venta	Uso
	(6 meses)	(USD)	
Doble tándem con mesa intermedia	50	310	- Consultorios médicos. - Oficinas. - Sector público
Hilera triple con respaldos laterales	120	230	- Sector educativo. - Mobiliario ejecutivo.
Modular doble ó triple convencional	100	150	- Restaurantes. - Paradas de bus.

Se observa que el modelo más vendido corresponde al modelo denominado “hilera triple con respaldos laterales” con un costo aproximado en el mercado de \$230. En segundo lugar se encuentra el modelo modular doble o triple convencional con 100 unidades vendidas a un costo de \$150. Debe notarse que este modelo corresponde a un mueble de espera más sencillo pero mucho más económico en comparación con los otros dos modelos planteados. Finalmente en tercer lugar se encuentra el modelo “doble tándem con mesa intermedia”, con 50 unidades vendidas a un costo de \$310 aproximadamente. Las alternativas analizadas se presentan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Alternativas de diseño de sillones de espera.

Alternativa	Diseño
A (Tipo doble tándem con mesa intermedia)	
B (Tipo hilera triple con respaldos laterales)	
C (Tipo modular, doble o triple convencional)	

4.5.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES DISEÑOS

4.5.2.1 Alternativa de diseño A (Doble tándem con mesa intermedia)

Ventajas

- i) Diseño novedoso.
- ii) Posee buena estética.
- iii) Posee mesa incorporada, que mejora la prestación de servicio del mueble.

Desventajas

- i) Los apoyos del espaldar no son rígidos, por lo que resulta un poco incómodo al usuario.
- ii) Requiere de 3 moldes para su fabricación.
- iii) Requiere ensamblaje de algunas partes.
- iv) Costo elevado.

4.5.2.2 Alternativa de diseño B (Hilera triple con respaldos laterales)

Ventajas

- i) El espaldar y cuerpo de la silla son tapizados.
- ii) Posee apoyos laterales, que incrementan la comodidad del usuario.
- iii) Altamente estético.
- iv) Mayor preferencia de este modelo por parte de los consumidores.

Desventajas

- i) Los apoyos de los brazos sirven únicamente para usuarios que se ubican en las partes laterales del mueble.
- ii) Requiere un proceso adicional de tapizado para su fabricación, lo que incrementa su tiempo de fabricación y costo.
- iii) Su tapizado es susceptible a daños, por derrame de sustancias líquidas.
- iv) La limpieza del mueble es más complicada que los otros diseños.

4.5.2.3 Alternativa de diseño C (Tipo modular doble y convencional)

Ventajas

- i) El espaldar y cuerpo están constituidos en una sola parte
- ii) Su fabricación es más fácil y rápida ya que el asiento se fabrica en un solo molde.
- iii) Es de fácil limpieza.
- iv) Modelo más económico de todos los presentados.

Desventajas

- i) Su diseño es conservador.
- ii) Es rígido, por lo que el usuario tiene menor comodidad que en diseños acolchonados.

De las diferentes alternativas de diseño para la fabricación del prototipo planteadas anteriormente se debe seleccionar la más adecuada de acuerdo los criterios que se plantean. Esto se realizó mediante el método ordinal de criterios ponderados. Los criterios de diseño a evaluar fueron: Factibilidad de fabricación, utilización de moldes, peso, costo, operaciones adicionales de fabricación y tiempo de producción.

- (i) **Factibilidad de fabricación:** Se debe analizar cuán viable es la producción del producto planteado. Aquí se considera el método de producción, así como los materiales y equipos requeridos en la producción del prototipo.
- (ii) **Costo:** Mientras menor sea la complejidad de la pieza a fabricarse, menor será el costo que se requiere en la fabricación del molde. Así mismo mientras mayor sea el número de piezas que requiere el producto, mayor será el número de moldes requeridos y mayor será el costo de producción del prototipo.
- (iii) **Operaciones adicionales de fabricación:** Mientras se requiera un mayor número de operaciones adicionales para la producción de un producto, mayor será el costo del bien o servicio en el mercado, por lo cual es importante optimizar el número de operaciones requeridas.

- (iv) **Predilección del consumidor:** Este es un criterio fundamental en la producción de bienes y servicios. Debe considerarse de entre las alternativas propuestas cuál es la que presenta mayor aceptación por parte de los consumidores, para asegurar el éxito del producto en el mercado.

La Tabla 4.12 muestra la valoración de los criterios para selección de diseños del prototipo a fabricarse.

Tabla 4.12. Valoración de criterios para selección de diseños del prototipo a fabricarse.

Criterio	Factibilidad de fabricación	Costo	Operaciones adicionales de fabricación	Predilección del consumidor	$\Sigma+1$	Ponderación
Factibilidad de fabricación		0	0	0	2	0,18
Costo	1		1	0,5	3,5	0,31
Operaciones adicionales de fabricación	1	0		0	2	0,18
Predilección del consumidor	1	0,5	1		3,5	0,33
Sumatoria					11	1

donde:

- 1: si el criterio de las filas es superior que el de las columnas
- 0,5: si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas
- 0: si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas

Con la ponderación obtenida en la tabla anterior se evaluaron las diferentes alternativas multiplicándolas por los pesos específicos. La valoración se desarrolla en las Tablas 4.13, 4.14, 4.15, 4.16.

Tabla 4.13. Peso específico del criterio de factibilidad de fabricación.

Factibilidad de fabricación	A	B	C	$\Sigma+1$	Ponderación
A		0,5	0	1,5	0,25
B	0,5		0	1,5	0,25
C	1	1		3	0,50
Sumatoria				6	1

Tabla 4.14. Peso específico de costo.

Costo	A	B	C	$\Sigma+1$	Ponderación
A		0	0	1	0,17
B	1		0	2	0,33
C	1	1		3	0,50
Sumatoria				6	1

Tabla 4.15. Peso específico del criterio de operaciones adicionales de fabricación.

Operaciones adicionales de fabricación	A	B	C	$\Sigma+1$	Ponderación
A		1	0	2	0,30
B	0		0	1	0,20
C	1	1		3	0,50
Sumatoria				6	1

Tabla 4.16. Peso específico del criterio de predilección del consumidor.

Predilección del consumidor	A	B	C	$\Sigma+1$	Ponderación
A		0	0	1	0,17
B	1		1	3	0,50
C	1	0		2	0,33
Sumatoria				6	1

En la Tabla 4.17 se observa la conclusión del método de selección de alternativas.

Tabla 4.17. Conclusión del método de selección de alternativas.

Opción	Factibilidad de fabricación	Costo	Operaciones adicionales de fabricación	Predilección del consumidor	Σ	Prioridad
A	0,25	0,17	0,30	0,17	0,89	3
B	0,25	0,33	0,20	0,50	1,28	2
C	0,50	0,50	0,50	0,33	1,83	1

En la Tabla 4.17 se observa que la opción de diseño C (Tipo triple o doble modular convencional) alcanzó la ponderación más elevada, por lo que esta opción de diseño fue la alternativa seleccionada.

4.6 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

4.6.1 MOLDE DEL PROTOTIPO

Los asientos fueron elaborados mediante moldeo por aspersion con la mejor configuración de material compuesto previamente establecida. Para la fabricación de los asientos fue necesaria la utilización de un molde convexo. El molde empleado fue adquirido a una empresa encargada de la manufactura de muebles en la ciudad de Quito, a un costo de \$100 con una estimación de producción de 600 unidades para la vida útil del molde. En la Figura 4.1 se presenta el molde empleado y sus dimensiones generales. Todas las dimensiones se encuentran en milímetros.



Figura 4.1. Molde convexo utilizado para la elaboración del prototipo con sus dimensiones generales.

4.6.2 ENSAMBLAJE DE PARTES

El prototipo consta de dos partes: de la parte constitutiva de los asientos y de una estructura metálica soportante. Los asientos constituyen la parte funcional del mueble mientras que la estructura metálica soportante da estabilidad a todo el sistema. Cada asiento se une a la estructura metálica mediante cuatro pernos con sus respectivas tuercas en la parte inferior del mueble. Los detalles sobre la estructura metálica soldada se encuentran en el Anexo 5. En la Figura 4.2 se presenta el ensamblaje de las partes del prototipo seleccionado, mientras que en la Figura 4.3 se presenta un diagrama de procesos de la obtención del prototipo.



Figura 4.2. Diseño y partes del prototipo elaborado.

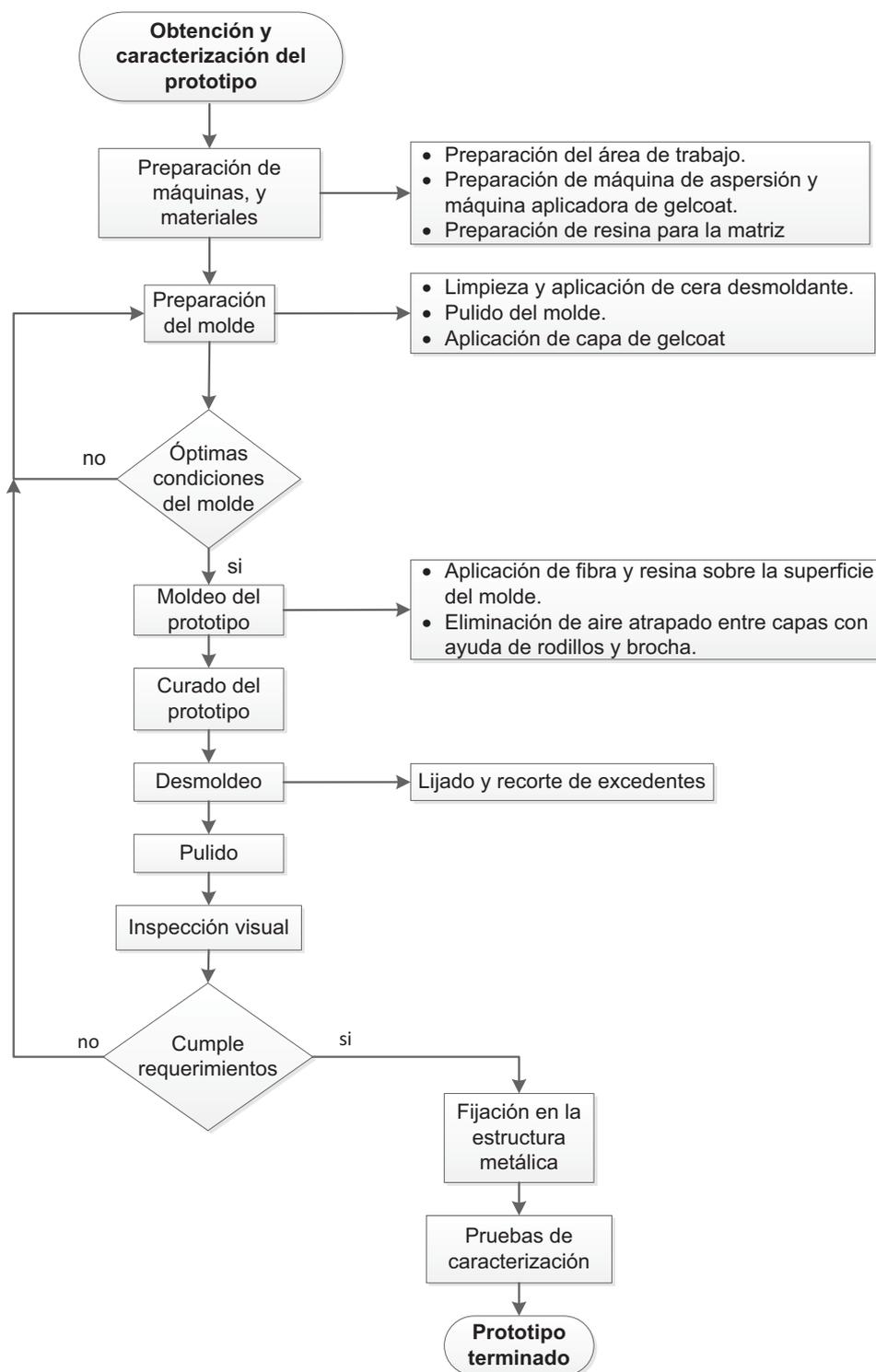


Figura 4.3. Diagrama de flujo para la obtención del prototipo mediante moldeo por aspersión.

En la Figura 4.4 se presentan las dimensiones nominales de la silla individual, mientras que en la Figura 4.5 se presenta la imagen del mueble de espera tipo modular doble convencional completamente ensamblado.



Figura 4.4. Dimensiones nominales de una de las sillas del prototipo elaborado (todas las dimensiones se encuentran en mm).



Figura 4.5. Dimensiones nominales del prototipo elaborado (todas las dimensiones se encuentran en mm).

4.7 ANÁLISIS DE COSTOS

En la siguiente sección se expone en primer lugar el costo de producción de un tablero de material compuesto. Seguidamente se presentan los costos asociados a la elaboración del prototipo con curado tanto a temperatura ambiente como en estufa. Para el cálculo de costos se tomaron en cuenta los costos de materiales consumidos, costos de energía eléctrica empleada y costos de mano de obra.

4.7.1 COSTO DE FABRICACIÓN DE UN TABLERO DE MATERIAL COMPUESTO

Previo al análisis de los costos de producción asociados a este proceso de obtención de materiales compuestos, se mencionan las consideraciones previas en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Tabla de consideraciones generales para la estimación del costo de producción de un tablero de material compuesto de 2,5 mm de espesor nominal.

Consideraciones
Costo del kWh en el sector industrial en el Ecuador \$0,08 /kWh
Costo hombre-hora \$1,98 considerando el salario mínimo vital de 318 dólares mensuales.
En el consumo de energía eléctrica asociada al proceso se consideró únicamente la potencia consumida por el motor del sistema de generación de aire comprimido cuya potencia es de 15 kW.
El costo del uso del molde por pieza, se obtuvo dividiendo el valor de adquisición del molde (\$ 40) entre el número de piezas que se pueden producir, esto es un estimado de 250 piezas.
Se considera que para la realización del proceso se necesitará únicamente de los servicios de 1 trabajador.
Se considera la jornada laboral de 8 horas diarias, 5 días a la semana, durante 4 semanas por mes.

En el consumo de materiales se realizaron dos mediciones, una antes de iniciar el proceso, con lo cual se obtuvo una masa o volumen inicial del material. La segunda medición se la realizó inmediatamente después de que se ha finalizado el proceso de fabricación, con lo cual se obtuvo una masa o volumen final del material empleado. Finalmente por diferencia de masas o volúmenes finales e iniciales se pudo calcular la cantidad total de materiales consumidos durante el proceso de fabricación.

En la Tabla 4.19 se muestran las mediciones de algunos parámetros del producto a elaborar así como mediciones de los materiales consumidos en el proceso de fabricación. Para el caso de resina poliéster, octoato de cobalto, estireno, thinner y catalizador MEKP se realizaron las mediciones en mililitros, mientras que para la fibra de vidrio, y cera desmoldante las mediciones se realizaron en kilogramos y gramos respectivamente. Adicionalmente en los materiales se incluye el costo del molde por cada pieza elaborada, dividiendo del costo de éste para el número de piezas aproximadas que se podrían obtener durante la vida útil del molde. En las Tablas 4.20 y Tabla 4.21 se muestran los costos específicos de cada material y los costos asociados al consumo de energía eléctrica.

Tabla 4.19. Dimensiones del producto a elaborar, y materiales empleados en su fabricación.

Cálculos previos		
Dimensiones del tablero fabricado:	Ancho (cm)	75
	Largo (cm)	75
	Espesor (cm)	0,25
Volumen del elemento a fabricar	(cm ³)	1406,25
Mezcla de resina + octoato de cobalto + estireno	Volumen resina-inicial (ml)	7500
	Volumen resina-final (ml)	4250
	Volumen resina-consumida (ml)	3250
Fibra de vidrio "roving"	Masa de roving-inicial (kg)	14,5
	Masa de roving-final (kg)	13
	Masa de roving-consumida(kg)	1,5
MEKP	Volumen MEKP-inicial (ml)	1500
	Volumen MEKP -final (ml)	1460
	Volumen MEKP -consumido (ml)	40

Tabla 4.20. Costo de materiales empleados.

Consumo de materiales			Costo de materiales en el mercado		Costo de materiales empleados
					\$
Mezcla de (resina + octoato de cobalto + estireno)	Volumen de estireno (ml)	422	2,83	\$/litro	1,19
	Vol. octoato de cobalto consumido (ml)	7,13	17,54	\$/litro	0,13
	Volumen de resina-consumido (ml)	2819	3,54	\$/litro	9,98
Fibra de vidrio	Masa de roving-consumida(kg)	1,5	7,59	\$/kg	11,39
Mec	Volumen de mec-consumido (ml)	40	6,56	\$/litro	0,26
Thinner	Volumen thinner-consumido (l)	0,5	5,05	\$/litro	2,53
Cera desmoldante	Masa de cera desmoldante-consumida(g)	20	14,32	\$/kg	0,29
Molde	Costo del uso del molde		0,16	\$/tablero	0,16
			Costo total de materiales empleados		25,92

Tabla 4.21. Costos de energía eléctrica.

Consumo de energía eléctrica			Costo kWh en el sector industrial en el Ecuador	Costo de energía eléctrica empleada
			\$/kWh	\$
Carga del compresor [min]	Carga inicial de llenado [min]	8	0,08	0,32
	Cargas parciales de trabajo 1 [min]	2		
	Cargas parciales de trabajo 2 [min]	2		
	Cargas parciales de trabajo 3 [min]	2		
	Cargas parciales de trabajo 4 [min]	2		
	Tiempo total de funcionamiento [h]	0,26		
			Costo total de energía eléctrica consumida	0,32

En la Tabla 4.22 se indican los tiempos invertidos en el proceso de fabricación del tablero, los cuales están subdivididos en dos bloques. El bloque de actividades previas está relacionado con todas las actividades necesarias previas a la elaboración del producto y las actividades de fabricación que son las realizadas para la obtención del producto como tal.

Tabla 4.22. Tiempos de fabricación.

Cálculo de tiempo de fabricación

Actividades previas		[min]
Preparación del área de trabajo	Limpieza	3
	Colocación de plásticos	2
Preparación de materiales	Limpieza de rodillos e inmersión en estireno	4
	Preparación de la mezcla de resina poliéster	5
Preparación del molde	Limpieza del molde	5
	Aplicación primera capa de desmoldante	2
	Primer pulido de superficie	3
	Aplicación segunda capa de desmoldante	2
	Segundo pulido de superficie	3
	Aplicación tercera capa de desmoldante	2
	Pulido final de superficie	6
Preparación de máquina	Limpieza de ductos	6
	Carga de resina	3
	Carga de MEKP	3
	Chequeo y regulación de presiones	1
	Limpieza de pistola	8
	Limpieza de boquilla y empaques	5
	Colocación de boquilla	0,5
	Limpieza de cortadora de fibra	2
	Colocación de roving	1
	Pruebas de rociado	5
Tiempo total invertido en actividades previas [min]		71,5

Actividades de fabricación		[min]
Aspersión de resina y fibra	Primer pase	1
	Segundo pase	2
	Medición de espesor	1
	Tercer pase	1
	Medición de espesor	2
	Cuarto pase	1
	Medición de espesor	2
	Quinto pase	1
	Medición de espesor	2
	Sexto pase	1
	Medición de espesor	2

Actividades de fabricación		[min]
Laminación	Primer pase	2
	Segundo pase	1,4
	Tercer pase	2,12
	Cuarto pase	3,15
	Quinto pase	3,2
	Sexto pase	3,35
Tiempo total invertido en actividades de fabricación [min]		31,22
Tiempo total empleado en el proceso de fabricación	Costo del tiempo total empleado en el proceso de fabricación	
1,71 horas	3,39 USD	

Finalmente, en la Tabla 4.23 se presentan los costos parciales, así como el costo total del proceso de fabricación para la obtención del tablero de 2,5 mm de espesor. Adicionalmente en la Tabla 4.24 se muestran los índices de producción que se tendrían al producir este producto con todas las consideraciones que se indicaron en la Tabla 4.18.

Tabla 4.23. Tabla de los costos parciales y del costo total de producción de un tablero de 2,5 mm de espesor.

Cálculo del costo total del proceso de fabricación		
Costo total de materiales empleados	25,92	\$
Costo total de energía eléctrica consumida	0,32	\$
Costo del tiempo total empleado en el proceso	3,39	\$
Total	29,63	\$

Tabla 4.24. Índices de producción que se obtendrían para la elaboración de tableros.

Índices de producción estimados			
Periodo	Cantidad		
	Número de tableros	m ²	m ³
Diario	5	2,63	0,01
Semanal	23	13,14	0,03
Mensual	94	52,57	0,13

4.7.2 COSTO DE FABRICACIÓN DE UN ASIENTO DE ESPERA CURADO EN ESTUFA

Previo al análisis de los costos de producción asociados a este proceso de obtención de materiales compuestos, se mencionan las consideraciones previas indicadas en la Tabla 4.25. Debe indicarse que se realiza el curado del asiento en la estufa Venticell durante 24 horas a 45°C.

Tabla 4.25. Tabla de consideraciones generales para la estimación del costo de producción de un asiento curado a 45°C durante 12 horas.

Consideraciones
Costo del kWh en el sector industrial en el Ecuador \$0,08 /kWh
Costo hombre-hora \$1,98 considerando el salario mínimo vital de 318 dólares mensuales.
En el consumo de energía eléctrica asociada al proceso se consideraron las potencias consumidas por el motor del sistema de generación de aire comprimido, la energía consumida por la estufa en el proceso de curado, además de la lijadora y cortadora eléctrica que también se emplearon.
El costo del uso del molde por pieza, se obtuvo dividiendo el valor de adquisición del molde (\$ 100) entre el número de piezas que se pueden producir, esto es un estimado de 600 piezas.
Se considera que para la realización del proceso se necesitará únicamente de los servicios de 1 trabajador.
Se considera la jornada laboral de 8 horas diarias, 5 días a la semana, durante 4 semanas por mes.

En el consumo de materiales se realizaron dos mediciones, una antes de iniciar el proceso, con lo cual se obtuvo una masa o volumen inicial del material. La segunda medición se la realizó inmediatamente después de que se a finalizado el proceso de fabricación, con lo cual se obtuvo una masa o volumen final del material empleado. Finalmente por diferencia de masas o volúmenes se pudo calcular la cantidad total de materiales consumidos durante el proceso de fabricación.

En la Tabla 4.26 se muestran las mediciones de algunos parámetros del producto a elaborar así como mediciones acerca de los materiales consumidos en el proceso de fabricación. Para el caso de resina poliéster, octoato de cobalto, estireno, thinner y catalizador MEKP se realizaron las mediciones en mililitros, mientras que para la fibra de vidrio, y cera desmoldante las mediciones se realizaron en kilogramos y gramos

respectivamente. Adicionalmente en los materiales se incluye el costo del molde por cada pieza elaborada, dividiendo el costo de éste para el número de piezas aproximadas que se podrían obtener durante la vida útil del molde. En las Tablas 4.27 y Tabla 4.28 se muestran los costos específicos de cada material y los costos asociados al consumo de energía eléctrica, respectivamente.

Tabla 4.26. Dimensiones del producto a elaborar, y materiales empleados en su fabricación.

Cálculos previos		
Mezcla de resina + octoato de cobalto + estireno	Volumen resina-inicial (ml)	9500
	Volumen resina-final (ml)	7000
	Volumen resina-consumida (ml)	2500
Fibra de vidrio "roving"	Masa de roving-inicial (kg)	7,9
	Masa de roving-final (kg)	6,4
	Masa de roving-consumida(kg)	1,5
MEKP	Volumen MEKP-inicial (ml)	1500
	Volumen MEKP-final (ml)	1440
	Volumen MEKP-consumido (ml)	60

Tabla 4.27. Costo de materiales empleados.

Consumo de materiales			Costo de materiales en el mercado		Costo de materiales empleados
					\$
Mezcla de (resina + octoato de cobalto + estireno)	Volumen de estireno (ml)	325	2,83	\$/litro	0,92
	Vol. octoato de cobalto consumido (ml)	5,3	17,54	\$/litro	0,09
	Volumen de resina-consumido (ml)	2168	3,54	\$/litro	7,67
Fibra de vidrio	Masa de roving-consumida(kg)	1,5	7,59	\$/kg	11,39
MEKP	Volumen de MEKP-consumido (ml)	60	6,56	\$/litro	0,39
Thinner	Volumen thinner-consumido (l)	0,5	5,05	\$/litro	2,53
Cera desmoldante	Masa de cera desmoldante – consumida(g)	20	14,32	\$/kg	0,29
Gelcoat	Volumen de gelcoat (ml)	2000	4,5	\$/litro	9,00
Molde	Costo del uso del molde		0,23	\$/pieza	0,23
			Costo total de materiales empleados		32,51

Tabla 4.28. Costos de energía eléctrica.

Consumo de energía eléctrica			Costo When el sector industrial en el Ecuador	Costo de energía consumida
			\$/kWh	\$
Carga del compresor [min]	Carga inicial de llenado [min]	8	0,08	0,32
	Cargas parciales de trabajo 1 [min]	2		
	Cargas parciales de trabajo 2 [min]	2		
	Cargas parciales de trabajo 3 [min]	2		
	Cargas parciales de trabajo 4 [min]	2		
	Tiempo total de funcionamiento [h]	0,26		
Estufa Venticell	Potencia de trabajo [kW]	3,7		7,104
	Tiempo total de funcionamiento [h]	24		
Cortadora eléctrica	Potencia de trabajo [kW]	0,65		0,026
	Tiempo total de trabajo	0,50		
Lijadora Eléctrica	Potencia de trabajo [kW]	0,27		0,066
	Tiempo total de trabajo	3		
			Costo total de energía eléctrica consumida	7,52

En la Tabla 4.29 se indica el tiempo invertido en el proceso de fabricación del tablero, los cuales están subdivididos en dos bloques. El bloque de actividades previas relacionado son todas las actividades necesarias previas a la elaboración del producto, mientras que las actividades de fabricación son las actividades propiamente dichas realizadas para la obtención del producto.

Tabla 4.29. Tiempos de fabricación.

Cálculo de tiempo de fabricación		
Actividades previas		[min]
Preparación del área de trabajo	Limpieza	3
	Colocación de plásticos	2
Preparación de materiales	Limpieza de rodillos e inmersión en estireno	4
	Preparación de la mezcla de resina poliéster	5
Preparación del molde	Limpieza del molde	5
	Aplicación primera capa de desmoldante	2
	Primer pulido de superficie	3
	Aplicación segunda capa de desmoldante	2
	Segundo pulido de superficie	3
	Aplicación tercera capa de desmoldante	2
	Pulido final de superficie	6
Preparación de máquina	Limpieza de ductos	6
	Carga de resina	3
	Carga de MEKP	3
	Chequeo y regulación de presiones	1
	Limpieza de pistola	8
	Limpieza de boquilla y empaques	5
	Colocación de boquilla	0,5
	Limpieza de cortadora de fibra	2
	Colocación de roving	1
	Pruebas de rociado	5
Tiempo total invertido en actividades previas [min]		71,5
Actividades de fabricación		[min]
Aspersión de resina y fibra	Primer pase	1
	Segundo pase	2
	Tercer pase	1
	Cuarto pase	1
	Medición de espesor	2
	Colocación de placa de asiento	5
Laminación	Primer pase	2
	Segundo pase	1,4
	Tercer pase	2,12
	Cuarto pase	3,15
Tiempo total invertido en actividades de fabricación [min]		20,67
Tiempo total empleado en el proceso de fabricación	Costo del tiempo total empleado en el proceso de fabricación	
1,54 horas	3,04 USD	

Finalmente en la Tabla 4.30 se presentan los costos parciales, así como el costo total del proceso de fabricación para la obtención del asiento para silla de espera. En la Tabla 4.31 se muestran los índices de producción que se tendrían al fabricar este producto con todas las consideraciones que se indicaron en la Tabla 4.25.

Tabla 4.30. Tabla de los costos parciales y del costo total de producción de un asiento de silla de espera curado a 45°C durante 24 horas, de 3 mm de espesor nominal.

Cálculo del costo total del proceso de fabricación		
Costo total de materiales empleados	32,51	\$
Costo total de energía eléctrica consumida	7,52	\$
Costo del tiempo total empleado en el proceso	3,04	\$
Total	43,07	\$

Tabla 4.31. Índices de producción que se obtendrían para la elaboración de asientos de silla de espera.

Índices de producción estimados	
Periodo	Cantidad
	Número de asientos
Diario	5
Semanal	26
Mensual	104

4.7.3 COSTO DE FABRICACIÓN DE UN ASIENTO DE ESPERA CURADO A TEMPERATURA AMBIENTE

Los costos de materiales y tiempos de fabricación para un asiento de silla de espera curado a temperatura ambiente, son los mismos que para el caso del asiento curado a 45 °C durante 24 horas, con la única diferencia en el costo de consumo energético. El consumo energético para este caso disminuye, debido a que no se realiza el curado de la pieza terminada en horno eléctrico a temperatura controlada sino que se lo realiza al aire libre a temperatura ambiente. En la Tabla 4.32 se muestra el consumo energético asociado a la elaboración de este producto en el cual se consigue un ahorro económico de alrededor del 17% con respecto al curado en horno durante 24 horas. Finalmente en la Tabla 4.33 se muestran los costos parciales así como el costo

total para la producción del asiento para silla de espera de aproximadamente 3 mm de espesor nominal. Debe señalarse que las consideraciones generales así como los índices de producción asociados a la elaboración de este producto, en este caso son los mismos que se mostraron en las Tablas 4.25 y 4.31, respectivamente.

Tabla 4.32. Consumo energético para la producción de un asiento para silla de espera curado al medio ambiente

Consumo de energía eléctrica			Costo kWh en el sector industrial en el Ecuador	Costo de energía consumida
			\$/kWh	\$
Carga del compresor [min]	Carga inicial de llenado [min]	8	0,08	0,32
	Cargas parciales de trabajo 1 [min]	2		
	Cargas parciales de trabajo 2 [min]	2		
	Cargas parciales de trabajo 3 [min]	2		
	Cargas parciales de trabajo 4 [min]	2		
	Tiempo total de funcionamiento [h]	0,26		
Cortadora eléctrica	Potencia de trabajo [kW]	0,65	0,026	
	Tiempo total de trabajo	0,50		
Lijadora Eléctrica	Potencia de trabajo [kW]	0,275	0,066	
	Tiempo total de trabajo	3		
			Costo total de energía eléctrica consumida	0,41

Tabla 4.33. Tabla de los costos parciales y del costo total de producción de un asiento de silla de espera curado a temperatura ambiente.

Cálculo del costo total del proceso de fabricación		
Costo total de materiales empleados	32,31	\$
Costo total de energía eléctrica consumida	0,41	\$
Costo del tiempo total empleado en el proceso	3,04	\$
Total	35,76	\$

4.8 PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

En la actualidad se cuenta con variados y versátiles métodos para evaluar el desempeño de muchos tipos de muebles en general. Sin embargo muchos de estos ensayos son de carácter general y no proveen medidas cuantitativas de la resistencia y durabilidad de los componentes estructurales que se requieren para propósitos de ingeniería de diseño. Un problema adicional se presenta cuando algunos éstos ensayos generales no proveen métodos sencillos para trasladar los datos de desempeño a lo largo del tiempo en niveles cuantitativos de aceptación o rechazo. Para la mayoría de los casos quienes han desarrollado los ensayos han buscado maneras de calificar la funcionalidad de sillas de una manera poco técnica sin llevar a cabo el proceso complejo de ingeniería de diseño, identificando y cuantificando la distribución de las magnitudes de esfuerzos y deformaciones en la construcción. La mayor consideración en el desarrollo de ensayos debe hacerse en base a la manera en la cual el desempeño es definido y cómo se establecen niveles de aceptación y rechazo.

Principalmente se debe responder a la cuestión de si deben usar niveles de aceptación a un nivel simple (aprueba-no aprueba) ó niveles de aceptación múltiples (clasificaciones). De manera general se utilizan niveles de aceptación simple cuando se busca establecer un nivel base para el desempeño y seguridad de un producto, mientras que se utilizan múltiples cuando se busca identificar diferencias de desempeño o calidad en un grupo de productos similares.

“Los procedimientos que se basan en deflexiones fácilmente medibles o fracturas de partes proporcionan los resultados menos ambiguos. Cuando la resistencia es la consideración primaria, los resultados se simplifican grandemente cuando se utiliza el criterio de simplificación si la aceptación o rechazo se basa en una falla catastrófica del elemento. Una segunda consideración se hace en base al tipo de modelo de carga a ser usada. En general se utilizan modelos de carga estática y modelos de fatiga. Los modelos de carga estática no son muy adecuados para evaluar las características

de desempeño de las sillas porque muchas de las fallas en estos productos se relacionan con el uso repetido. Los modelos de carga dinámica tampoco parecen muy adecuados para evaluar el desempeño de las características de muebles. Estos ensayos son llevados a cabo típicamente a un nivel de carga para un número de ciclos hasta que el mueble falla. En esencia estos ensayos determinan la resistencia estructural del mueble a aplicaciones repetidas de carga⁹⁷.

Para desarrollar un ensayo del desempeño de un mueble, es primordial identificar y clasificar las acciones que los usuarios realizan habitualmente sobre el mueble, por acción de su utilización. De entre todas estas acciones, son de interés las acciones que producen efectos adversos en la vida útil del mueble. Una vez que han sido identificadas todas éstas acciones, éstas deben ser transformadas en un conjunto equivalente de cargas y condiciones capaces de reproducir los efectos sobre el mueble., el efecto de estas acciones pueden ser reproducidas por un grupo relativamente pequeño de fuerzas independientes.

Es importante notar que aunque una silla puede ser usada en una infinidad de maneras, el análisis funcional de este producto nos indica que son seis las acciones de particular interés.

- i) El usuario sentándose sobre la silla.
- ii) El usuario reclinándose hacia atrás sobre el respaldo.
- iii) El usuario abandonando la silla hacia adelante.
- iv) El usuario inclinándose hacia adelante.
- v) El usuario inclinándose hacia un lado de la silla.
- vi) El usuario empujando sobre los apoyos para los brazos para abandonar la silla.

En el caso del presente estudio se consideran como acciones críticas realizadas por el usuario el sentarse sobre la silla y el reclinarse hacia atrás sobre el respaldo de la

⁹⁷ HOLZ R. Y OTROS, (1999) "Performance testing of side chairs", EE.UU, pág. 227-234.

silla. Otras acciones como por ejemplo la realizada por el usuario inclinándose hacia un lado o empujar sobre los apoyos de los brazos para abandonar la silla son acciones que no se pueden realizar en el prototipo elaborado ya que este no cuenta en su diseño con apoyos para los brazos, y por lo tanto no se toman en cuenta en el planteamiento de los ensayos a realizar.

A continuación se presentan los ensayos a los cuales se sometió al prototipo, con el fin de caracterizarlo en aspectos como estética superficial, resistencia mecánica y resistencia a la acción de agentes químicos como ácidos e hidróxidos. La norma NTE INEN 1556 “Muebles de oficina: Definiciones y clasificación”, denomina al prototipo elaborado como un “Sistema de asientos”. La norma NTE INEN 1664 “Muebles de oficina: Asientos. Requisitos” establece los requisitos de construcción y las dimensiones generales de los asientos, fabricados con cualquier tipo de material. En la Figura 4.6 se presenta el esquema general de ensayos seguido para la caracterización del prototipo.

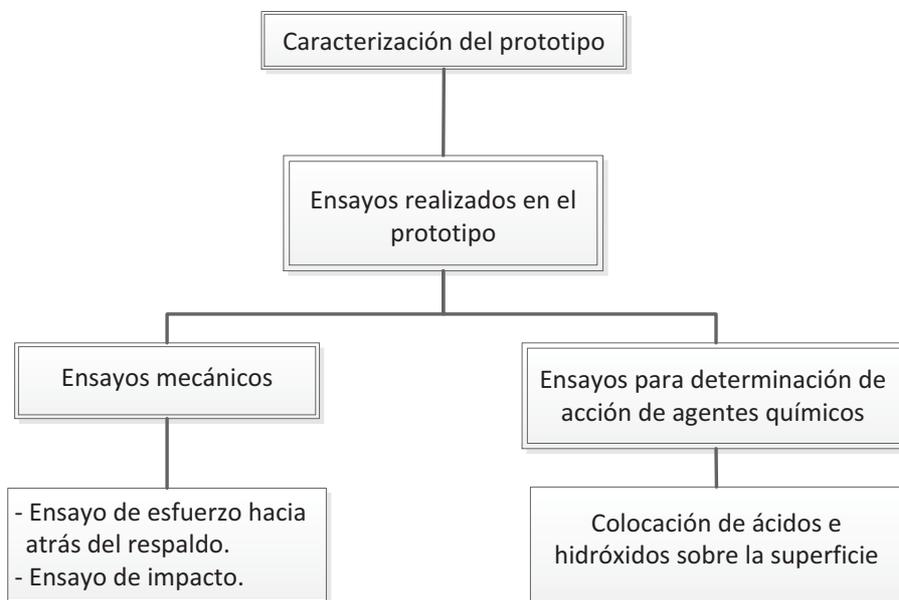


Figura 4.6. Esquema general de pruebas realizadas en el prototipo.

4.8.1 ENSAYOS MECÁNICOS

En la norma NTE INEN 2002:95 se establecen los métodos de ensayo para asientos. Los ensayos descritos en la norma citada evalúan la funcionalidad y seguridad que prestan los asientos. En la Tabla 4.34 se describen las pruebas de resistencia mecánica a las cuales deben ser sometidos los sistemas de asientos.

Tabla 4.34. Pruebas mecánicas generales descritas en la norma NTEINEN 2002:95 para sistemas de asientos.

Programa de ensayos para asientos con respaldo
Ensayo de esfuerzo hacia atrás del respaldo
Ensayo de la base
Ensayo de caída
Ensayo de impacto cíclico sobre el asiento (peso de la bolsa, sin brazos 45 kg)
Ensayo de durabilidad del respaldo, asiento fijo (cíclica)

No se realizó el ensayo de la base, debido a que este ensayo está descrito específicamente para la caracterización de la estructura soportante del sistema, lo cual no es relevante en el presente estudio. Los ensayos dinámicos de carga cíclica requieren la aplicación repetida de carga a un número determinado de ciclos por minuto. No se realizaron los ensayos de carga cíclica sobre el asiento ni el ensayo de durabilidad del respaldo debido a limitantes de maquinaria equipamiento e instrumental requeridos para la realización de estos ensayos. Por lo tanto, para la caracterización del prototipo se ha considerado la realización de las pruebas:

- i) Ensayo de esfuerzo hacia atrás del respaldo
- ii) Ensayo de caída

4.8.1.1 Ensayo de esfuerzo hacia atrás del respaldo

El objetivo del ensayo es evaluar la resistencia del asiento para resistir esfuerzos que ocurren en el espaldar como resultado del uso común del asiento. El procedimiento se indica manera a continuación:

- i) Colocar la silla sobre la superficie sobre la cual se va a ensayar el asiento y sujetarla de la parte frontal para evitar su movimiento.
- ii) Aplicar a una posición localizada de 406 mm sobre el asiento una carga de 667 N una sola vez por un lapso de tiempo de 1 minuto.
- iii) Retirar la carga y observar si existen deformaciones o daños estructurales en el asiento.
- iv) Aplicar nuevamente sobre el asiento una carga de 1112 N una sola vez por un lapso de tiempo de 1 minuto.
- v) Retirar la carga y observar si existen deformaciones o daños estructurales en el asiento.

Se indican dos criterios de aceptación para las pruebas anteriores. La aplicación de la carga de 667 N aplicada por una sola vez no debe causar fractura estructural ni ninguna avería que afecte a funcionalidad del asiento. Además la aplicación de la carga de 1112 N aplicada por una sola vez, no debe causar averías que pudiesen causar lesiones al ocupante del asiento. En la Figura 4.7 se presenta una imagen explicativa del ensayo de flexión sobre el respaldo del asiento.

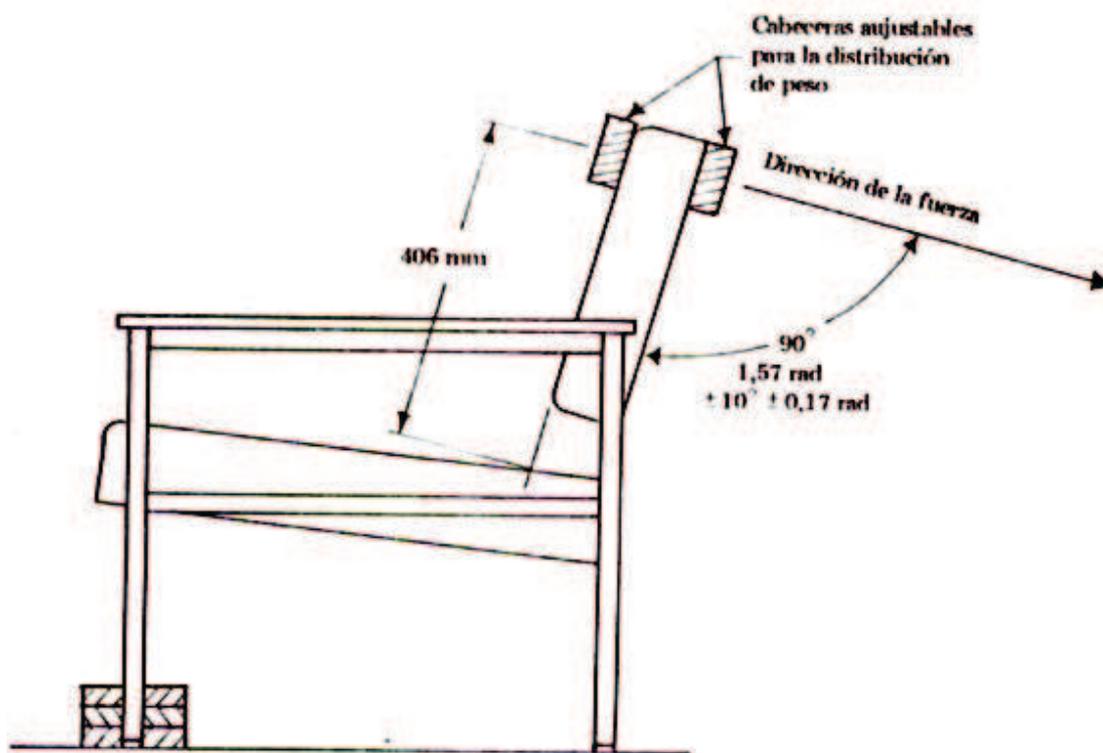


Figura 4.7. Ensayo de caída sobre asiento según norma NTE INEN 2002:95.⁹⁸

4.8.1.2 Ensayo de caída

El objetivo de este ensayo es evaluar la resistencia de la silla a la acción de cargas de impacto imprevistas. El procedimiento se indica de la siguiente manera:

- i) Colocar la silla sobre la superficie sobre la cual se va a ensayar el asiento.
- ii) Colocar una bolsa de ensayo, que contenga arena o perdigones con una masa de 102 kg, la cual posteriormente se liberará en caída libre desde una altura de 152 mm desde el centro del asiento.
- iii) Se libera la carga desde la altura indicada.
- iv) Se retira la carga de ensayo y se observan si se ha producido algún tipo de imperfección en la unidad.

⁹⁸NTE INEN 2002:95., (2002) "Muebles de oficina. Métodos de ensayo para asientos", Ecuador, sección 6.3.

- v) Si no se observa ningún tipo de imperfección se repite la prueba pero esta vez con una carga de prueba de 136 kg.

Se indican dos criterios de aceptación para las pruebas anteriores. La aplicación de la carga de 102 kg aplicada por una sola vez no debe causar fractura estructural ni ninguna avería que afecte a funcionalidad del asiento. La aplicación de la carga de 136 kg aplicada por una sola vez no debe causar averías que pudiesen causar lesiones al ocupante del asiento. En la Figura 4.8 se presenta una imagen explicativa del ensayo de caída.

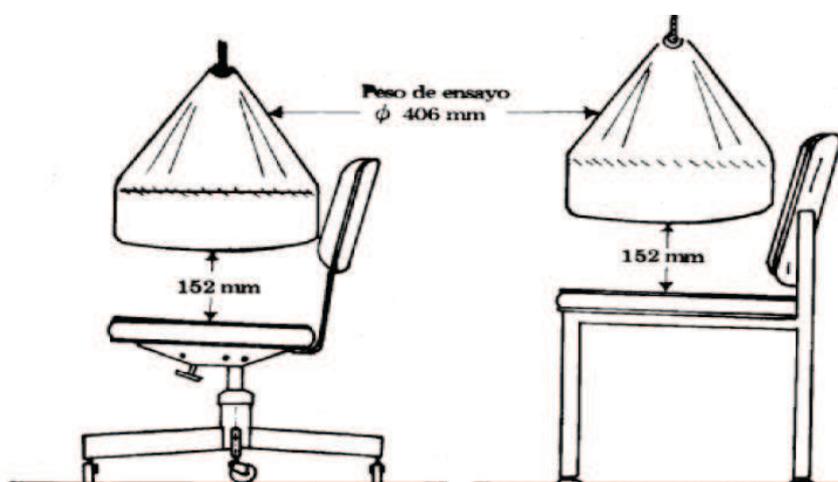


Figura 4.8. Ensayo de caída sobre asiento según norma NTE INEN 2002:95.⁹⁹

4.8.2 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA ACCIÓN DE AGENTES QUÍMICOS

Se consideró importante determinar la resistencia del material del prototipo elaborado a la acción de agentes químicos. Aunque no se determina la realización de pruebas de acción de agentes químicos en ninguna norma NTE INEN referente a sistemas de sillas de oficina, se hace mención a pruebas de esta naturaleza en la norma NTE

⁹⁹NTE INEN 2002:95., (2002) "Muebles de oficina. Métodos de ensayo para asientos", Ecuador, sección 6.5.

INEN 2583 “Muebles escolares¹⁰⁰. Pupitre con silla para alumnos. Requisitos e inspección”. En ella se establece que los asientos sean sometidos a la acción de soluciones de ácido acético y amoníaco al 10% durante un tiempo de 6 horas. En las pruebas que se realizaron sobre los asientos del prototipo elaborado se utilizaron soluciones de ácido acético, ácido sulfúrico, hidróxido de sodio e hidróxido de amonio al 10 %. En la Figura 4.9 se observa la realización del ensayo.



Figura 4.9. Aplicación de los agentes químicos sobre la superficie del asiento.

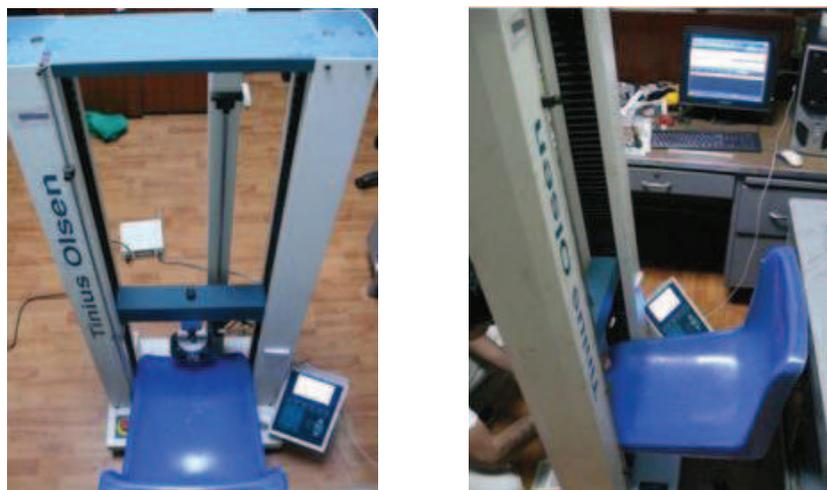
Como criterio de aceptación se indica que una vez transcurrido el tiempo de prueba se limpie la superficie de la silla de los agentes químicos, y se observe si existe o no algún tipo de daño superficial o pérdida de alguna de las características superficiales iniciales que presentaba el prototipo.

4.9 EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS DEL PROTOTIPO

4.9.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL RESPALDO DEL PROTOTIPO

Se realizaron los ensayos sobre el espaldar del prototipo conforme se señala en la norma NTE INEN 2002:95. En la Figura 4.10 se puede observar la realización del ensayo, mientras que en la Tabla 4.35 se observan los resultados obtenidos.

¹⁰⁰ NTE INEN 2583., (2011) “*Muebles escolares. Pupitre con silla para alumnos. Requisitos e inspección*”, Ecuador, sección 6.13.



(a)

(b)

Figura 4.10. Aplicación de las cargas de funcional y de prueba sobre el respaldo del prototipo; (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

Tabla 4.35. Resultados del ensayo de aplicación de carga sobre el respaldo del prototipo.

Ensayo para asientos según NTE INEN 2002:95		
Carga de prueba [N]	Tiempo de aplicación	Resultado
667 (carga funcional)	1 min	No se observa daño estructural pero sí resquebrajamiento de gelcoat.
1112 (carga de prueba)		Se observa fisuramiento del asiento, sin embargo no se comprometería la integridad física del usuario.

Se observó que el prototipo no presentó daños de consideración al aplicar la carga de 667 N, presentándose únicamente resquebrajamiento superficial de la capa de gelcoat del prototipo. Al aplicar la carga de 1112 N, se produjo una fisura en la estructura del prototipo, la cual no comprometería de ninguna manera la integridad física del usuario. En la Figura 4.11(a) se puede observar el resquebrajamiento del recubrimiento de gelcoat, mientras que en la Figura 4.11 (b) se observa el apareamiento de una fisura.

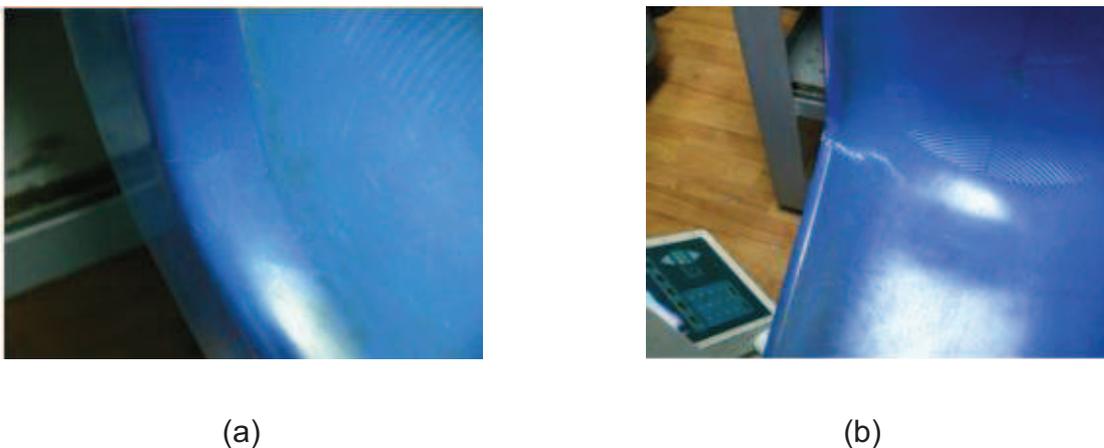


Figura 4.11. Prototipo después del ensayo de aplicación de carga sobre el respaldo; (a) Resquebrajamiento de gelcoat; (b) Fisura de falla.

Por otra parte la parte inferior del prototipo no presentó daño estructural alguno durante ninguna de las dos pruebas como se puede apreciar en la Figura 4.12



Figura 4.12. Parte inferior del prototipo después de la realización de las pruebas.

4.9.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CAÍDA REALIZADOS EN EL PROTOTIPO

Se realizaron los ensayos de caída sobre el prototipo conforme se señala en la norma NTE INEN 2002:95. En la Figura 4.13, Figura 4.14 y Figura 4.15 se puede observar la realización del ensayo, mientras que en la Tabla 4.36 se observan los resultados obtenidos.



Figura 4.13. Medición de la altura indicada para la realización del ensayo.



Figura 4.14. Elevación de la carga sobre el prototipo.

Tabla 4.36. Resultados del ensayo de caída sobre el prototipo.

Ensayo de caída sobre el prototipo según NTE INEN 2002:95			
Energía de impacto requerida [J]	Masa utilizada para impacto [kg]	Altura de lanzamiento [m]	Resultado
151,9	11,36	1,36	No se producen daños en la estructura, ni ningún componente del asiento
202,5		1,82	No se producen daños en la estructura, ni ningún componente del asiento



Figura 4.15. Caída de la carga de prueba e inspección del prototipo.

4.9.3 RESISTENCIA A LA ACCIÓN DE AGENTES QUÍMICOS

Se realizaron ensayos de resistencia a la acción de agentes químicos sobre la superficie del prototipo conforme se estipula en la norma NTE INEN 2583:2011. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.37, mientras que en Figura 4.16 se observa una imagen del prototipo después de la realización de los ensayos.

Tabla 4.37. Resultados de los ensayos de resistencia a la acción de agentes químicos.

Ensayo de resistencia a la acción de agentes químicos sobre el prototipo según NTEINEN 2583:2011	
Reactivo utilizado	Resultado
Solución de ácido acético al 10%	No se observa ninguna reacción corrosiva, ni daño superficial.
Solución de ácido sulfúrico al 10%	No se observa ninguna reacción corrosiva, ni daño superficial.
Solución de hidróxido de sodio al 10%	No se observa ninguna reacción corrosiva, ni daño superficial.
Solución de hidróxido de amonio al 10%	No se observa ninguna reacción corrosiva, ni daño superficial.



Figura 4.16. Prototipo posterior al ensayo de acción química.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La importancia de trabajar con la máquina de aspersión radica en el hecho que, al ser una máquina semiautomática facilita la elaboración de cualquier prototipo de gran tamaño. Por consiguiente, la elaboración del producto final es mucho más sencilla permitiendo el ahorro de tiempo, energía y costo de mano de obra.
- Para la utilización de la máquina de aspersión del LANUM se establecieron parámetros fijos de trabajo como: la presión de bombeo de resina/catalizador en 20 psi, la presión de atomización del catalizador en 90 psi y el ingreso de aire al motor neumático de la cortadora de fibra se estableció para la mínima cantidad de fibra de vidrio.
- Para la elaboración del material compuesto se definieron las concentraciones volumétricas óptimas las cuales fueron: 15% de estireno y 0,25% de iniciador. En cuanto al catalizador, la posición del dosificador de MEKP fue una variable del proceso, teniendo como óptima la posición entre 2,0-2,5.
- Se estableció una velocidad promedio del operador de 0,2 m/s para la aplicación de resina y fibra de vidrio, con la que se consiguió obtener el número adecuado de 4, 6 y 9 capas para elaborar los respectivos tableros de material compuesto, los cuales fueron destinados a la extracción de probetas para la realización de ensayos de caracterización mecánica.
- Se cumplió con la mayoría de los objetivos al inicio del estudio; excepto el caso del prototipo no se fabricó con el material que presentaba las mejores propiedades mecánicas, ya que para la selección se tomaron en cuenta más factores. En el caso de fabricar el producto con el material de mejores

características se vería afectada la estética del material y por otro lado aumentaría su costo.

- Se caracterizaron mecánicamente las probetas de materiales compuestos obtenidas a través de ensayos a tracción y flexión. Los datos recabados en los ensayos siguieron una distribución normal los cuales se presentan a continuación:

Tracción

- Al comparar las diferentes posiciones escogidas de la bomba del catalizador respecto al poliéster, se tuvo un aumento del esfuerzo máximo a tracción y rigidez en todas las configuraciones. El compuesto con la posición del dosificador de MEKP entre 2,0-2,5 y quince días de curado T.SG.15d.(2,0-2,5) presentó mayor resistencia a la tracción con un valor de 80,7 MPa, lo cual constituyó un incremento del 188,5% con respecto a la resina poliéster. En cuanto a la rigidez del mismo material T.SG.15d.(2,0-2,5), ofreció el mayor incremento, de 265,5% con respecto a la matriz.
- Al incorporar gelcoat al material, las propiedades resultantes fueron inferiores a la configuración que no posee gelcoat. Sin embargo, el material con ambas superficies recubiertas con gelcoat presentó un valor cercano al compuesto T.SG.15d.(2,0-2,5). Esto se debe a que al depositar gelcoat sobre el material compuesto que está en contacto con el medio, recubre las imperfecciones y poros que no son visibles, mejorando las características superficiales y mecánicas del material. Lo interesante de esta configuración es que recubre las dos superficies del material compuesto, de manera que se obtiene un sándwich, con lo que resulta un material simétrico.
- Al trabajar con el curado en estufa se apreciaron diferencias estadísticamente significativas únicamente para la temperatura de 45°C durante 24 y 36 horas., Se obtuvieron las mejores características con un curado de 24 horas a 45°C. Al comparar este material con del compuesto curado a temperatura ambiente

durante 15 días se observó un incremento en el esfuerzo máximo a tracción y su rigidez., sin embargo la utilización de energía es mayor.

- El material T.SG.45°C24h.(2,0-2,5) (sin gelcoat con curado de 24 horas a 45°C y con posición de MEKP de 2,0-2,5) es el que presentó las mejores propiedades a tracción con un valor de esfuerzo máximo de 125,7 MPa, con lo que se obtuvo un incremento del 349,4% y un módulo de elasticidad de 10692,3 MPa con un aumento del 671,1% con respecto a la resina poliéster.

Flexión

- Al comparar las diferentes posiciones escogidas de la bomba del catalizador respecto al poliéster, se tiene un aumento del esfuerzo máximo a flexión y rigidez en todas las configuraciones. El compuesto con la posición de la bomba del MEKP entre 2,0-2,5 y quince días de curado F.SG.15d.(2,0-2,5) fue el que presentó mayor resistencia a la flexión con un valor de 200 MPa, lo cual constituyó un incremento del 184,4% con respecto a la resina poliéster. Por otro lado, el material con una posición de bombeo de 1,5-2,0 y quince días de curado (FSG.15d.(1,5-2,0)) ofreció la mayor rigidez con 5584,4 MPa, esto representó un aumento del 162,3% con respecto a la matriz. Estos resultados se obtuvieron sin considerar todavía los efectos de los diferentes curados y la presencia de gelcoat en el material compuesto.
- Al incorporar gelcoat al material, las propiedades resultantes fueron inferiores a la configuración que no posee gelcoat. Sin embargo, el material con una superficie recubierta de gelcoat presentó un valor cercano al presentado por el material F.SG.15d.(2,0-2,5). Esto se debe a que al depositar gelcoat sobre las dos superficies del compuesto, el material posee menor cantidad de refuerzo y al momento de ensayar a flexión el lado que está siendo sometido a esfuerzos a tracción se deforma primero y reduce el esfuerzo máximo a flexión.

- Al trabajar con temperaturas de curado de 35°C y 45°C, se aprecian diferencias estadísticamente significativas para tiempos de 24 horas. Se definió trabajar con el curado de 24 horas durante 45°C, sin embargo la utilización de más recursos energéticos aumenta el costo del material. Por otro lado, al comparar este material con del compuesto curado a temperatura ambiente durante 15 días se tuvo una disminución en el esfuerzo máximo a flexión pero la rigidez aumentó en gran cantidad.
- El material F.SG.45°C24h.(2,0-2,5) (sin gelcoat con curado de 24 horas a 45°C y con posición de MEKP de 2,0-2,5) es el que presentó las mejores propiedades a flexión con un valor de esfuerzo máximo de 208,1 MPa, con lo que se obtuvo un incremento del 195,9% al compararlo con la matriz, y un módulo de elasticidad de 7606,6 MPa con un aumento del 257,3% respecto al poliéster. Por otro lado, la configuración F.SG.35°C24h.(2,0-2,5) ofreció la mayor rigidez con 8188,1 MPa, que representó un aumento del 284,6% con respecto a la matriz.

Impacto

- Se observó un incremento en la resistencia al impacto de todas las configuraciones de compuestos elaborados con respecto a la matriz, que presentó una energía de impacto relativamente baja (0,05 J).
- Se observó que el material curado a temperatura ambiente y el curado a 45°C durante 24 horas, ambos sin gelcoat, presentaron la mejor resistencia al impacto con valores de 0,12 J y 0,14 J respectivamente. Es importante notar que los compuestos con recubrimiento de gelcoat presentaron menor resistencia al impacto.
- También se observó que el material con la mejor resistencia al impacto citado en el proyecto de titulación “Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación” (Tamayo, 2012), presenta una resistencia al impacto que es muy similar a la de la mejor composición (Sin gelcoat, curado 24h-45°C), lo que

permite concluir que con fibras naturales se pueden alcanzar valores cercanos de resistencia al impacto en materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas como la de vidrio.

- Finalmente se puede concluir que los materiales obtenidos mediante moldeo por aspersión presentan una resistencia al impacto mucho menor que las reportadas en materiales híbridos (Tabla 3.12) las cuales pueden superar considerablemente a éstos materiales.

Evaluación de las propiedades del prototipo

- El prototipo construido superó la prueba funcional de aplicación de carga sobre el respaldo del mismo. La carga de falla se inició a aproximadamente 1347 N. Es importante mencionar que la falla no se produjo de modo que pudiese comprometer la vida del usuario.
- Se puede mejorar la resistencia del prototipo en el lugar donde se originó la falla adicionando mayor cantidad de refuerzo en esta zona, durante el proceso de moldeo.
- En cuanto a las pruebas de impacto se puede concluir que fueron satisfactorias, y se puede garantizar que el prototipo no fallará en esas condiciones.
- Finalmente se puede asegurar que el recubrimiento de gelcoat que se adicionó sobre la superficie del prototipo garantiza la resistencia contra la acción de agentes químicos corrosivos, lo cual es importante en determinadas aplicaciones.

5.2 RECOMENDACIONES

- Impulsar la obtención de aplicaciones de mayor tamaño como tinas para baño o jacuzzi, utilizando el proceso de aspersion dado a conocer en este estudio.
- Experimentar con diferentes tipos de refuerzo como por ejemplo refuerzos granulados¹⁰¹ o refuerzos de fibras naturales, ya que estas fibras se pueden adaptar al proceso y máquina de aspersion. Esto permitiría, obtener compuestos híbridos con mejores propiedades mecánicas, además de tener conocimiento de la incidencia de añadir otras fibras de manera aleatoria.
- Realizar prototipos que empleen fibra natural como la cabuya, que dispuesta de manera manual en la superficie que no está en contacto con el molde, incrementará las propiedades mecánicas del compuesto, especialmente la energía de falla al impacto y además se tendría una excelente apariencia en ambas superficies.
- Se podría obtener y caracterizar materiales compuestos con la mejor configuración desarrollada en el presente proyecto, pero con distintas matrices a fin de evaluar su desempeño y buscar más aplicaciones industriales.
- Se recomienda utilizar otros tipos de gelcoat de acuerdo a la pieza a realizar, ya que existe un gelcoat dependiendo las necesidades específicas.¹⁰² Podría sugerirse inclusive a futuro un estudio sobre la influencia de gelcoat en las propiedades mecánicas de un material compuesto.

¹⁰¹ POPE B, (2008), "*Spray deposition of cork reinforced polyester*", Estados Unidos; Master's of Science and Mechanical Engineering Degree, MIT.

¹⁰² http://www.thpolimeros.com/productos_gelcoat.html

BIBLIOGRAFÍA

- [1] NETO F.L., Compósitos Estructurais: Ciencia e Tecnologia, Sao Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- [2] ROSATO D., Reinforced Plastics Handbook, Oxford: Elsevier Science & Technology, 2004.
- [3] SANJAY K., Composites Manufacturing, Florida: CRC Press LLLC, 2002.
- [4] POLIQUIM, Resina Poliéster ANDERPOL 859, Bogotá, 2009.
- [5] POLIQUIM, GELCOAT ANDERPOL 889, Bogotá, 2010.
- [6] M. V. P. (MVP), Airless Equipment Safety Manual, Estados Unidos, 1999.
- [7] POLI C., Design for Manufacturing: A Structured Approach, Elsevier Science & Technology Books, 2001.
- [8] GUERRERO V.H, Y OTROS, Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales, Quito, 2011.
- [9] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/moldeo-por-spray-espreado-de-materiales.html>.
- [10] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/moldeo-por-spray-espreado-de-materiales.html>.
- [11] <http://www.compositesworld.com/articles/automating-swimming-pool-production..>
- [12] GOODMAN S., Handbook of thermoset plastics, Estados Unidos: Noyes Publications, 1998.
- [13] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/gelcoat.html>.
- [14] <http://www.nauticexpo.es/prod/es-manufacturing/rodillos-para-laminacion-de-material-compuesto-para-astillero-naval-39266-293328.html>.
- [15] BIRON M., Thermosets and composites: Technical information for plastics users, Oxford: Elsevier Ltd, 2004.
- [16] http://es.made-in-china.com/tag_search_product/Woven-Roving_nrrsy_1.html.
- [17] CORRADO P., Design for Manufacturing: A Structured Approach”, Elsevier

- Science & Technology Books, EE.UU., 2001.
- [18] CHAND F.M., Tribology of natural fiber composites, Inglaterra: Woodhead Publishing.
- [19] MAGNUM VENUS PRODUCTS., MVP Troubleshooting: Airless Equipment Safety Manual, EE.UU., 1999.
- [20] MAGNUM VENUS PRODUCTS., MVP Troubleshooting: Testing and Adjusting your MVP Pumping System, EE.UU., 1999.
- [21] NTE INEN 2002:95., Muebles de oficina. Métodos de ensayo para asientos, Ecuador, 2002.
- [22] PAEZ J., Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión", Ecuador; Proyecto de titulación EPN, Ecuador, 2007.
- [23] PAREDES J., Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en Guardachoques para Buses", Proyecto de titulación UTA, Ecuador;, 2012.
- [24] TAMAYO A., Obtención y Caracterización de Materiales Compuestos de Matriz Poliéster Reforzados con Fibra de Cabuya mediante Estratificación", Ecuador; Proyecto de titulación EPN., Ecuador, 2012.
- [25] VILLACÍS H., "Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación", Ecuador, Proyecto de titulación EPN, Ecuador, 2011.
- [26] WALLEBERGER B.P., Fiberglass and Glass Technology, EE.UU.: Springer Science Business Media, 2010.
- [27] ASTM D7264., Métodos de Ensayo Normalizados para propiedades a flexión en materiales compuestos de matriz polimérica, EE.UU., 2008.
- [28] NTE INEN 2585:2011, Muebles escolares. Pupitre con silla para alumnos. Requisitos e inspección, Ecuador, 2011.
- [29] ASTM D3039, Métodos de Ensayo Normalizados para propiedades a tracción en

materiales compuestos de matriz polimérica, EE.UU., 2008.

- [30] ASTM D3171, Métodos de Ensayos Normalizados para Determinación de Constituyentes de Materiales Compuestos, EE.UU., 2011.
- [31] ASTM D 7264, Métodos de Ensayo Normalizados de Resistencia al impacto de probetas rígidas plásticas planas mediante método de caída de dardo, EE.UU., 2010.

ANEXOS

ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ROVING DE FIBRA DE VIDRIO

ANEXO 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE RESINA POLIÉSTER EMPLEADA

ANEXO 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GELCOAT EMPLEADO

ANEXO 4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

ANEXO 5. PLANOS DEL PROTOTIPO

ANEXO 6. FÓRMULAS DE CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS

ANEXO 7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE VARIANZA (ANOVA)

ANEXO 8. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A IMPACTO

ANEXO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ROVING DE FIBRA DE VIDRIO EMPLEADO



OCV™ Reinforcements

PRODUCT INFORMATION

P246 E-Glass Multi-End Roving for Chopping

PRODUCT DESCRIPTION

P246 is a E-Glass multi-end roving manufactured from a collection of continuous glass filaments gathered, without mechanical twist, into a single bundle. The roving is then wound and shipped in a tubeless package ready for use in customer continuous operations.

P246 roving is medium solubility type. The basic strands are sized with a silane-coupling agent that provides excellent compatibility with the resin matrix.

PRODUCT REFERENCE

Example : EC 2400 P246
 E : glass type
 C : type of process: continuous
 2400 : nominal linear weight of roving (tex)
 P246 : OCV® Reinforcements code for sizing system



PRODUCT APPLICATION

P246 has been designed for applications where the rovings are chopped and especially for:

- the reinforcement of car headliners
- the reinforcement of plaster
- the manufacture of panels, complexes and felters
- the filament winding processes with choppable roving
- the Drostholm process (chop and drop)

FEATURES AND PRODUCT BENEFITS

- Excellent processing characteristics
- Easy wet-out and impregnation
- Easy unwinding and chopping
- Very good properties of moulded parts (no coloration, highly pigmentable, good mechanical properties)
- Good strands distribution
- No fuzz
- No static electricity

TECHNICAL CHARACTERISTICS (NOMINAL VALUES)

LINEAR WEIGHT (TEX)	LOSS ON IGNITION (%)	MOISTURE (%)
ISO 1889 : 1997	ISO 1887 : 1995	ISO 3344 : 1997
2400	0.70	< 0.20

Refer to the Standard Product Specification for more precise information on the characteristics of the product.

• VISUAL CHARACTERISTICS OR POSSIBLE DEFECTS

The cheeses should be cylindrical and the faces upright and plumb. The construction should be firm and uniform and the winding regular. Yellowing is in general very slight or zero, colour should be homogeneous throughout the batch and should not deteriorate with time. The cheeses should be free from all blemishes such as oil or grease stains, dust etc...

P246 E-Glass

Multi-End Roving for Chopping

PRODUCT AVAILABILITY

Cheeses for internal unwinding.

CHARACTERISTICS OF COMPLETE CHEESES			
Internal diameter (mm)	External diameter (mm)	Height (mm)	Approx. nominal weight (kg)
75	290	260	20

PACKAGING

- Each cheese is wrapped in a polyethylene stretched film opened on the top which should not be removed when it is used, and is identified by an individual label.
- Each pallet is contained within cardboard base, belt and lid. The assembly is held together by plastic straps and can be wrapped in a polyethylene film. Cardboard tubes or alternatively wood staffs reinforce the four corners.
- The standard packaging is made with cheeses packed individually, the Vetrocreele presentation is available on request (i.e. end of cheeses together for continuous unwinding, directly from the pallet).

CHEESES PER PALLET	LAYERS PER PALLET	CHEESES PER LAYER	PALLET DIMENSIONS L X W X H (CM)	APPROXIMATE NET WEIGHT (KG)
36	3	12	119x90x80	720
48	3	16	119x119x80	960
48	4	12	119x90x120	960
64	4	16	119x119x120	1280

Weights given hereafter are approximate values

LABELING

- Individual packaging identification: Each cheese has a self-adhesive label of identification, indicating the product reference and the production date.
- Pallet identification: Each pallet shall bear two labels of identification indicating the product reference, the pallet net and gross weights, the production date and the pallet production code.

STORAGE

P246 roving should be stored dry, in its original packaging. The best conditions are temperature between 15 and 35°C and at a relative humidity between 35 and 85%.

If the product is stored at low temperature (below 15°C) it is advisable to condition it in the workshop, for at least 24 hours before use, to prevent condensation.

Static stacking of the pallets is possible one plus one (1/1), but it is recommended to use a plywood plate between the two pallets in order not to damage the lower pallet.

This product must be used within 12 months of delivery.

Contact

MultiEndRovings.ocvamericas@owenscorning.com

MultiEndRovings.ocvemea@owenscorning.com

MultiEndRovings.ocvap@owenscorning.com



OCV Reinforcements

**OWENS CORNING
COMPOSITE MATERIALS, LLC**
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43659
1.800.GET.PINK™
www.owenscorning.com
www.ocvreinforcements.com

**EUROPEAN OWENS CORNING
FIBERGLAS, SPRL.**
166, CHAUSÉE DE LA HULPE
B-1170 BRUSSELS
BELGIUM
+32.2.674.82.11

**OWENS CORNING - OCV ASIA PACIFIC
SHANGHAI REGIONAL HEADQUARTERS**
2F OLIVE LVO MANSION
620 HUA SHAN ROAD
SHANGHAI 200040
CHINA
+86.21.62489922

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this publication shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law safety code or insurance regulation.

Pub. No. 10010169-A. Owens Corning reserves the right to modify this document without prior notice. ©2009 Owens Corning.
MultiEndRov_P246 E-Glass_emea_10-2008_Rev1

ANEXO 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE RESINA POLIÉSTER
ANDERPOL 859



Literatura Técnica

Anderpol 859

Nº revisión: 2
Fecha de elaboración: 17/01/03
Fecha de entrega: 21/09/09

ANDERPOL 859

GENERALIDADES

ANDERPOL 859 es una resina poliéster ortoftálica muy versátil, para aplicaciones de propósito general.

CARACTERISTICAS

ANDERPOL 859 es apropiada para la laminación manual, o moldeo a máquina, y para la aplicación de sistemas cargados y encapsulados. Los laminados obtenidos tienen alta resistencia mecánica.

La resina se suministra al 70% en sólidos y puede ser modificada por el usuario con adiciones de estireno, según su aplicación particular.

1. Formulación

La fórmula general recomendada para el curado en frío es la siguiente:

Materiales	Partes por peso
ANDERPOL 859	100
Estireno	(1)
Octoato de cobalto (6% Co)	0.2 a 0.5
MEK-peróxido (9% Ox. activo)	1 a 2,5

(1) La cantidad exacta depende de la viscosidad final deseada según cada aplicación, sin embargo no se

recomienda que sea mayor de 30 partes.

Cuidado!

El octoato de cobalto y el MEK peróxido nunca se deben mezclar directamente, fuera de la resina, porque pueden reaccionar con violencia explosiva.

2. Curado

El tiempo de gel lo controla principalmente la cantidad de octoato de cobalto, el aplicador deberá hacer sus propios ensayos según sus necesidades, de acuerdo al numeral 1. Formulación, y al anexo N° 1.

La cantidad de Peróxido se puede variar para corregir fluctuaciones de temperatura de trabajo. El curado nunca se debe realizar a temperaturas inferiores a 15°C porque no se alcanzan buenas propiedades mecánicas, de resistencia química ni a la intemperie.

3. Aditivos especiales:

Al ANDERPOL 859 se le puede agregar alguno de nuestros "pre-geles" para conferirle tixotropía y evitar así el chorreo en laminados verticales. El empleo de estos

pregeles debe ser consultado directamente con **andercol s.a.**

MANEJO Y ALMACENAMIENTO

La información detallada para el manejo seguro de este material se encuentra en la Hoja de Seguridad de Materiales de esta referencia.

El **ANDERPOL 859** está clasificado como "líquido inflamable según norma Icontec 1962 (división 3.3), por tener un punto de inflamación de 31°C (crisol cerrado) y por tanto debe mantenerse alejado de llamas abiertas. Se recomienda almacenarlo a temperaturas inferiores a 20°C para obtener la máxima estabilidad.

Se suministra en tambores metálicos de 230 kilos.

El **ANDERPOL 859** tiene un tiempo de vida equivalente a seis meses desde el momento de su fabricación.

ASISTENCIA TÉCNICA

La parte primordial de cada producto de **andercol s.a.** es el soporte técnico que garantizamos a nuestro cliente.

Cada despacho de nuestros productos está respaldado por un laboratorio de servicio técnico con personal altamente calificado, el cual, con un conocimiento completo de los procesos, trabaja con una gran variedad de equipos de laboratorio y planta piloto para proveer los datos necesarios y obtener así el mejor comportamiento de nuestros productos. Este laboratorio además de servir de soporte a las aplicaciones existentes está encargado de desarrollar nuevos usos para los productos fabricados por **andercol s.a.** El usuario de nuestros productos será siempre el beneficiario de esta constante búsqueda de mejores métodos y tecnologías.

Medellín, 14 de mayo de 2001

ESPECIFICACIONES CRISTALAN 859

Características	Valor	Método andercol N°
Apariencia	Verdosa transparente	IT-1.01
Color Apha	100 máximo	IT-1.03
Valor ácido	42 máximo	IT-1.14
Viscosidad Brookfield (cps), 25°C (Aguja 3, 10 r.p.m.)	1500 - 2500	IT-1.06
% Sólidos	68 - 72	IT-1.11
Tiempo de gel a 25°C, min. *	7 - 10	IT -3.04
Reactividad		
Temperatura de exotermía, °C	130 - 145	IT-3.04
Tiempo de exotermía, min.	15 - 25	IT-3.04

* Tiempo de gel:
100 gramos de ANDERPOL 859.
0.5 ml. de octoato de cobalto al 6%
1.0 ml. de MEK-peróxido

andercol s.a. se reserva el derecho de modificar esta literatura técnica sin previo aviso.

La información y recomendaciones que aparecen en esta publicación son, a nuestro entender enteramente confiables. Las sugerencias ofrecidas

para usos o aplicaciones son solamente la opinión de **andercol s.a.** Los consumidores deberán hacer sus propias pruebas para determinar el comportamiento de estos productos en sus objetivos específicos.

andercol s.a. no da garantías de tipo alguno exceptuando las que se ajustan a las especificaciones estándar del producto.

Tiempos de gel del ANDERPOL 859 a 25°C con diferentes cantidades de MEK-peróxido (9% Ox. activo) y octoato de cobalto (6% de Co).

% MEK-p	Tiempos de Gel (minutos)		
	0.2% Co	0.3% Co	0.5% Co
1.0	10	8	13
1.5	7	5	9

Tiempos de gel del ANDERPOL 859 con 1% de MEK-peróxido (9% Ox. activo) y octoato de cobalto (6% Co).

Temperatura (°C)	Tiempos de Gel (minutos)		
	0.2% Co	0.3% Co	0.5% Co
15	33	23	16
25	15	10	8
35	7	5	4

Propiedades típicas del ANDERPOL 859 curado (sin reforzar).

Dureza barcol (modelo GYZJ - 934-1)	40
Absorción de agua	16 mg
Elongación en la ruptura	4,5%
Resistencia a la tensión	48 MPa
Gravedad específica, 25°C	1,14

Propiedades típicas de un laminado de ANDERPOL 859 con Tela Mat (1) y con diferentes cantidades de estireno.

Propiedades	Contenido de Estireno	
	5%	10%
Contenido de vidrio %	30	30
Resistencia a la tensión, Mpa.	91	81
Elongación en ruptura, %	3.8	3.0
Resistencia a la flexión	197	175
Elongación en ruptura	3.3	3.2

(1) Con 2 capas de mat de 450 g/m².

ANEXO 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GELCOAT ANDERPOL
889 EMPLEADO



Literatura Técnica

Anderpol 889

Nº revisión:	8
Fecha de elaboración:	17/01/03
Fecha de entrega:	14/07/10

ANDERPOL 889

GENERALIDADES

El **ANDERPOL 889** es un gel coat isoftálico con neopentil glicol (ISO-NPG) no pigmentado especialmente diseñado para la aplicación por aspersión. Lleva en su formulación absorbedor ultravioleta para garantizar una mayor resistencia a la degradación causada por la luz.

Se fabrica bajo licencia y asesoría de Scott Bader Limited (Inglaterra).

CARACTERÍSTICAS

El **ANDERPOL 889** se caracteriza por su buena resistencia al impacto y propiedades mecánicas cuando está completamente curado. Posee una muy buena resistencia al agua y productos químicos.

El **ANDERPOL 889** está especialmente diseñado para la aplicación por equipos de aspersión, no siendo recomendado para pistolas que tengan alimentación por gravedad.

ANDERPOL 889 cuando se aplica apropiadamente, este gel coat, da buen cubrimiento y debido a su tixotropía controlada, no chorrea en superficies verticales o inclinadas.

1. Formulación

Para curado a temperatura ambiente se recomienda la siguiente fórmula general:

Materiales	Partes por peso
ANDERPOL 889	100
MEK peróxido (9% Ox. activo)	1 - 3

Obsérvese que el gel coat solo requiere la adición de catalizador (peróxido) para iniciar el curado, puesto que viene preacelerado.

2. Curado

La temperatura ambiente y la cantidad de catalizador controlan el tiempo de gel del **ANDERPOL 889**. El curado nunca se debe realizar a temperaturas inferiores a 15°C porque no alcanzan las óptimas propiedades de la película.

3. Pigmentación

Hay que ser cuidadoso en la selección de las pastas pigmento y es aconsejable chequear las mezclas de ellas antes de su uso en gran escala, para observar la estabilidad del color en el tiempo o si se presentan separación de pigmentos o aparición de vetas coloreadas en el gel coat. Los fenómenos antes mencionados posiblemente no se observen tan pronto la mezcla se haya efectuado, pero pueden aparecer al poco tiempo de estar el

producto almacenado. Esto en razón de la naturaleza química de las resinas isoftálicas con neopentil glicol (ISO-NPG).

Generalmente no se observan problemas cuando se utiliza una pasta pigmento **CRISTACOLOR**, pero cualquier comportamiento anormal debe analizarse y consultarse con el personal técnico de **andercol s.a.**

4. Aplicación

Antes de comenzar la aspersión, la pistola y las líneas deben examinarse para asegurar que no tienen materiales que obstruyan el flujo continuo del gel coat y/o catalizador. El equipo debe ser chequeado para garantizar que está operando a la presión de aire recomendada. La correcta presión del aire es importante porque no sólo asegura que la película depositada esté tan libre de aire atrapado como sea posible sino que ayuda a evitar la separación de pigmento en los gel coats pigmentados.

La pistola debe moverse durante la aplicación manteniéndose en ángulo recto a la superficie y a una distancia entre 40 y 60 cm del molde.

Es probable observar una cierta cantidad de "piel de naranja" en la superficie posterior del gel coat aún si el gel coat fue aplicado apropiadamente; sin embargo si este efecto es demasiado pronunciado puede indicar que la atomización es

incorrecta o que la pistola se ha mantenido demasiado cerca al molde.

El espesor de película húmeda recomendada es de 0.4 ó 0.5 mm (0.016 a 0.020 pulg.), ya que espesores mayores a 0.5mm (0.020 pulg) generan porosidad en la película (para controlar el espesor utilice el medidor de película húmeda que **andercol s.a.** le ha suministrado).

CAMPOS DE APLICACIÓN

El **andercol s.a.** tiene alta resistencia al impacto, al agua y a muchos agentes químicos moderados.

Es apropiado para emplearse en aquellos sistemas que estén en contacto con agua como bañeras, tinas de hidromasajes, jacuzzis, botes, piscinas, etc.

También se recomienda para piezas que han de soportar las inclemencias del tiempo o ambientes químicos moderados.

Cuando las piezas van a ser utilizadas en ambientes marinos, en contacto continuo con sistemas acuosos o ambientes químicos moderados, se debe utilizar en la laminación una resina isoftálica o isoftálica NPG para tener un bajo riesgo de formación de ampollas y lograr mejor resistencia química.

MANEJO Y ALMACENAMIENTO

La información detallada para el manejo de seguro de este material se encuentra en la respectiva Hoja de Seguridad de Materiales.

El **ANDERPOL 889** está clasificado como "líquido inflamable" según norma Icontec 1692 (división 3.3), por tener un punto de inflamación de 31°C (crisol cerrado) y por tanto debe mantenerse alejado de llamas abiertas.

Se recomienda almacenarlo a temperaturas inferiores a 20°C para obtener la máxima estabilidad.

Se suministra tambores de 60 kilos.

El **ANDERPOL 889** tiene un tiempo de vida equivalente a seis meses desde el momento de su fabricación.

ASISTENCIA TÉCNICA

La parte primordial de cada producto de **andercol s.a.** es el soporte técnico que garantizamos a nuestro cliente.

Cada despacho de nuestros productos está respaldado por un laboratorio de servicio técnico con personal altamente calificado, el cual, con un conocimiento completo de los procesos, trabaja con una gran variedad de equipos de laboratorio y planta piloto para proveer los datos necesarios y obtener así el mejor comportamiento de nuestros productos. Este laboratorio además de servir de soporte a las aplicaciones existentes está encargado de desarrollar nuevos usos para los productos fabricados por **andercol s.a.**

El usuario de nuestros productos será siempre el beneficiario de esta constante búsqueda de mejores métodos y tecnologías.

Medellín, 19 de marzo de 2002

Características	Valor	Método andercol N°
Apariencia	Rosada turbia	IT-1.01
Viscosidad Brookfield, cps, 25°C		IT-1.06
Aguja 3, 2 r.p.m., 5 minutos	12500 -14500	
Aguja 3, 20 r.p.m., 10 minutos	2000 - 2600	
Aguja 3, 2 r.p.m., 5 minutos	11400 - 13400	
% Sólidos	50 - 52	IT-1.11
Tiempo de gel, 25°C (minutos) *	12 - 16	IT-3.04
Temperatura de exotermia, °C	175 - 195	IT-3.04
Tiempo de exotermia, minutos	25 - 35	IT-3.04
Molienda	6 mínimo	IT-3.01

* Tiempo de gel:
100 gr. de ANDERPOL 889.
2 ml de MEK peróxido

**andercol s.a. se reserva el
derecho de modificar esta literatura
técnica sin previo aviso.**

La información y recomendaciones
que aparecen en esta publicación
son, a nuestro entender enteramente
confiables. Las sugerencias

ofrecidas para usos o aplicaciones
son solamente la opinión **andercol**
s.a. Los consumidores deberán
hacer sus propias pruebas para
determinar el comportamiento de
estos productos en sus objetivos
específicos.

andercol s.a. no da garantías de
tipo alguno exceptuando las que se
ajustan a las especificaciones
estándar del producto.

Algunas propiedades típicas del ANDERPOL 889 (1)

Dureza Barcol (modelo GYZS 934-1)	35
Absorción de agua, (24 horas a 25°C)	0.13%

(1) Vaciado de gel coat con 2% MEK-p.

ANEXO 4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

Nota: En el archivo digital (CD) adjunto al presente escrito, se encuentra un video explicativo sobre el funcionamiento de la máquina de aspersión MVP, así como el proceso de fabricación del prototipo. También, se incluye un manual de operación y mantenimiento del equipo empleado.

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
1	Preparación del área de trabajo	<p>Se realiza la limpieza del área de trabajo.</p> <p>Se ubican de un modo fácilmente accesible todos los materiales y reactivos a utilizarse.</p> <p>Se inicia el arranque del sistema de aire comprimido, para que el tanque de almacenamiento se cargue.</p>	 <p>The 'Imagen' column contains three photographs. The top photo shows a spray machine with blue hoses and a blue tank in a workshop. The middle photo shows a compressed air system with a large blue tank and a smaller white tank. The bottom photo shows several chemical containers on a table, including a white jug labeled 'THINNER', a white jug labeled 'ESTIRENO', a small bottle labeled 'OCTOATO DE COBALTO', and a yellow container labeled 'CERA DESMOLDANTE'.</p>

2	Preparación de la máquina de moldeo por aspersión	<p>Se realiza una inspección inicial de válvulas y manómetros, manguera de succión, dispositivo dosificador de MEKP.</p> <p>Se verifica que las boquillas de las pistolas de aplicación de resina y gelcoat se encuentren limpias, de lo contrario se procede a su limpieza.</p>	
3	Preparación de resina y fibra de vidrio	<p>Se mezcla los constituyentes de la matriz del material compuesto, es decir: resina poliéster insaturada, estireno y octoato en las proporciones determinadas previamente.</p>	
4	Preparación de molde y fibra	<p>Se limpia el molde y se aplica la cera desmoldante.</p> <p>Se pule el molde.</p> <p>Se coloca el molde en el lugar donde se iniciará el proceso.</p>	

5	Aplicación de capa de gelcoat con pigmento	<p>Con el equipo de aspersión de gelcoat se aplica una capa inicial de gelcoat sobre la superficie descubierta del molde previamente preparada.</p> <p>Se espera un tiempo prudencial de 15 a 20 min, luego de lo cual se inicia el moldeo.</p>	
6	Aplicación de fibra y resina	<p>Con la máquina de moldeo por aspersión se procede aplicar capas sucesivas de fibra y resina.</p> <p>Con la ayuda de rodillos se realiza la distribución uniforme de material sobre toda la superficie del molde, procurando eliminar la mayor cantidad de burbujas atrapada.</p> <p>Con la ayuda de una brocha se distribuye el material en zonas donde sea difícil la laminación con el rodillo.</p>	  

7	Colocación de placa de sujeción	<p>Se coloca con cuidado la placa de succión en la parte inferior del asiento.</p> <p>Luego de la colocación de la placa de sujeción, se procede a la aplicación de refuerzo y resina sobre la placa a fin de adherirla permanentemente al asiento.</p> <p>Finalizada la colocación de resina y refuerzo sobre la placa, se la sujeta con una cuerda para evitar desplazamientos no requeridos durante el proceso de curado.</p>	 
8	Recorte de excedentes	<p>Con una herramienta adecuada se procede al recorte de excedentes innecesarios, que posteriormente podrían dificultar el proceso de desmoldeo.</p>	
9	Curado	<p>Transcurridas 24 horas el prototipo se encuentra totalmente sólido.</p>	

10	Desmoldeo	<p>Una vez que el producto se encuentra en estado sólido (resina curada), se procede a realizar el desmoldeo de la pieza con la ayuda de una espátula.</p>	
11	Corte de bordes	<p>Con una caladora eléctrica se cortan los bordes sobresalientes del asiento.</p>	 
12	Pulido de la pieza	<p>Con una lijadora se pulen las aristas agudas y superficies sobresalientes del prototipo.</p>	

13	Inspección visual	Se observa el producto a fin de detectar alguna falla o imperfección	
14	Colocación y aseguramiento	Terminado el asiento se coloca éste en la estructura correspondiente. Se ajustan los pernos para fijar el asiento en su posición definitiva.	
15	Verificación y prueba	Se verifica que el asiento se encuentre totalmente rígido en la estructura.	
16	Producto final terminado		

No.	Actividad	Operación				Tiempo	Notas
		Operación	Transporte	Inspección	Almacenamiento		
1	Preparación del área de trabajo	○	□	▽	5 min		
2	Preparación de la máquina de aspersión	○	□	▽	34 min		
3	Preparación de materiales requeridos	○	□	▽	32 min		
4	Aplicación de gelcoat	○	□	▽	4 min		
5	Aplicación de fibra de vidrio y resina y placa de soporte	○	□	▽	21 min		
6	Recorte de excedentes	○	□	▽	3 min		
7	Curado	○	□	▽	24 h		
8	Desmoldeo	○	□	▽	5 min		
9	Recorte de excedentes	○	□	▽	10 min		
10	Pulido	○	□	▽	15 min		
11	Inspección visual de acabados	○	□	▽	1min		
12	Colocación y aseguramiento en estructura metálica	○	□	▽	5 min		
13	Verificación y pruebas	○	□	▽	30 min		
14	Almacenamiento del producto	○	□	▽			

Diagrama de procesos de elaboración del prototipo.

ANEXO 5. PLANOS DEL PROTOTIPO



ANEXO 6. FÓRMULAS DE CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS

CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN

Los ensayos a tracción fueron realizados según la norma ASTM D 3039-08 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”. Se obtuvieron los datos de carga y deformación. A continuación se explica el procedimiento para obtener los valores de resistencia, deformación y módulo de elasticidad de acuerdo la norma mencionada.

- **Resistencia máxima a tracción**

La resistencia última a la tracción se determina mediante:

$$\sigma_u = \frac{F_{max}}{A}$$

Donde:

σ_u = esfuerzo último a tracción, MPa

F_{max} = fuerza máxima antes de la ruptura, N

A = área transversal promedio, mm².

- **Deformación**

La deformación es determinada con el uso del extensómetro, el cual en este caso tiene una separación inicial de 50 mm. Para el cálculo se utiliza la ecuación siguiente:

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_0}$$

Donde:

ε_i = deformación en el punto i

δ_i = desplazamiento del extensómetro en el punto i, mm

L_0 = longitud inicial del extensómetro, mm.

- **Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad se obtiene mediante los valores de esfuerzo y deformación en la parte recta de la curva con la ecuación mostrada.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad, GPa

$\Delta\sigma$ = diferencia de esfuerzo aplicado entre dos puntos de deformación, MPa

$\Delta\varepsilon$ = diferencia de deformación entre dos puntos.

CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS A FLEXIÓN

Los ensayos a tracción fueron realizados según la norma ASTM D 7204-07 "Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials". Se obtuvieron los datos de carga y deformación. A continuación se explica el procedimiento para obtener los valores de resistencia, deformación y módulo de elasticidad de acuerdo la norma mencionada.

- **Resistencia máxima a flexión**

La resistencia máxima a flexión se determina mediante el método de viga simplemente apoyada en dos puntos y cargada en el centro de acuerdo a la ecuación:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Donde:

σ = esfuerzo en la superficie externa en la mitad del tramo, MPa

P = carga aplicada, N

L = distancia entre apoyos, mm

b = ancho de viga, mm

h = espesor de viga, mm.

- **Deformación**

La deformación para el método de viga simplemente apoyada en dos puntos y carga central se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2}$$

Donde:

ε = deformación de la superficie externa, mm/mm

δ = deflexión en el centro de viga, mm

h = espesor de viga, mm

L = distancia entre apoyos, mm.

- **Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad se obtiene mediante los valores de esfuerzo y deformación en la parte recta de la curva con la ecuación mostrada.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad (GPa)

$\Delta\sigma$ = diferencia de esfuerzo aplicado entre dos puntos de deformación (MPa)

$\Delta\varepsilon$ = diferencia de deformación entre dos puntos.

ANEXO 7. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE STATGRAPHICS VERSIÓN 15.02.06

MÉTODO DE ANÁLISIS COMPARATIVO ANOVA

Para llevar a cabo el análisis comparativo de la generación de datos de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos ensayados, se utilizó el procedimiento estadístico de análisis de varianza (ANOVA), con la ayuda de Excel 2010, y Statgraphics versión Centurion XV. Para el desarrollo del análisis fue necesario definir el nivel de confianza a considerarse, el mismo que se definió en 95 %, debido a que los parámetros en el moldeo por aspersión fueron difíciles de controlar y a los defectos en la uniformidad de distribución que se presentan en las fibras del material compuesto.

Para poder utilizar el método ANOVA de comparación de datos se deben cumplir las tres hipótesis en las que se basa este análisis:

- Para cada población, la variable de respuesta está normalmente distribuida.
- La varianza de la variable de respuesta, representada por σ^2 , es la misma para todas las poblaciones.
- Las observaciones deben ser independientes.

El objetivo del ANOVA es comprobar la hipótesis nula, la cual afirma las hipótesis mencionadas anteriormente y aquella donde se afirma que las medias de los tratamientos son iguales. Si se rechaza la hipótesis nula significa que todas las medias poblacionales son distintas o que al menos dos medias poblacionales tienen distintos valores. Para afirmar o rechazar la hipótesis nula el ANOVA efectúa la prueba F que consiste en la relación entre el estimado de la varianza poblacional entre tratamientos y el estimado de la varianza poblacional dentro de tratamientos (MSRT/MSE). El valor de F que provoque el rechazo de la hipótesis nula depende de un valor crítico, el mismo que viene dado por el nivel de significancia. Este nivel de

significancia depende a su vez del nivel de confianza del estudio definido anteriormente del 95%.

Para el caso en el cual la hipótesis nula es rechazada, difícilmente se conoce cuales valores son estadísticamente diferentes. Por lo tanto, en esta situación se recurrió al procedimiento de las diferencias menos significativas (LSD: least – significant difference) de Fisher para determinar donde se encontraban las diferencias.

El valor de LSD se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$LSD = t_{\alpha/2} \sqrt{MSE \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}$$

Donde:

$t_{\alpha/2}$: Valor de T en la distribución de t de Student, para un nivel de significancia $t_{\alpha/2}$ y grados de libertad $(n_T - k)$,

n_T : corresponde al número total de observaciones de los k tratamientos efectuados

MSE: varianza poblacional dentro de tratamientos

n_i : número de observaciones del tratamiento i

n_j : número de observaciones del tratamiento j.

Si el valor absoluto entre la diferencia de las dos medias estudiadas es mayor al LSD, se dice que las medias son estadísticamente diferentes. Así se procedió a analizar el gráfico de cajas y bigotes de las muestras.

A continuación se presentan las gráficas de medias, de cajas y bigotes para los diferentes resultados obtenidos en los ensayos realizados dentro del presente proyecto.

ENSAYO DE TRACCIÓN

En las figuras siguientes se presentan los diagramas de medias de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y deformación de los ensayos realizados a tracción para las diferentes configuraciones realizadas. Inicialmente se comparan las diferentes posiciones de bombeo de MEKP. Luego se comparan los efectos de incorporar gelcoat al material compuesto en una superficie y posteriormente en las dos superficies del material compuesto. Finalmente, se probó con diferentes curados al material que presentaba excelentes características.

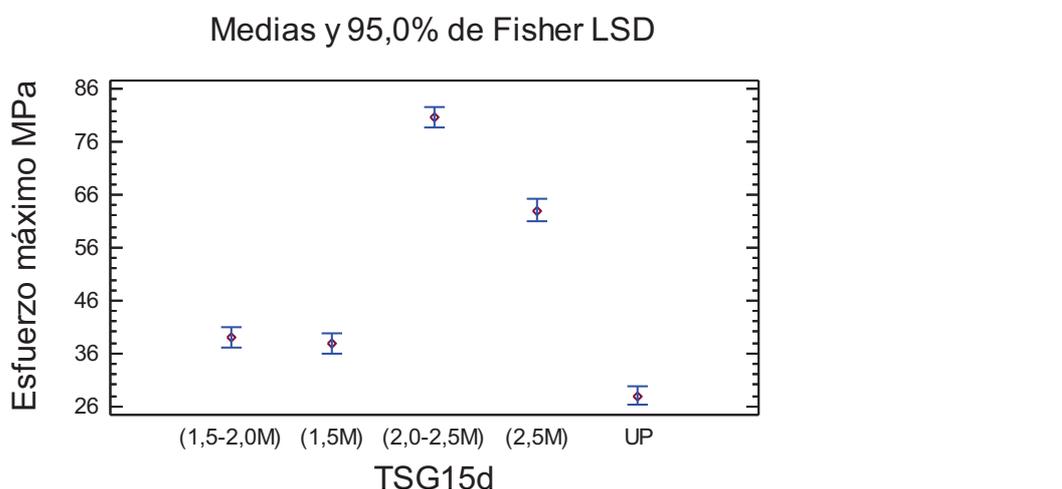


Figura A6.1. Esfuerzo máximo a tracción de configuraciones con diferente posición de bombeo de MEKP.

El análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de todas las configuraciones excepto entre T.SG.15d.(1,5M) y T.SG.15d.(1,5-2,0M) como se puede observar en la Figura A6.1. También se puede observar que todas las configuraciones de moldeo por aspersión con refuerzo de vidrio tienen un incremento de esfuerzo máximo con respecto a la resina poliéster siendo la de más alto valor la configuración T.SG.15d.(2,0-2,5M).

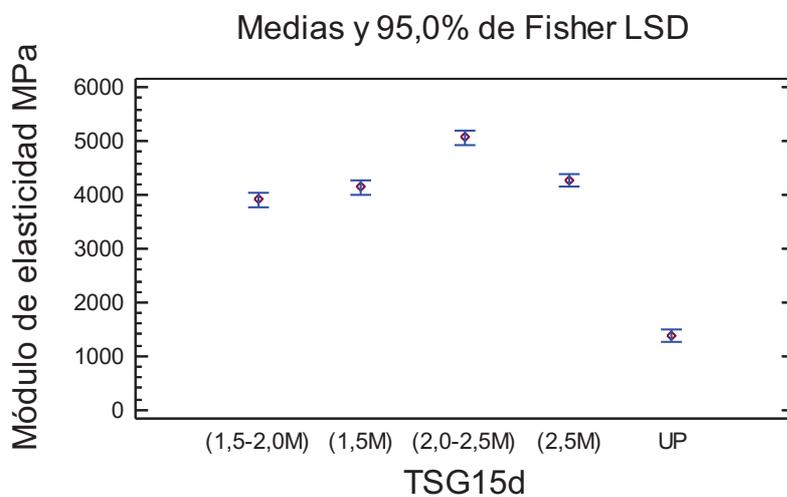


Figura A6.2. Módulo de elasticidad a tracción de configuraciones con diferente posición de bombeo de MEKP.

En la Figura A6.2 el análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a tracción de casi todas las configuraciones excepto entre T.SG.15d.(1,5M) y T.SG.15d.(1,5-2,0M); T.SG.15d.(1,5M) y T.SG.15d.(2,5M). También se puede observar que todas las configuraciones de moldeo por aspersion con refuerzo de fibra de vidrio tienen un incremento del módulo de elasticidad con respecto a la resina poliéster, siendo la demayor valor la configuración T.SG.15d.(2,0-2,5M).

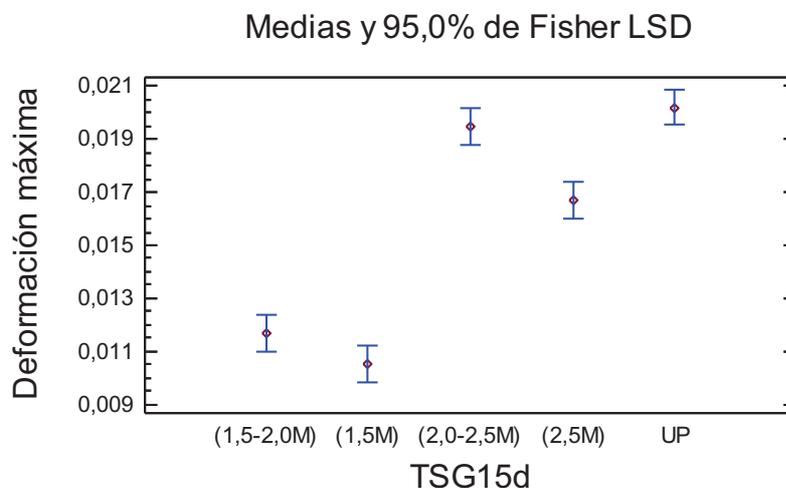


Figura A6.3. Deformación máxima a tracción de configuraciones con diferente posición de bombeo de MEKP.

En la Figura A6.3 el análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de casi todas las configuraciones excepto entre T.SG.15d.(1,5M) y T.SG.15d.(1,5-2,0M); resina poliéster (UP) y T.SG.15d.(2,0-2,5M). También se puede observar que todas las configuraciones presentan una menor deformación con respecto a la resina poliéster excepto la configuración T.SG.15d.(2,0-2,5M).

En busca de obtener un material con un mejor acabado y estudiar las características o defectos del compuesto, se agregó gelcoat en una superficie del material y luego en las dos superficies, una que está en contacto con el molde y la segunda que se encuentra en contacto con el medio ambiente.

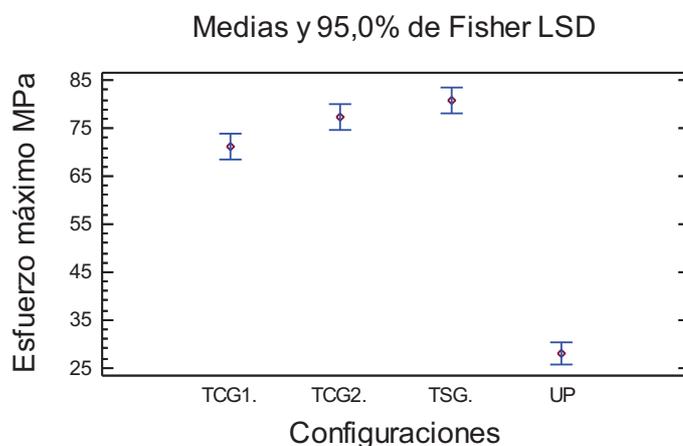


Figura A6.4. Esfuerzo máximo a tracción de las configuraciones F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M) y resina poliéster (UP).

El análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de casi todas las configuraciones excepto entre T.SG.15d.(2,0-2,5M) y T.CG2.15d.(2,0-2,5M) como se puede observar en Figura A6.4 También se puede observar que el esfuerzo máximo a tracción de las tres configuraciones posee un valor superior a la resina poliéster (UP).

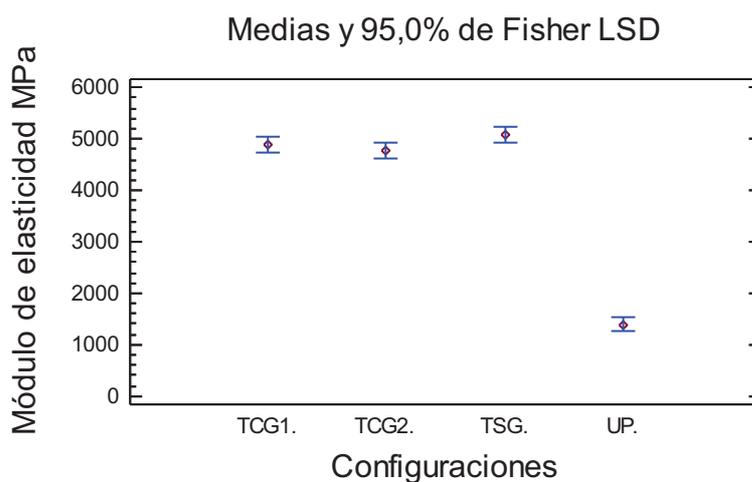


Figura A6.5. Módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M) y resina poliéster (UP).

En la Figura A6.5 el análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a tracción de las tres configuraciones. También se puede observar que el módulo de elasticidad a tracción de la probeta de resina poliéster es mucho menor que las configuraciones señaladas.

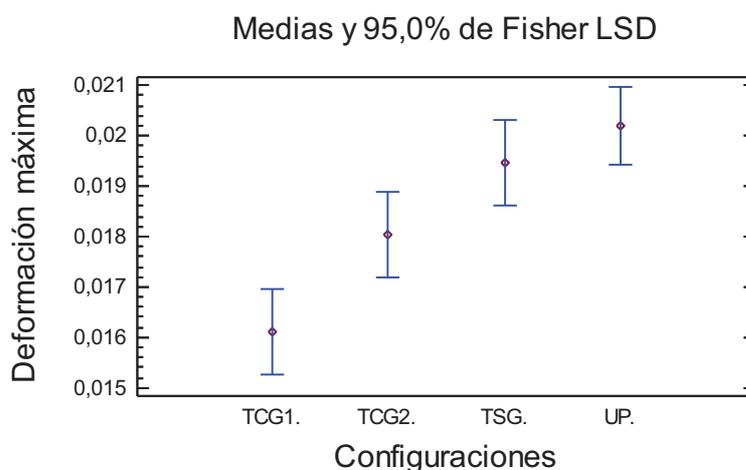


Figura A6.6. Deformación máxima a tracción de las configuraciones F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M) y resina poliéster (UP).

En la Figura A6.6 el análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima a tracción de las configuraciones T.SG.15d.(2,0-2,5M) y T.CG2.15d.(2,0-2,5M); T.SG.15d.(2,0-2,5M) y la resina poliéster. También se puede observar que la deformación máxima a tracción de la probeta T.CG2.15d.(2,0-2,5M) posee un valor intermedio entre las configuraciones SG Y CG1.

En busca de reducir el tiempo de fabricación y sabiendo que el material para que desarrolle por completo sus propiedades mecánica y químicas necesita un tiempo de curado de 15 días, se estableció la posibilidad de reducir este tiempo mediante el uso de una estufa. Por este criterio se definió la opción de realizar el curado a temperatura controlada mediante la estufa. Además, para un mejor análisis y estudio se planteó

una temperatura a 35°C y otra a 45°C, cada una de ellas se experimentó a 12,24 y 36 horas.

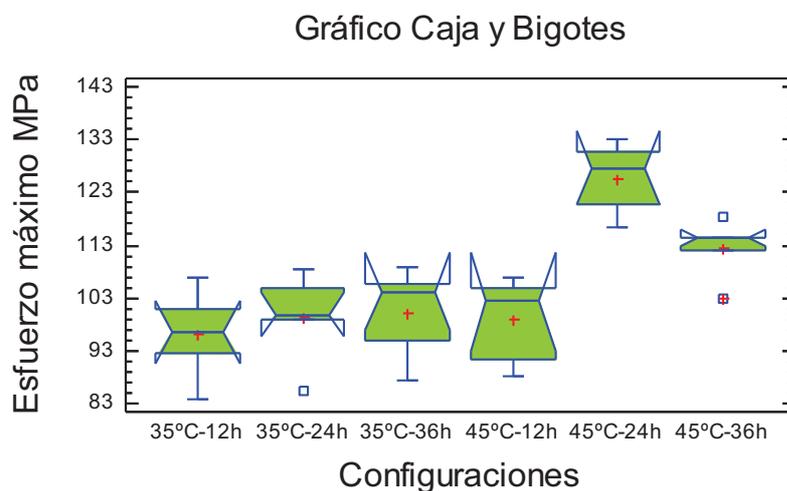


Figura A6.7. Esfuerzo máximo a tracción de las configuraciones de curado a 35°C y 45°C durante 12,24 y 36 horas.

El análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo a tracción de las cuatro primeras configuraciones: T.SG.35°C12h.(2,0-2,5M), T.SG.35°C24h.(2,0-2,5M), T.SG.35°C36h.(2,0-2,5M) y T.SG.45°C12h.(2,0-2,5M) pero si existe diferencia estadísticamente significativa de las dos configuraciones restantes T.SG.45°C24h.(2,0-2,5M) y T.SG.45°C36h.(2,0-2,5M) con respecto al resto de configuraciones como se observa en Figura A6.7. También se puede observar que el esfuerzo máximo a tracción de la probeta T.SG.45°C24h.(2,0-2,5M) posee el valor más alto de todas las configuraciones.

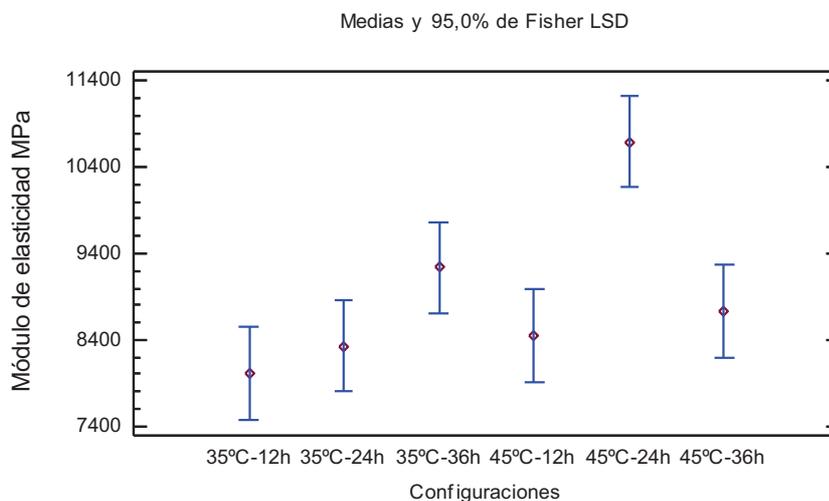


Figura A6.8. Módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones de curado a 35°C y 45°C durante 12,24 y 36 horas.

En la Figura A6.8 el análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a tracción de la mayoría de configuraciones a excepción de la configuración T.SG.45°C24h.(2,0-2,5M) donde se diferencia del resto de materiales al igual que las configuraciones T.SG.35°C12h.(2,0-2,5M) y T.SG.35°C36h.(2,0-2,5M) donde se observan una diferencia estadísticamente significativa entre ellas.

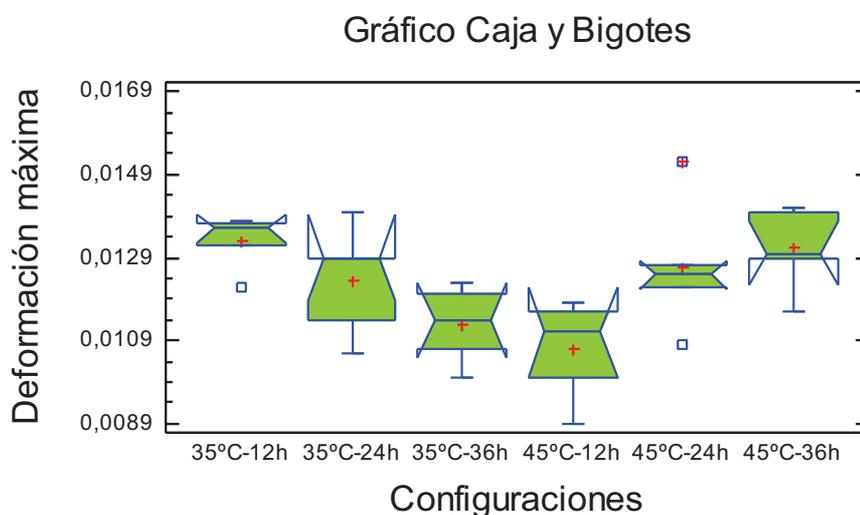


Figura A6.9. Deformación máxima a tracción de las configuraciones de curado a 35°C y 45°C durante 12,24 y 36 horas.

El análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de casi todas las configuraciones excepto entre T.SG.35°C12h(2,0-2,5M) y T.SG.35°C36h(2,0-2,5M); T.SG.35°C12h(2,0-2,5M) y T.SG.45°C12h(2,0-2,5M); T.SG.35°C24h(2,0-2,5M) y T.SG.45°C12h(2,0-2,5M); T.SG.35°C36h(2,0-2,5M) y T.SG.45°C36h(2,0-2,5M); T.SG.45°C12h(2,0-2,5M) y T.SG.45°C24h(2,0-2,5M) y finalmente entre T.SG.45°C12h(2,0-2,5M) y T.SG.45°C36h(2,0-2,5M) como se observa en la Figura A6.9.

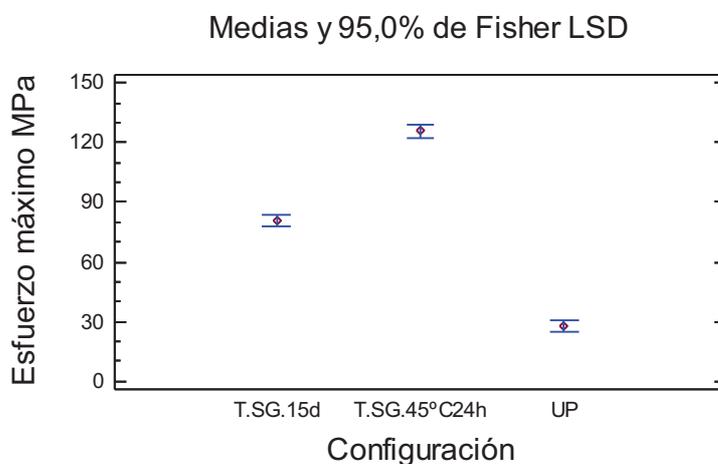


Figura A6.10. Esfuerzo máximo a tracción de las configuraciones F.SG.15d(2,0-2,5M), F.SG.45°C24h(2,0-2,5M) y resina poliéster (UP).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de las tres configuraciones como se puede observar en la Figura A6.10. Además se puede apreciar que existe un gran incremento del esfuerzo máximo a tracción con respecto a la matriz de poliéster de ambas configuraciones T.SG.15d(2,0-2,5M) y T.SG.45°C24h(2,0-2,5M)

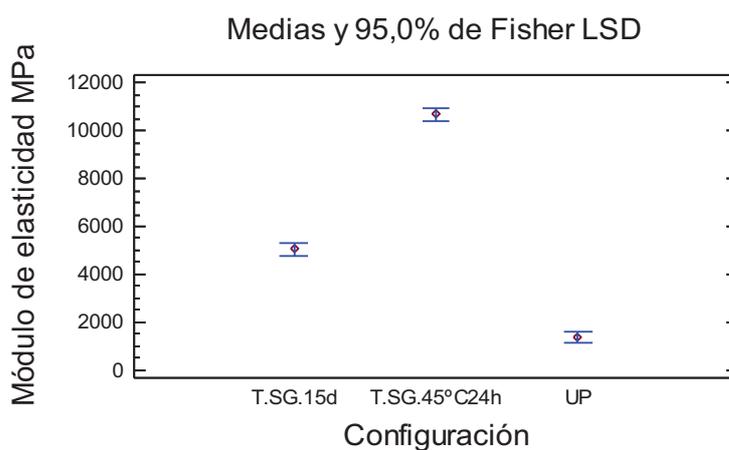


Figura A6.11. Módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones F.SG.15d(2,0-2,5M), F.SG.45°C24h(2,0-2,5M) y resina poliéster (UP).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad de las configuraciones T.SG.15d.(2,0-2,5M) y T.SG.45°C24h(2,0-2,5M) como se puede observar en la Figura A6.11. Además se puede apreciar que existe un gran incremento del módulo de elasticidad a tracción con respecto a la matriz de poliéster.

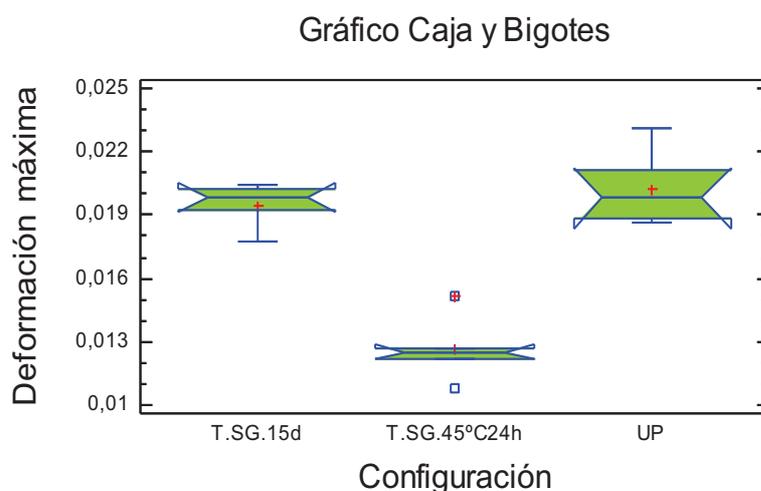


Figura A6.12. Deformación máxima a tracción de las configuraciones F.SG.15d(2,0-2,5M), F.SG.45°C24h(2,0-2,5M) y resina poliéster (UP).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de las configuraciones T.SG.15d.(2,0-2,5M) y T.SG.45°C24h(2,0-2,5M) pero no existe diferencia estadísticamente significativa entre la resina poliéster (UP) y la configuración T.SG.15d(2,0-2,5M) como se puede observar en la Figura A6.12.

ENSAYO DE FLEXIÓN

En las figuras siguientes se presentan los diagramas de medias de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y deformación de los ensayos realizados a flexión para las diferentes configuraciones realizadas. Inicialmente se comparan las diferentes posiciones de bombeo de MEKP. Luego se comparan los efectos de incorporar gelcoat al material compuesto en una superficie y posteriormente en las dos superficies del material compuesto. Finalmente, se prueban diferentes tipos de curado al material que presentó excelentes características.

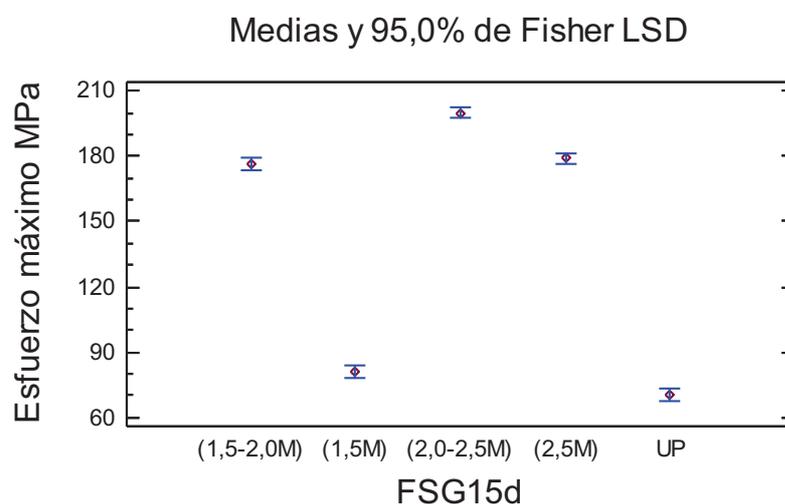


Figura A6.13. Esfuerzo máximo a la flexión de configuraciones con diferente posición de bombeo de MEKP

El análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo a flexión de todas las configuraciones excepto entre F.SG.15d.(1,5-2,0M) y F.SG.15d.(2,5M) como se puede observar en la Figura A6.13. También se puede observar que todas las configuraciones de moldeo por aspersión con refuerzo de vidrio tienen un incremento de esfuerzo máximo con respecto a la resina poliéster siendo la de más alto valor la configuración F.SG.15d.(2,0-2,5M).

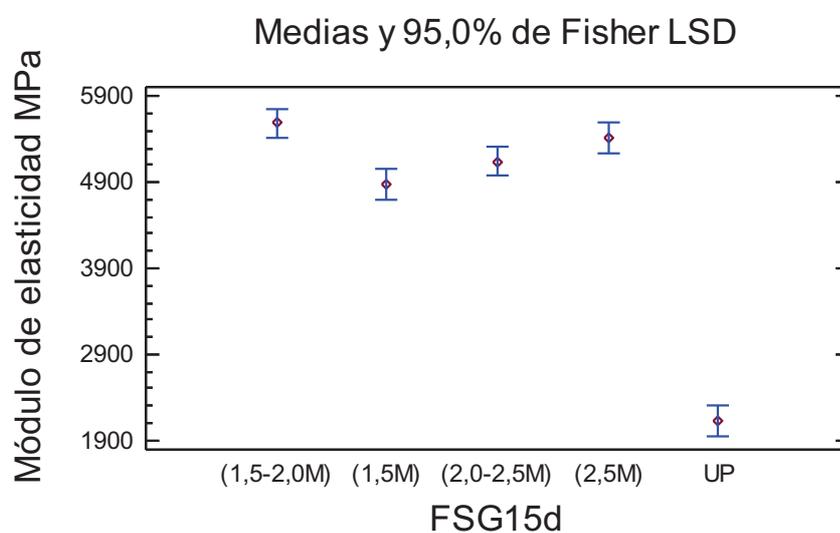


Figura A6.14. Módulo de elasticidad a flexión de configuraciones con diferente posición de bombeo de MEKP.

En la Figura A6.14, el análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a flexión de casi todas las configuraciones excepto entre F.SG.15d.(1,5-2,0M) y F.SG.15d.(2,5M); F.SG.15d.(1,5M) y F.SG.15d.(2,0-2,5M); F.SG.15d.(2,0-2,5M) y F.SG.15d.(2,5M). También se puede observar que todas las configuraciones de moldeo por aspersión con refuerzo de fibra de vidrio tienen un incremento del módulo de elasticidad con respecto a la resina poliéster.

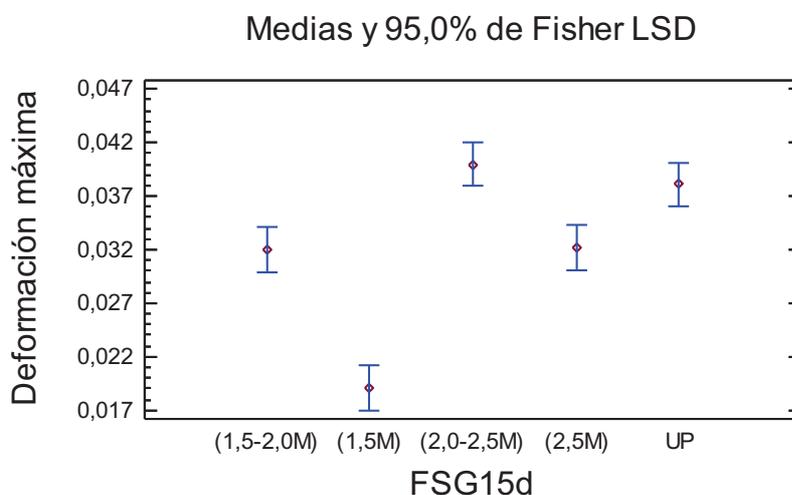


Figura A6.15. Deformación máxima a flexión de configuraciones con diferente posición de bombeo de MEKP.

En la Figura A6.15, el análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de casi todas las configuraciones excepto entre F.SG.15d.(1,5-2,0M) y F.SG.15d.(2,5M); resina poliéster (UP) y T.SG.15d.(2,0-2,5M). También se puede observar que todas las configuraciones presentan una menor deformación con respecto a la resina poliéster excepto la configuración T.SG.15d.(2,0-2,5M).

En busca de obtener un material con un mejor acabado y estudiar las características o defectos del compuesto, se agregó gelcoat en una superficie del material y luego en las dos superficies, la una está en contacto con el molde y la segunda se encuentra en contacto con el medio ambiente.

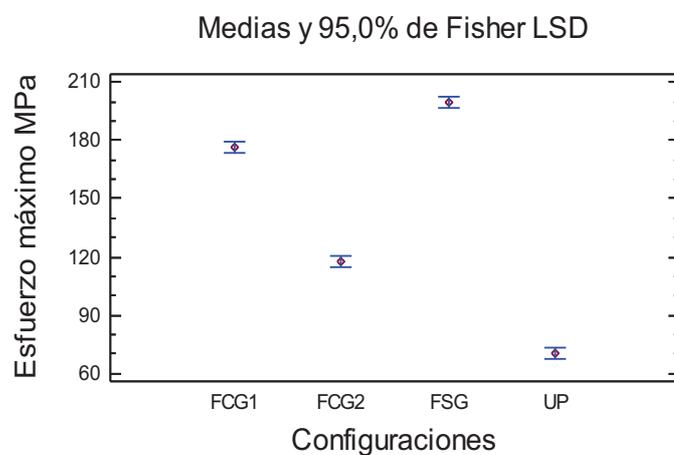


Figura A6.16. Esfuerzo máximo a flexión de las configuraciones F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M) y resina poliéster (UP).

El análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de todas las configuraciones como se puede observar en la Figura A6.16. También se puede observar que el esfuerzo máximo a flexión de la configuración F.SG.15d.(2.0-2,5M) posee un valor superior a la resina poliéster (UP) y al resto de configuraciones.

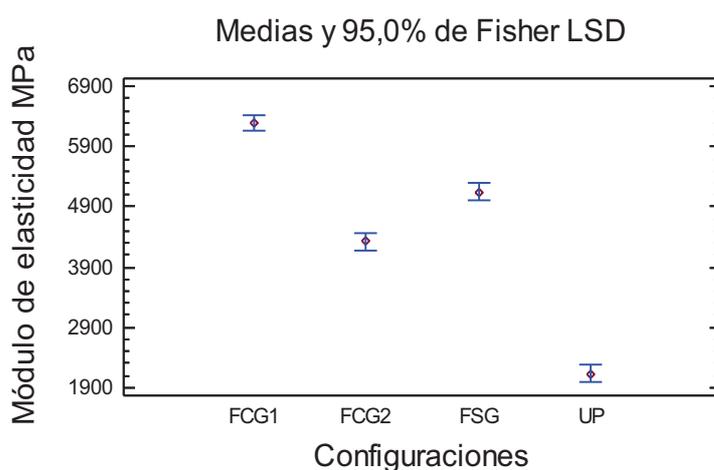


Figura A6.17. Módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M), F.SG.15d.(2.0-2,5M) y resina poliéster (UP).

En la Figura A6.17, el análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a flexión de las respectivas configuraciones. También se puede observar que el módulo de elasticidad a flexión de la probeta de resina poliéster es mucho menor que el resto de configuraciones.

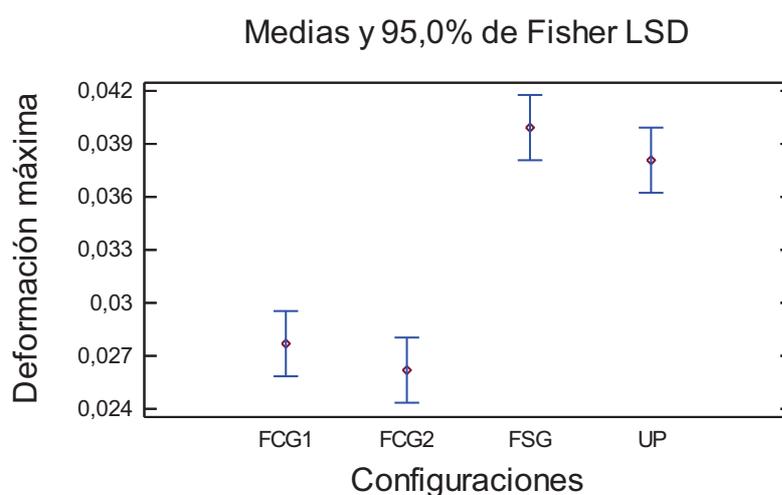


Figura A6.18. Deformación máxima a flexión de las configuraciones F.SG.15d.(2,0-2,5M), F.SG.15d.(2,0-2,5M), F.SG.15d.(2,0-2,5M) y resina poliéster (UP).

En la Figura A6.18, el análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima a flexión de las configuraciones F.CG1.15d.(2,0-2,5M) y F.CG2.15d.(2,0-2,5M); T.SG.15d.(2,0-2,5M) y la resina poliéster. También se puede observar que la deformación máxima a flexión de la probeta F.SG.15d.(2,0-2,5M) posee un valor mayor a la resina poliéster.

En busca de reducir el tiempo de fabricación y sabiendo que el material para que desarrolle por completo sus propiedades mecánica y químicas necesita un tiempo de curado de 15 días, se estableció la posibilidad de reducir este tiempo mediante el uso de una estufa. Por este criterio se definió la opción de realizar el curado a temperatura controlada mediante la estufa. Además, para un mejor análisis y estudio se planteó

una temperatura a 35°C y otra a 45°C, cada una de ellas se experimentó a 12,24 y 36 horas.

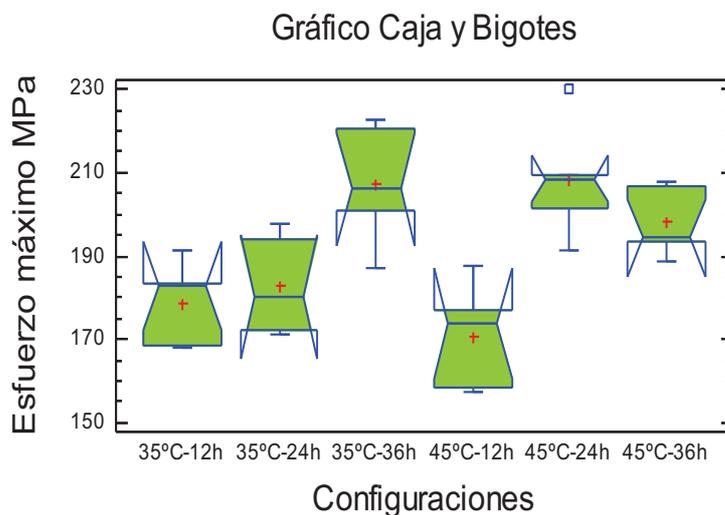


Figura A6.19. Esfuerzo máximo a flexión de las configuraciones de curado a 35°C y 45°C durante 12,24 y 36 horas.

El análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo a flexión de varias configuraciones, así como también existen diferencias estadísticas en otras configuraciones como se observa en la Figura A6.19. También se puede observar que el esfuerzo máximo a flexión de la probeta F.SG.45°C24h.(2,0-2,5M) posee el valor más alto de todas las configuraciones.

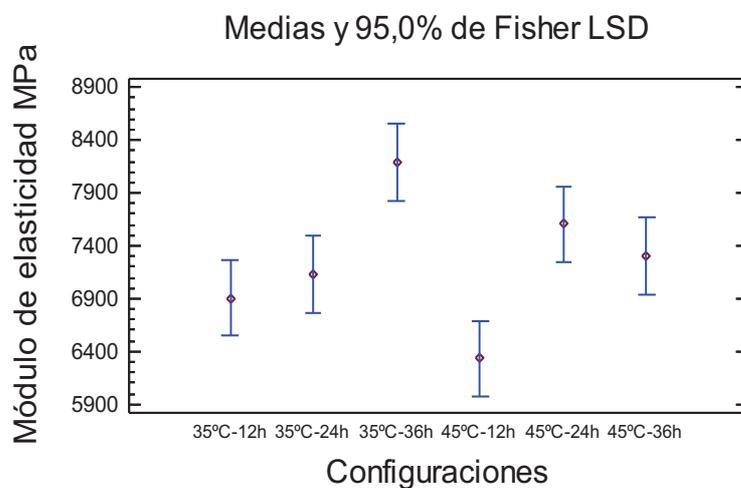


Figura A6.20. Módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones de curado a 35°C y 45°C durante 12,24 y 36 horas.

En la Figura A6.20, el análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a flexión de la mayoría de configuraciones.

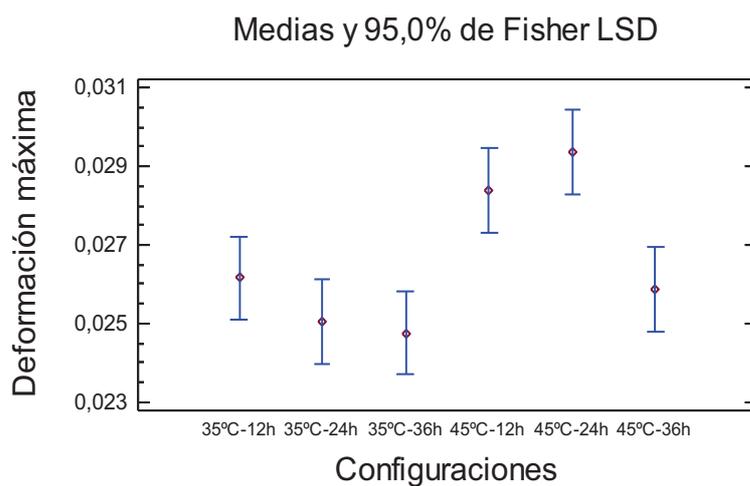


Figura A6.21. Deformación máxima a flexión de las configuraciones de curado a 35°C y 45°C durante 12,24 y 36 horas.

El análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de casi todas las configuraciones excepto F.SG.45°C12h.(2,0-2,5M) y F.SG.45°C24h(2,0-2,5M); que se diferencian de las otras configuraciones como se observa en la Figura A6.21.

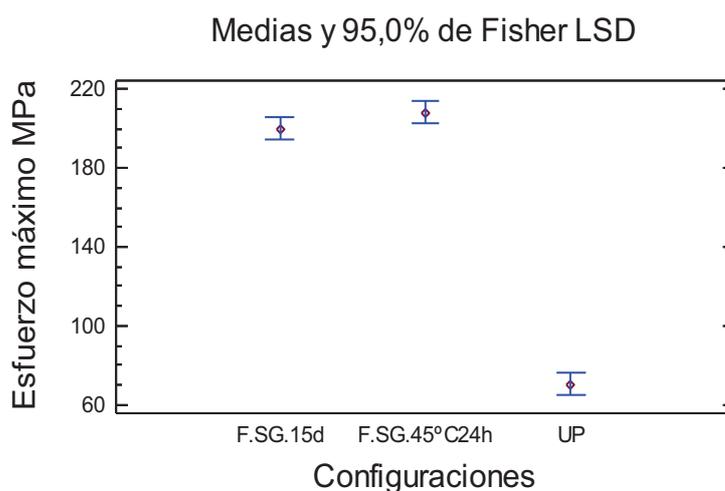


Figura A6.22. Esfuerzo máximo a flexión de las configuraciones F.SG.15d.(2,0-2,5M), F.SG.45°C24h(2,0-2,5M) y resina poliéster (UP).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo a flexión entre las configuraciones F.SG.15d(2,0-2,5M) y F.SG.45°C24h(2,0-2,5M) como se puede observar en la Figura A6.22. Además se puede apreciar que existe un gran incremento del esfuerzo máximo a flexión con respecto a la matriz poliéster de ambas configuraciones F.SG.15d(2,0-2,5M) y F.SG.45°C24h(2,0-2,5M).

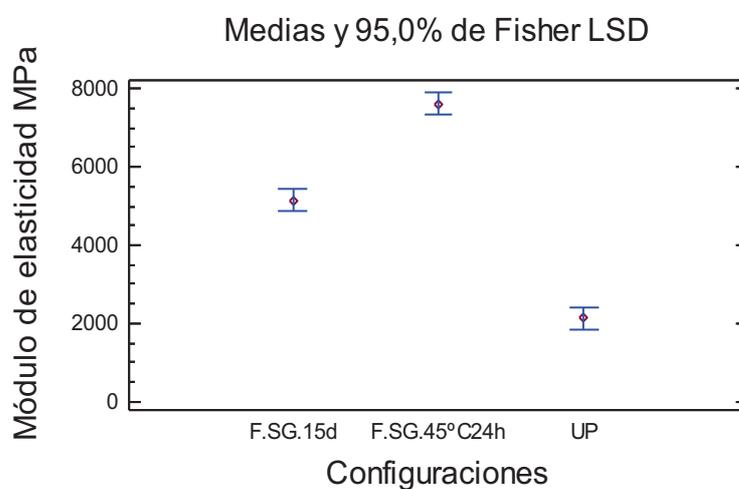


Figura A6.23. Módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones F.SG.15d(2,0-2,5M), F.SG.45°C24h(2,0-2,5M) y resina poliéster (UP).

El análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad de las configuraciones T.SG.15d(2,0-2,5M), T.SG.45°C24h(2,0-2,5M) y resina poliéster como se puede observar en la Figura A6.23. Además se puede apreciar que existe un gran incremento del módulo de elasticidad a flexión con respecto a la matriz de poliéster.

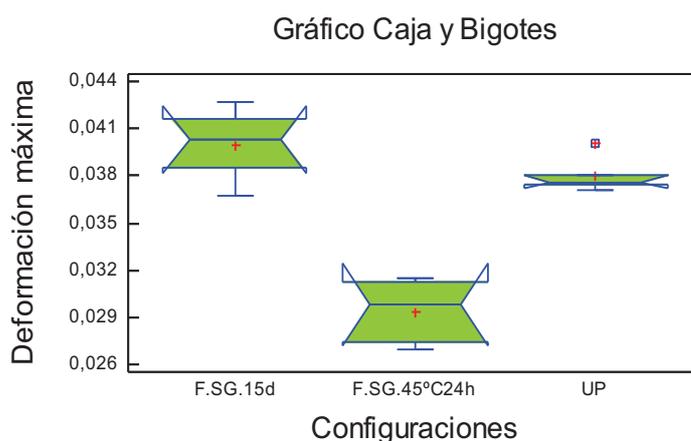


Figura A6.24. Deformación máxima de las configuraciones F.SG.15d(2,0-2,5M), F.SG.45°C24h(2,0-2,5M) y resina poliéster (UP).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de las configuraciones F.SG.15d.(2,0-2,5M) y la resina poliéster pero existe diferencia estadísticamente significativa entre estas dos configuraciones y el material F.SG.45°C24h.(2,0-2,5M) como se puede observar en la Figura A6.24.

ANEXO 8. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO

Ensayos de impacto realizados en probetas de la matriz poliéster																									
Altura total de caída de dardo (cm)																					ni	ini	i ² ni		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
120														o						0	1				
130							x						x		o					3	2	0	4	0	0
140			o	o	o	o				o		x					x			3	5	1	1	1	1
150		x	x	x					x											5	0	2	2	4	8
160	x																			1	0	3	1	3	9
Totales																				12	8	8	18		
																				(Nx)	(No)	(N)	(B)		

w (kg)	0,0405
ho (mm)	130
d (mm)	10
h (mm)	135
[B/N-(A/N) ²]	1,25
Sh (mm)	20,72
F	9,8 x 10 ⁻³
MFE [J]	0,054
S _{MFE} [J]	0,008

Probetas de material compuesto sin gelcoat (curado a medio ambiente)																								
Altura total de caída de dardo (mm)	1	Resultado del ensayo; (X=falla); o= (no falla)																		ni	i	no	nx	i ² ni
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19					
150																		o	0	0	0	0	0	0
160									o						o				1	3	1	1	1	1
170					o			o		x		o		x		x			3	4	2	3	6	12
180					x		x				x		x						5	0	3	5	15	45
190																			1	0	4	1	4	16
200		x																	1	0	5	1	5	25
210	X																		1	0	6	1	6	36
																			12	8		12	37	135
																			(Ng)	(No)		(N)	(A)	(B)

w (kg)	0,0706
ho (mm)	160,0000
d (mm)	10,0000
h (mm)	185,8333
$[B/N-(A/N)^2]$	1,7431
Sh	28,7075
f	$9,8 \times 10^{-3}$
MFE [J]	0,1287
S_{MFE} [J]	0,0199

Probetas de material compuesto sin gelcoat (curado a 45°C - 12 horas)																																														
Altura total de caída de dardo (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	nx	no	i	ni	ini	i ² ni																				
	200		o	o	o	x																						1	3	0	1	0	0													
220	o					x	x	x	o	o					o	x	o	x	o	o	5	7	1	5	5	5																				
240											x	x	x	x							4	0	2	4	8	16																				
Totales																					10	10																		10	10			10	13	21
																					(Nx)	(No)																			(N)	(A)	(B)			

w (kg)	0,0706
ho (mm)	200
d (mm)	20
h (mm)	216
$[B/N-(A/N)^2]$	0,41
Sh	14,224
f	$9,8 \times 10^{-3}$
MFE [J]	0,14954749
S _{MFE} [J]	9,8480E-03

Probetas de material compuesto con gelcoat en dos superficies (curado a 45oC - 36 horas)																										
Altura total de caída de dardo (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	nx	no	i	ni	ini	i ² ni
	Totales																									
100	o																			o	0	2				
110				x	x	x	o	x	o					o					o		4	4	0	4	0	0
120		x	x							o			o		x			o			3	3	1	3	3	3
130											x	x				x	x				4	0	2	4	8	16
																				11	8		11	11	19	
																				(Nx)	(No)		(N)	(A)	(B)	

w (kg)	0,0706
ho (mm)	110
d (mm)	10
h (mm)	115
[B/N-(A/N) ²]	0,727272727
Sh (mm)	12,25181818
f	9,8 x 10 ⁻³
MFE [J]	0,079620191
S _{MFE} [J]	0,0085