

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE POLIPROPILENO REFORZADO CON FIBRAS DE ABACÁ MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO

JUAN CARLOS PÁEZ MOSCOSO

DIRECTOR: VÍCTOR GUERRERO, PH.D

Quito, Junio 2007

DECLARACIÓN

Yo, Juan Carlos Páez Moscoso, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis 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.

Juan Carlos Páez Moscoso

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Carlos Páez Moscoso, bajo mi supervisión.

Víctor Guerrero, Ph.D.

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a mis padres,
por su amor, protección y apoyo incondicional.

Mi agradecimiento al Dr. Víctor Guerrero,
por su acertada dirección.

Al Dr. Francisco Cadena, Ing. Ma. Fernanda Illánz y al
personal del CIAP en general, por su colaboración y
paciencia.

A Nadya y a su familia.

A mis profesores de la carrera de Ingeniería Mecánica,
por compartir sus conocimientos.

A mis amigos y compañeros,
por los buenos y malos momentos.

Juan

DEDICATORIA

A Paula Camila,
mi tesoro máspreciado.

Juan

CONTENIDO

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| CONTENIDO DE FIGURAS | xi |
|-----------------------------------|-----------|

| | |
|----------------------------------|--------------|
| CONTENIDO DE TABLAS | xviii |
|----------------------------------|--------------|

CAPITULO 1

| | |
|-------------------------------|----------|
| FIBRAS NATURALES | 1 |
|-------------------------------|----------|

| | |
|-----------------------------|---|
| 1.1. FIBRAS NATURALES | 1 |
|-----------------------------|---|

| | |
|--|---|
| 1.2. FIBRAS NATURALES DE ORIGEN VEGETAL..... | 2 |
|--|---|

| | |
|--|---|
| 1.2.1. COMPOSICIÓN DE LAS FIBRAS NATURALES DE ORIGEN VEGETAL..... | 3 |
|--|---|

| | |
|-------------------------|---|
| 1.2.1.1. Celulosa | 5 |
|-------------------------|---|

| | |
|-----------------------|---|
| 1.2.1.2. Lignina..... | 6 |
|-----------------------|---|

| | |
|------------------------|---|
| 1.2.1.3. Pectina | 7 |
|------------------------|---|

| | |
|-----------------------------|---|
| 1.2.1.4. Hemicelulosa | 7 |
|-----------------------------|---|

| | |
|--|---|
| 1.2.2. FIBRAS NATURALES DE ORIGEN VEGETAL EN EL ECUADOR..... | 7 |
|--|---|

| | |
|---|---|
| 1.2.3. UTILIZACIÓN DE FIBRAS VEGETALES COMO REFUERZO EN MATERIALES COMPUESTOS..... | 8 |
|---|---|

| | |
|---------------------------|----|
| 1.3. FIBRA DE ABACÁ | 10 |
|---------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 1.3.1. PRODUCCIÓN Y CULTIVO DEL ABACÁ EN EL ECUADOR..... | 11 |
|--|----|

| | |
|--------------------------------|----|
| 1.3.2. TIPOS Y CALIDADES | 13 |
|--------------------------------|----|

| | |
|--------------------------|----|
| 1.3.3. PROPIEDADES | 15 |
|--------------------------|----|

| | |
|--------------------------|----|
| 1.3.4. APLICACIONES..... | 16 |
|--------------------------|----|

CAPITULO 2

| | |
|--|-----------|
| COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES | 18 |
|--|-----------|

| | |
|---------------------------------|----|
| 2.1. MATERIALES COMPUESTOS..... | 18 |
|---------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| 2.2. COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES | 21 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| 2.2.1. COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE | 21 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| 2.2.2. COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA | 23 |
|---|----|

| | | |
|----------|--|----|
| 2.3. | PROPIEDADES DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES..... | 24 |
| 2.3.1. | ADHESIÓN FIBRA-MATRIZ | 24 |
| 2.3.2. | RELACIÓN LONGITUD – DIÁMETRO DE LAS FIBRAS | 28 |
| 2.3.3. | COMPOSICIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO | 29 |
| 2.3.4. | EFFECTOS DEL PROCESAMIENTO | 31 |
| 2.4. | ESFUERZOS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS..... | 33 |
| 2.5. | EL POLIPROPILENO | 35 |
| 2.5.1. | ESTRUCTURA DEL POLIPROPILENO | 36 |
| 2.5.2. | PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO | 37 |
| 2.6. | TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS | 39 |
| 2.6.1. | VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE Y TERMOPLÁSTICA..... | 40 |
| 2.6.1.1. | Ventajas y Desventajas del Procesamiento de Compuestos Termoestables | 40 |
| 2.6.1.2. | Ventajas y Desventajas del Procesamiento de Compuestos Termoplásticos..... | 41 |
| 2.6.2. | PROCESOS DE MANUFACTURA PARA COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA..... | 42 |
| 2.6.2.1. | Moldeo por inyección..... | 42 |
| 2.6.2.2. | Moldeo por extrusión | 42 |
| 2.6.2.3. | Autoclave o estratificado de preimpregnados..... | 43 |
| 2.6.3. | MOLDEO POR COMPRESIÓN DE TERMOPLÁSTICOS..... | 44 |
| 2.7. | APLICACIONES AUTOMOTRICES DE LOS COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES..... | 46 |

CAPITULO 3

| | | |
|--------|---------------------------------------|-----------|
| | METODOLOGÍA EXPERIMENTAL | 49 |
| 3.1. | CONSIDERACIONES PREVIAS | 49 |
| 3.2. | ALCANCE Y OBJETIVOS | 51 |
| 3.2.1. | ALCANCE | 51 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3.2.2. | OBJETIVO GENERAL | 52 |
| 3.2.3. | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 52 |
| 3.3. | ESTRATEGIA METODOLÓGICA..... | 53 |
| 3.3.1. | ETAPAS DEL PROCESO | 53 |
| 3.3.2. | TÉCNICAS Y EQUIPOS UTILIZADOS..... | 56 |
| 3.3.2.1. | Acondicionamiento de las fibras..... | 56 |
| 3.3.2.2. | Modificación de la fibra - Mercerización..... | 57 |
| 3.3.2.3. | Caracterización de los materiales..... | 58 |
| 3.3.2.3.1. | Máquina de ensayos universal – Ensayos de tracción y flexión | 58 |
| 3.3.2.3.2. | Plastómetro - Índice de fluidez..... | 60 |
| 3.3.2.3.3. | Calorimetría diferencial de barrido (DSC) – Porcentaje de Cristalinidad, Temperatura de Transición Vítrea | 61 |
| 3.3.2.3.4. | Ensayo de dureza | 61 |
| 3.3.2.3.5. | Determinación de la densidad | 62 |
| 3.3.2.3.6. | Determinación de absorción de humedad | 62 |
| 3.3.2.4. | Fabricación del material compuesto..... | 63 |
| 3.3.2.4.1. | Prensa calefactora..... | 63 |
| 3.3.2.4.2. | Baño térmico y sistema de enfriamiento..... | 64 |
| 3.3.2.4.3. | Molde cerrado tipo macho-hembra..... | 64 |
| 3.3.2.4.4. | Balanza analítica..... | 65 |
| 3.3.2.4.5. | Torre de alimentación y molde de madera..... | 65 |
| 3.3.3. | MATERIALES | 66 |
| 3.3.3.1. | Polipropileno - Matriz | 66 |
| 3.3.3.2. | Fibra de abacá – Refuerzo | 68 |
| 3.3.3.2.1. | Diámetro de la fibra | 68 |
| 3.3.3.2.2. | Propiedades mecánicas de la fibra..... | 69 |
| 3.3.4. | SOSA NaOH - TRATAMIENTO DE LA FIBRA | 70 |
| 3.4. | PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL | 71 |
| 3.4.1. | PRIMERA ETAPA: PROCESABILIDAD DE LA MATRIZ | 71 |
| 3.4.1.1. | Índice de fluidez del PP H-301 | 72 |
| 3.4.1.2. | Parámetros de enfriamiento | 73 |
| 3.4.1.2.1. | Porcentaje de cristalinidad | 73 |
| 3.4.1.2.2. | Ensayo de tracción del PP obtenido con diferentes enfriamientos...74 | |

| | | |
|------------|---|----|
| 3.4.1.3. | Pre calentamiento y moldeo de la matriz mediante moldeo por compresión..... | 74 |
| 3.4.1.3.1. | Determinación de cantidad de material necesaria | 75 |
| 3.4.1.3.2. | Temperatura mínima de pre calentamiento y moldeo | 76 |
| 3.4.1.3.3. | Presión mínima de procesamiento..... | 77 |
| 3.4.1.3.4. | Tiempo mínimo de pre calentamiento y moldeo..... | 78 |
| 3.4.2. | SEGUNDA ETAPA: COMPOSICIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO | 79 |
| 3.4.2.1. | Procedimiento para elaborar placas tipo sánduche | 81 |
| 3.4.3. | TERCERA ETAPA: PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO | 82 |
| 3.4.3.1. | Fase de moldeo | 83 |
| 3.4.3.2. | Fase de pre calentamiento..... | 84 |
| 3.4.3.3. | Fase de enfriamiento | 86 |
| 3.4.4. | CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES OBTENIDOS..... | 87 |
| 3.4.4.1. | Ensayo de tracción | 87 |
| 3.4.4.2. | Ensayo de flexión..... | 90 |
| 3.4.4.3. | Ensayo de dureza | 92 |
| 3.4.4.4. | Densidad | 92 |
| 3.4.4.5. | Absorción de agua..... | 93 |

CAPITULO 4

| | |
|---|-----------|
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 95 |
| 4.1. PROCESABILIDAD DE LA MATRIZ..... | 95 |
| 4.1.1. SELECCIÓN Y ELABORACIÓN DEL MOLDE | 95 |
| 4.1.2. ÍNDICE DE FLUIDEZ VS. TIEMPO DE PROCESAMIENTO | 98 |
| 4.1.3. PARÁMETROS DE ENFRIAMIENTO..... | 99 |
| 4.1.3.1. Porcentaje de cristalinidad..... | 100 |
| 4.1.3.2. Ensayo de tracción del PP obtenido con diferentes enfriamientos | 104 |
| 4.1.4. PRECALENTAMIENTO Y MOLDEO DE LA MATRIZ MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN..... | 107 |
| 4.1.4.1. Cantidad de material..... | 107 |
| 4.1.4.2. Temperaturas mínimas de pre calentamiento y moldeo..... | 108 |
| 4.1.4.3. Presión mínima de moldeo | 109 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.1.4.4. | Tiempos de procesamiento mínimos..... | 109 |
| 4.2. | ETAPA DE COMPOSICIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO | 110 |
| 4.2.1. | COMPUESTOS DE FIBRA CORTA – ORIENTACIÓN AL AZAR..... | 111 |
| 4.2.1.1. | Procedimiento para elaborar compuestos tipo sánduche..... | 111 |
| 4.2.1.2. | Comportamiento a la tracción..... | 114 |
| 4.2.1.3. | Comportamiento a flexión..... | 121 |
| 4.2.2. | COMPUESTOS DE FIBRA CONTINUA – ORIENTACIÓN AXIAL..... | 126 |
| 4.2.2.1. | Comportamiento a la tracción..... | 127 |
| 4.2.2.2. | Comportamiento a la flexión | 131 |
| 4.2.3. | COMPARACIÓN ENTRE PROPIEDADES Y SELECCIÓN DE LAS COMPOSICIONES | 133 |
| 4.3. | PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO | 134 |
| 4.3.1. | FASE DE MOLDEO..... | 135 |
| 4.3.1.1. | Propiedades a tracción..... | 137 |
| 4.3.1.2. | Propiedades a flexión | 142 |
| 4.3.2. | FASE DE PRECALENTAMIENTO | 148 |
| 4.3.2.1. | Propiedades a tracción..... | 150 |
| 4.3.2.2. | Propiedades a flexión | 154 |
| 4.3.3. | FASE DE ENFRIAMIENTO | 158 |
| 4.3.3.1. | Propiedades a tracción..... | 160 |
| 4.3.3.2. | Propiedades a flexión | 162 |
| 4.4. | CARACTERIZACIÓN FINAL DE LOS MATERIALES COMPUESTOS ... | 165 |
| 4.4.1. | RESULTADOS DE LOS COMPUESTOS DE DIFERENTE COMPOSICIÓN..... | 165 |
| 4.4.1.1. | Compuestos con fibras de 20 mm de longitud, y 35% en masa | 167 |
| 4.4.1.2. | Compuestos de fibra continua y orientada longitudinalmente | 167 |
| 4.4.1.3. | Compuestos de fibra mercerizada..... | 168 |
| 4.4.2. | DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS PP/ABACÁ | 171 |
| 4.4.3. | PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS PP/ABACÁ..... | 176 |
| 4.4.3.1. | Dureza..... | 176 |
| 4.4.3.2. | Densidad | 177 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.3.3. Absorción de agua..... | 178 |
| 4.4.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y RELACIÓN CON LOS PRESENTADOS EN ESTUDIOS SIMILARES.... | 179 |

CAPITULO 5

| | |
|---|------------|
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 184 |
| 5.1. CONCLUSIONES | 184 |
| 5.2. RECOMENDACIONES..... | 188 |
| BIBLIOGRAFÍA | 190 |
| ANEXOS | 194 |

CONTENIDO DE FIGURAS

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 1.1. | Clasificación de las fibras naturales de acuerdo a su origen [Mohanty, 2005]. | 1 |
| Figura 1.2. | Composición de la pared celular [Internet 1]. | 5 |
| Figura 1.3. | Estructura de la celulosa. | 6 |
| Figura 1.4. | Modelo de la estructura de la lignina [Corrales, 2002]. | 6 |
| Figura 1.5. | Exportaciones de la fibra de abacá en miles de USD FOB (free on board). Fuente: Banco Central del Ecuador. | 12 |
| Figura 1.6. | Algunas aplicaciones del abacá [Internet 2]. | 17 |
| Figura 2.1. | Compuestos reforzados con fibra [Guerrero, 2004]. | 20 |
| Figura 2.2. | Clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzo [Mayugo, 2003]. | 21 |
| Figura 2.3. | Efecto de los diferentes tratamientos químicos sobre esfuerzo último de tensión en compuestos de LLDPE / lino [Li et al., 2004]. | 27 |
| Figura 2.4. | Efecto de las variables de procesamiento de compuestos de sisal (30%) con polipropileno sobre sus propiedades mecánicas [P.V. Joseph et a, 1998]. | 32 |
| Figura 2.5. | Mecanismos de daño en compuestos: (a) rotura de fibras, (b) pandeo de fibra por esfuerzos de compresión, (c) debonding, (d) agrietamiento en la matriz [Mayugo, 2003]. | 33 |
| Figura 2.6. | Importaciones históricas de polipropileno (1990 al 2003). Fuente ASEPLAS. | 36 |
| Figura 2.7. | Estructura del polipropileno (PP). | 36 |
| Figura 2.8. | Forma de la estructura del PP. (a) Isotáctica; (b) Sindiotáctica; (c) Atáctica. | 37 |
| Figura 2.9. | Empaque al vacío de preimpregnados que se introducen a un autoclave [Cogswell, 1992]. | 43 |
| Figura 2.10. | Equipo para el moldeo por compresión (técnica de prensado en caliente). | 45 |
| Figura 2.11. | Componentes interiores reforzados con fibras vegetales, utilizados en el vehículo modelo Mercedes “E-class” [Mohanty, 2005]. | 47 |
| Figura 3.1. | Esquema del diseño experimental. | 55 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Figura 3.2. | Estufa con circulación de aire marca Venticell. | 56 |
| Figura 3.3. | Proceso de mercerización de la fibra de abacá. | 57 |
| Figura 3.4. | Máquina de Ensayos Universal Instron en conjunto con su sistema computarizado de control. | 58 |
| Figura 3.5. | (a) Medidor de espesores Mitutuyo y troqueladora marca Ceast; (b) Troqueles para el corte de las probetas de ensayo de tensión y flexión..... | 59 |
| Figura 3.6. | Plastómetro Ceast modelo 6942. | 60 |
| Figura 3.7. | Calorímetro diferencial de barrido (DSC)..... | 61 |
| Figura 3.8. | Durómetro Shore D marca Bareiss. | 62 |
| Figura 3.9. | Sistema de balanza de plato suspendido para determinación de densidades de sólidos. | 62 |
| Figura 3.10. | Aparato de Kubelka. | 63 |
| Figura 3.11. | Prensa calefactora y baño térmico como sistema de enfriamiento. | 63 |
| Figura 3.12. | Molde tipo macho-hembra utilizado en el moldeo por compresión. | 65 |
| Figura 3.13. | Balanza analítica marca Mettler Toledo modelo PG5002-S. | 65 |
| Figura 3.14. | (a) Torre de alimentación; (b) molde de madera. | 66 |
| Figura 3.15. | Polipropileno PP H-301 Braskem..... | 67 |
| Figura 3.16. | Fibra de abacá calidad 3. | 68 |
| Figura 3.17. | Distribución del diámetro de fibra de abacá [Morejón y Narvaez, 2004]. | 69 |
| Figura 3.18. | Sosa cáustica 1310-73-2 utilizada para la mercerización de la fibra. | 71 |
| Figura 3.19. | Esquema del proceso realizado en la etapa de composición. | 80 |
| Figura 3.20. | Diagrama de pruebas realizadas en la fase de moldeo..... | 84 |
| Figura 3.21. | Diagrama de pruebas realizadas en la fase de precalentamiento..... | 85 |
| Figura 3.22. | Diagrama de pruebas realizadas en la fase de enfriamiento..... | 86 |
| Figura 3.23. | Probeta tipo VI para ensayos de tracción. | 87 |
| Figura 3.24. | Dimensiones de las probetas para ensayo de flexión..... | 90 |
| Figura 4.1. | Rebabas de PP que se obtienen utilizando: (a) moldes tipo plancha, (b) molde tipo macho - hembra. | 97 |
| Figura 4.2. | Presencia de pequeñas burbujas en las placas de PP. | 97 |
| Figura 4.3. | MFI del PP H-301 Braskem versus tiempo de procesamiento a 180°C. | 98 |
| Figura 4.4. | Termograma de fusión para una placa de polipropileno enfriada sin el control del baño térmico..... | 100 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Figura 4.5. | Termograma de fusión para una placa de polipropileno enfriada utilizando el baño térmico con una temperatura inicial del agua de 0°C. | 101 |
| Figura 4.6. | Termograma de fusión para una placa de polipropileno enfriada utilizando el baño térmico con una temperatura inicial del agua de 15°C. | 101 |
| Figura 4.7. | Curva exotérmica de cristalización de las muestras de PP y temperatura de cristalización. | 103 |
| Figura 4.8. | Curvas esfuerzo-deformación para la matriz PP con diferentes condiciones de enfriamiento. | 104 |
| Figura 4.9. | Porcentaje de deformación unitaria de la matriz de PP obtenido con diferentes parámetros de enfriamiento. | 105 |
| Figura 4.10. | Esfuerzo máximo a tracción de la matriz de PP obtenido con diferentes parámetros de enfriamiento. | 105 |
| Figura 4.11. | Módulo a tracción de la matriz de PP obtenido con diferentes parámetros de enfriamiento. | 106 |
| Figura 4.12. | Muestra de falta de fusión en las placas de PP por uso de bajas temperaturas durante el procesamiento (a) 170°C, (b) 160°C. | 108 |
| Figura 4.13. | Placa de PP obtenida mediante moldeo por compresión. | 110 |
| Figura 4.14. | Dispersión de la fibra corta en los materiales compuestos obtenidos para diferentes fracciones másicas. | 111 |
| Figura 4.15. | Espesor del compuesto tipo sánduche antes de procesar en relación con la profundidad del molde. | 112 |
| Figura 4.16. | Evidencia de la saturación de refuerzo en los compuestos con 35% de fibra. | 112 |
| Figura 4.17. | Presencia de burbujas en el compuesto a causa de la inclusión de aire. | 113 |
| Figura 4.18. | Anclaje mecánico de las fibras de abacá con la matriz de PP. | 114 |
| Figura 4.19. | Sección transversal de la fractura que ilustra la mala inclusión del PP en la fibra de abacá. | 115 |
| Figura 4.20. | Fractura común de las probetas con fibra orientada al azar que muestra que las fibras de orientación transversal estarían actuando como concentradores de esfuerzos. | 115 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Figura 4.21. | Efecto de la fracción de masa de fibra en el porcentaje de deformación unitaria a carga máxima en tracción para longitudes de 10 mm, 20 mm, y 30 mm en fibra al azar..... | 117 |
| Figura 4.22. | Acercamiento de la Figura 4.21 enfocándose en el porcentaje de deformación unitaria a carga máxima de los compuestos..... | 117 |
| Figura 4.23. | Efecto de la fracción de masa de fibra en el esfuerzo máximo a tracción para compuestos que incorporan fibras de 10 mm, 20 mm, y 30 mm distribuidas al azar. | 119 |
| Figura 4.24. | Efecto de la fracción de masa de fibra en el módulo a tracción para compuestos que incorporan fibras de 10 mm, 20 mm, y 30 mm distribuidas al azar. | 120 |
| Figura 4.25. | Variación del esfuerzo máximo y módulo a tracción en función de la fracción de fibra, para compuestos con fibras de 20 mm de largo. | 121 |
| Figura 4.26. | Variación del esfuerzo máximo y módulo a tracción en función de la fracción de fibra, para compuestos con fibras de 30 mm de largo. | 121 |
| Figura 4.27. | Deformación plástica en probetas de ensayo a flexión de compuestos de fibra corta..... | 122 |
| Figura 4.28. | Efecto de la fracción de masa de fibra en el esfuerzo máximo a flexión, registrado hasta un porcentaje de deformación del 5%, para compuestos con fibras de 10 mm, 20 mm, y 30 mm distribuidas al azar..... | 123 |
| Figura 4.29. | Efecto de la fracción de masa de fibra en el módulo a flexión para compuestos con fibras de 10 mm, 20 mm, y 30 mm distribuidas al azar..... | 124 |
| Figura 4.30. | Módulos a tracción y flexión de los compuestos con fibra de 30 mm de largo. | 125 |
| Figura 4.31. | Compuestos que incorporan diferentes contenidos de fibra continua orientada unidireccionalmente..... | 126 |
| Figura 4.32. | Dispersión de las fibras en los compuestos con 35% en masa de fibra continua. | 127 |
| Figura 4.33. | Fractura de las probetas de tracción para compuestos de fibra continua. ... | 127 |

Figura 4.34. Efecto de la fracción de masa de fibra en la deformación a tracción para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.....129

Figura 4.35. Efecto de la fracción de masa de fibra en el esfuerzo máximo a tracción para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.129

Figura 4.36. Efecto de la fracción de masa de fibra en el módulo a tracción para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.....130

Figura 4.37. Efecto de la fracción de masa de fibra en el esfuerzo máximo a flexión, registrado hasta el 5% de la deformación, para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.131

Figura 4.38. Efecto de la fracción de masa de fibra en el módulo a flexión para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.....132

Figura 4.39. Porcentaje de deformación unitaria a carga máxima de tracción, en función del cambio en el tiempo y presión de moldeo: (a) Composición 1 (35%, 30 mm), (b) Composición 2 (30%, 20 mm).....138

Figura 4.40. Propiedades mecánicas a la tracción para la composición 1 (35%, 30 mm), en función del cambio del tiempo y presión de moldeo: (a) Esfuerzo máximo, (b) Módulo.140

Figura 4.41. Propiedades mecánicas a la tracción para la composición 1 (30%, 20 mm), en función del cambio del tiempo y presión de moldeo: (a) Esfuerzo máximo, (b) Módulo.141

Figura 4.42. Efecto del tiempo y presión del moldeo sobre las propiedades a flexión de la composición 1: (a) Esfuerzo máximo a flexión, (b) Módulo a flexión.143

Figura 4.43. Efecto del tiempo y presión del moldeo sobre las propiedades a flexión de la composición 2: (a) Esfuerzo máximo a flexión, (b) Módulo a flexión.144

Figura 4.44. Esfuerzo y módulo a tracción de la composición 2 (30%, 20 mm) en función de la presión de moldeo y un tiempo de moldeo de 4 minutos.....146

| | | |
|--------------|---|-----|
| Figura 4.45. | Esfuerzo y módulo a flexión de la composición 2 (30%, 20 mm) en función de la presión de moldeo y un tiempo de moldeo de 4 minutos..... | 146 |
| Figura 4.46. | Porcentaje de deformación del compuesto, en función del cambio de tiempo y presión de precalentamiento: (a) Composición 1 (35%, 30 mm), (b) Composición 2 (30%, 20 mm)..... | 151 |
| Figura 4.47. | Esfuerzo máximo a tracción del compuesto en función del cambio de tiempo y presión de precalentamiento: (a) Composición 1 (35%, 30 mm), (b) Composición 2 (30%, 20 mm)..... | 153 |
| Figura 4.48. | Módulo a tracción del compuesto en función del cambio de tiempo y presión de precalentamiento: (a) Composición 1 (35%, 30 mm), (b) Composición 2 (30%, 20 mm)..... | 154 |
| Figura 4.49. | Esfuerzo a flexión de la composición 1 en función del cambio de tiempo y presión de precalentamiento: (a) Esfuerzo máximo a flexión, (b) Módulo a flexión..... | 155 |
| Figura 4.50. | Módulo a flexión de la composición 2 en función del cambio de tiempo y presión de precalentamiento: (a)Esfuerzo máximo a flexión, (b) Módulo a flexión..... | 156 |
| Figura 4.51. | Observación al microscopio de las placas obtenidas: (a) sin, (b) con presión en la fase de enfriamiento..... | 159 |
| Figura 4.52. | Porcentaje de deformación unitaria a carga máxima de tracción en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones..... | 160 |
| Figura 4.53. | Esfuerzo máximo de tracción en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones..... | 161 |
| Figura 4.54. | Módulo a tracción en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones..... | 161 |
| Figura 4.55. | Esfuerzo a flexión en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones..... | 162 |
| Figura 4.56. | Módulo a flexión en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones..... | 163 |
| Figura 4.57. | Coloración amarillenta que obtiene la fibra por cambios en su composición química..... | 169 |
| Figura 4.58. | Comparación entre la estructura de las fibras antes y después del tratamiento de mercerizado..... | 169 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Figura 4.59. | Curvas esfuerzo vs. deformación unitaria características de los materiales compuestos PP/abacá y de la matriz de PP. | 172 |
| Figura 4.60. | Acercamiento a las curvas esfuerzo vs. deformación de los materiales compuestos PP/abacá de fibra corta y orientada al azar. | 173 |
| Figura 4.61. | Escalón en la curva esfuerzo - deformación de los materiales compuestos PP/abacá. | 175 |
| Figura 4.62. | Determinación del esfuerzo de fluencia o limite elástico en la matriz de PP. | 175 |
| Figura 4.63. | Comparación de las propiedades a tracción finales de los materiales compuestos PP/abacá: a) Esfuerzo máximo, b) Módulo a tracción..... | 181 |

CONTENIDO DE TABLAS

| | | |
|------------|---|----|
| Tabla 1.1. | Principales fibras vegetales [Cadena, 2000]..... | 2 |
| Tabla 1.2. | Composición química en porcentaje de algunas de las fibras vegetales más importantes [Mohanty, 2005; Cadena, 2000; Corrales, 2002; López, 2004]..... | 4 |
| Tabla 1.3. | Comparación entre fibras vegetales (FV) y fibra de vidrio [Wanbua, 2003]. | 8 |
| Tabla 1.4. | Comparación entre diferentes propiedades de las fibras vegetales y fibra de vidrio [Mohanty, 2005; López, 2004; Wanbua, 2003; Cadena, 2000]. | 9 |
| Tabla 2.1. | Propiedades mecánicas de materiales compuestos con matriz poliéster reforzados con fibras vegetales sin tratamiento [Cadena et al., 2000; Rong et. al, 2001]..... | 22 |
| Tabla 2.2. | Propiedades mecánicas de materiales compuestos con matrices termoplásticas reforzados con fibras vegetales, máximos obtenidos [Wambua et al, 2003; Cadena et al., 2000; Morejón y Narváez, 2004; P.V. Joseph et al, 1998; Herrera y Valadez, 2005]..... | 24 |
| Tabla 2.3. | Comparación de propiedades de tensión de compuestos con diferentes matrices y diferente orientación [P.V. Joseph et al, 1998]..... | 30 |
| Tabla 3.1. | Propiedades de polipropileno homopolímero Braskem PP H301. Fuente IDES | 67 |
| Tabla 3.2. | Frecuencia, promedio y desviación estándar del diámetro de la fibra de abacá calidad 3 [Morejón y Narvaez, 2004]..... | 68 |
| Tabla 3.3. | Propiedades mecánicas de la fibra de abacá calidad 3 [Morejón y Narváez, 2004]..... | 70 |
| Tabla 3.4. | Pruebas realizadas para determinar efecto del enfriamiento en el PP. | 73 |
| Tabla 3.5. | Parámetros iniciales del moldeo por compresión. | 75 |
| Tabla 3.6. | Pruebas para determinar la masa necesaria de PP. | 75 |
| Tabla 3.7. | Pruebas para determinar temperaturas de procesamiento. | 76 |
| Tabla 3.8. | Pruebas para determinar presión mínima necesaria de procesamiento..... | 77 |
| Tabla 3.9. | Pruebas para determinar el tiempo de procesamiento de la matriz PP. | 78 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabla 3.10. | Parámetros de procesamiento utilizados en la fase de composición del material..... | 79 |
| Tabla 3.11. | Pruebas realizadas para determinar la composición del material compuesto..... | 81 |
| Tabla 3.12. | Pruebas de estudio para la fase de moldeo..... | 83 |
| Tabla 3.13. | Pruebas para establecer los parámetros de la fase de precalentamiento..... | 85 |
| Tabla 3.14. | Pruebas realizadas para el estudio de los parámetros del enfriamiento..... | 86 |
| Tabla 3.15. | Datos de 7 muestras que se analiza para la eliminación según T..... | 89 |
| Tabla 3.16. | Datos para segunda eliminación según resultado de T..... | 89 |
| Tabla 4.1. | Porcentaje en masa que se pierde como rebabas al utilizar los diferentes moldes..... | 96 |
| Tabla 4.2. | Porcentaje de variación del MFI según tiempo de procesamiento a 180°C del PP-H301..... | 99 |
| Tabla 4.3. | Entalpía, temperaturas de fusión experimentales y el porcentaje de cristalinidad de las muestras a diferentes enfriamientos..... | 102 |
| Tabla 4.4. | Propiedades a tracción de la matriz de PP enfriada a diferentes condiciones..... | 105 |
| Tabla 4.5. | Parámetros del moldeo por compresión utilizados para fabricar placas de matriz PP..... | 110 |
| Tabla 4.6. | Valores de deformación, esfuerzo y módulo a tracción de los materiales formulados con diferentes composiciones..... | 116 |
| Tabla 4.7. | Propiedades a flexión de los compuestos obtenidos a diferentes composiciones..... | 122 |
| Tabla 4.8. | Valores de deformación, esfuerzo y módulo a tracción de los materiales compuestos unidireccionales de fibra continua..... | 128 |
| Tabla 4.9. | Propiedades a flexión de los compuestos unidireccionales de fibra continua para diferentes fracciones de fibra..... | 131 |
| Tabla 4.10. | Propiedades mecánicas a tracción de las composiciones con las cuales se obtuvo mejores resultados..... | 134 |
| Tabla 4.11. | Propiedades mecánicas a flexión de las composiciones con las cuales se obtuvo mejores resultados..... | 134 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabla 4.12. | Propiedades mecánicas a la tracción de los compuestos obtenidos con la variación de los tiempos y presiones de moldeo en las dos composiciones seleccionadas. | 136 |
| Tabla 4.13. | Propiedades mecánicas a flexión de los compuestos obtenidos con la variación de los tiempos y presiones de moldeo en las dos composiciones seleccionadas. | 136 |
| Tabla 4.14. | Resultados a tracción y flexión para compuestos de composición 2 (30%, 20 mm) moldeados con presiones entre 1.18 a 1.77 MPa y un tiempo de moldeo de 4 minutos..... | 145 |
| Tabla 4.15. | Condiciones de tiempo y presión mejoradas para la fase de moldeo en las composiciones estudiadas. | 147 |
| Tabla 4.16. | Propiedades mecánicas del compuesto a las condiciones mejoradas de moldeo..... | 147 |
| Tabla 4.17. | Porcentaje de deformación, esfuerzo máximo y módulo a tracción, obtenidos por la variación de los tiempos y presiones de precalentamiento, para ambas composiciones..... | 148 |
| Tabla 4.18. | Esfuerzo y módulo a flexión de los compuestos, obtenidos por la variación de los tiempos y presiones de precalentamiento, para ambas composiciones. | 149 |
| Tabla 4.19. | Condiciones óptimas de tiempo, y presión para la fase de precalentamiento o en las composiciones estudiadas. | 157 |
| Tabla 4.20. | Propiedades mecánicas del compuesto a las condiciones mejoradas de precalentamiento..... | 157 |
| Tabla 4.21. | Porcentaje de deformación, esfuerzo máximo y módulo a tracción de los compuestos obtenidos por la variación de la presión de enfriamiento en las dos composiciones estudiadas..... | 158 |
| Tabla 4.22. | Esfuerzo y módulo a flexión de los compuestos obtenidos por la variación de la presión de enfriamiento en las dos composiciones estudiadas. | 159 |
| Tabla 4.23. | Condiciones mejoradas del moldeo por compresión para el conformado de materiales compuesto PP/abacá, en las dos composiciones estudiadas. | 163 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabla 4.24. | Propiedades mecánicas finales del compuesto a las condiciones mejoradas del procesamiento, comparadas con sus correspondientes de la etapa de composición del material. | 164 |
| Tabla 4.25. | Propiedades a la tracción de las composiciones 1 y 2, con una muestra de tamaño 10 (el valor entre paréntesis representa el valor previo al aumento de las muestras). | 165 |
| Tabla 4.26. | Propiedades a la flexión de las composiciones 1 y 2, con una muestra de tamaño 10 (el valor entre paréntesis representa el valor previo al aumento de las muestras). | 166 |
| Tabla 4.27. | Propiedades a tracción y flexión del compuesto con 20 mm y 35% en fibra. | 167 |
| Tabla 4.28. | Propiedades a tracción del compuesto con 20 mm y 35% en fibra. | 168 |
| Tabla 4.29. | Propiedades mecánicas a la tracción de las fibras mercerizadas. | 170 |
| Tabla 4.30. | Propiedades a tracción y flexión del compuesto con 30 mm y 35% en fibra modificada. | 171 |
| Tabla 4.31. | Módulo de elasticidad y esfuerzo de fluencia de la matriz de PP y de los materiales compuestos PP/abacá. | 176 |
| Tabla 4.32. | Dureza Shore-D de los compuestos finales PP/abacá. | 177 |
| Tabla 4.33. | Densidad de los compuestos de PP/abacá. | 177 |
| Tabla 4.34. | Absorción de agua de los compuestos de PP/abacá, según norma INEN 556. | 178 |
| Tabla 4.35. | Absorción de agua de los compuestos de PP/abacá, según método publicado por Li et al. [2004], no normalizado. | 179 |
| Tabla 4.36. | Propiedades mecánicas a la tracción de los compuestos PP/abacá. | 180 |
| Tabla 4.37. | Propiedades mecánicas a la flexión de los compuestos PP/abacá. | 180 |
| Tabla 4.38. | Propiedades físicas de los compuestos PP/abacá. | 180 |
| Tabla 4.39. | Mejores propiedades mecánicas registradas en otros trabajos similares. .. | 183 |

SIMBOLOGÍA

| | |
|----------------|---|
| DSC | calorimetría diferencial de barrido |
| FOB | free on board (libre a bordo) |
| HDPE | polietileno de alta densidad |
| LLDPE | polietileno lineal de baja densidad |
| PP | polipropileno |
| USD | dólares de los Estados Unidos de América |
| ΔH_m | entalpía de fusión experimental |
| ΔH_m^0 | entalpía de fusión del material 100% cristalino |
| b | ancho de la probeta de flexión |
| D_f | diámetro de la fibra |
| ϵ | deformación unitaria a carga máxima |
| E | módulo a tracción |
| E_f | módulo a flexión |
| F | carga o fuerza máxima aplicada |
| h | espesor de la probeta de flexión |
| L | span, separación entre apoyos de la mordaza para ensayos de flexión |
| l | largo de la probeta de flexión |
| L/d | longitud/diámetro |
| L_{C_f} | longitud crítica de la fibra |
| MFI | índice de fluidez |
| M_{fibra} | masa de fibra |
| $M_{máx}$ | momento flector máximo |
| M_{PP} | masa de polipropileno |
| MVR | tasa de fusión volumétrica |
| P_1 | presión aplicada en la fase de precalentamiento |
| P_2 | presión aplicada en la fase de moldeo |
| P_3 | presión aplicada en la fase enfriamiento |
| Q_m | absorción de agua de las muestras |
| $S_{flex@5\%}$ | esfuerzo máximo a flexión hasta una deformación unitaria del 5% |
| $S_{máx}$ | esfuerzo máximo a tracción |
| S_{ut} | esfuerzo último a tracción |
| S_{ut_f} | esfuerzo último (rotura) de la fibra |
| T | error implicado en la eliminación de un dato |
| T_1 | temperatura en la fase de precalentamiento |
| t_1 | tiempo de la fase de precalentamiento |
| T_2 | temperatura en la fase de moldeo |

| | |
|--------------------------|---|
| t_2 | tiempo de la fase de moldeo |
| T_3 | temperatura inicial del agua de enfriamiento |
| t_3 | tiempo de la fase de enfriamiento |
| T_m | temperatura de fusión del PP |
| W_c | porcentaje de cristalinidad |
| x_i | valor de la muestra i |
| \bar{x}_n | valor medio de las muestras |
| ρ | densidad, en g/cm^3 |
| ρ_{H_2O} | densidad del agua destilada |
| ρ_o | densidad conocida de un líquido de referencia |
| σ_n | desviación estándar de las muestras |
| $^{\circ}\text{C}$ | grado Celsius |
| μm | micrómetro |
| cm | centímetro |
| g | gramo |
| g/cm^3 | gramo/centímetro cúbico |
| g/l | gramo/litro |
| GPa | gigapascal |
| J/g | joule/gramo |
| kg | kilogramo |
| kg/mm^2 | kilogramo/milímetro cuadrado |
| kgf/cm^2 | kilogramo fuerza/centímetro cuadrado |
| kJ/m^2 | kilo joule/metro cuadrado |
| kN | kilo newton |
| kPa | kilopascal |
| l/h | litro/hora |
| lbf | libra fuerza |
| m | metro |
| min | minuto |
| ml/s | mili litro/segundo |
| mm | milímetro |
| mm/min | milímetro/minuto |
| mm/mm | milímetro/milímetro |
| mm^2 | milímetro cuadrado |
| mm^3 | milímetro cúbico |
| MPa | megapascal |
| $\text{N}\cdot\text{mm}$ | newton milímetro |
| N/tex | newton/tex |
| nm | manómetro |
| Pa | pascal |
| s | segundo |

| | |
|--------------|---------------------------|
| tex | tex de la fibra |
| Tm/ha | tonelada métrica/hectárea |
| ton | tonelada |
| W | watt |
| Ω /cm | ohm/centímetro |

RESUMEN

El presente proyecto de titulación trata sobre el procesamiento mediante moldeo por compresión de materiales compuestos de matriz polipropileno reforzados con fibra de abacá.

En una primera fase se determinó la procesabilidad del polipropileno mediante moldeo por compresión. Se realizó un análisis de la estructura inducida durante su enfriamiento, se determinó los tiempos de procesamiento máximos en base a la variación del índice de fluidez (MFI) del PP, y se determinaron parámetros de procesamiento que garantizaron la obtención de muestras libres de defectos por medio de inspecciones visuales. Utilizando como base estos datos, se procedió a la fabricación de planchas (preformas) de polipropileno, que combinadas con fibra de abacá permitirían la obtención de compuestos tipo sánduche.

En la segunda fase se elaboraron diferentes muestras del material compuesto, modificando su composición, y los parámetros de operación del moldeo. En lo que se refiere a la composición, se utilizaron fracciones máxicas de fibra en un rango del 15% al 35%, con longitudes de 10, 20, y 30 mm para fibra discontinua con orientación al azar, y 115 mm para fibra continua con orientación unidireccional. En lo que se refiere a parámetros de operación del moldeo, para la fase de precalentamiento se utilizaron presiones de entre 0 y 1.47 MPa con tiempos de 5 y 10 minutos; para la fase de moldeo presiones de entre 0.88 y 2.06 MPa con tiempos de 2, 4 y 6 minutos, y para la fase de enfriamiento se varió la presión entre 0 y 1.47 MPa.

Las propiedades mecánicas de las muestras obtenidas se evaluaron mediante ensayos estandarizados de tracción, flexión y dureza. Asimismo, se determinaron propiedades físicas tales como la densidad y absorción de humedad. De acuerdo con los resultados obtenidos, se establecieron valores de los parámetros de procesamiento y la composición del material que garantizaron las mejores propiedades del material compuesto.

PRESENTACIÓN

En el presente trabajo se estudia la formulación de materiales compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá y su procesamiento mediante moldeo por compresión. En este contexto, se analizan las diferentes propiedades físicas y mecánicas obtenidas en los compuestos formulados al variar el porcentaje en masa de fibra, longitud y orientación de las fibras y los parámetros del proceso de transformación.

En el primer capítulo se presenta una revisión de las características de las fibras vegetales en general y de las de abacá en particular. Se describe la composición química de las fibras vegetales, sus propiedades y sus usos tradicionales y no tradicionales. De manera específica para la fibra de abacá, se detalla su producción, tipos y calidades, su importancia en el Ecuador, sus propiedades y aplicaciones.

En el segundo capítulo se estudia las generalidades de los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales, se detallan sus ventajas y desventajas en comparación con compuestos tradicionales como los reforzados con fibras de vidrio, y se expone sus aplicaciones actuales, orientadas principalmente al sector automotriz. Se hace referencia a los resultados obtenidos por otros autores en estudios concernientes a los compuestos con fibras celulósicas. Adicionalmente, se estudian las características principales del polipropileno, y las técnicas de procesamiento comúnmente usadas en los materiales compuestos.

En el tercer capítulo se describe el procedimiento experimental empleado en este trabajo, y se establecen los objetivos y el alcance del presente proyecto. Se presentan las principales características de los materiales utilizados, se listan los equipos y se describen en detalle las técnicas empleadas a lo largo de todo el estudio experimental. Se presenta la estrategia metodológica organizada en tres etapas, y se describen las pruebas realizadas en cada una de ellas.

En el cuarto capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en el trabajo experimental. Se exponen los resultados concernientes a las tres etapas del proyecto: procesabilidad de la matriz PP, formulación del compuesto y optimización de los parámetros de procesamiento mediante moldeo por compresión. La discusión se centra en explicar el comportamiento mecánico de los materiales estudiados, PP-abacá. Se comparan los efectos de las distintas formulaciones y de las combinaciones entre los distintos parámetros de procesamiento.

En el quinto capítulo se dan conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos en el procedimiento experimental, y se señala además el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto.

CAPITULO 1

FIBRAS NATURALES

En este primer capítulo se presenta una revisión general de las principales características de las fibras vegetales, describiendo su composición química, sus propiedades y sus usos tradicionales y no tradicionales. De manera específica se estudia a la fibra de abacá, detallando su producción, tipos y calidades, su importancia en el Ecuador, sus propiedades y aplicaciones.

1.1. FIBRAS NATURALES

Aun cuando las fibras artificiales son de uso común en la actualidad, la utilización de las fibras naturales en el mundo es tan antigua como los orígenes de las civilizaciones egipcia, griega, indú o china. Así lo demuestra el empleo de especies como por ejemplo el lino, ramio, yute, algodón y otras. Las fibras naturales son aquellas fibras suministradas por la naturaleza. En la Figura 1.1 se presentan algunos ejemplos de fibras naturales de acuerdo a su origen.

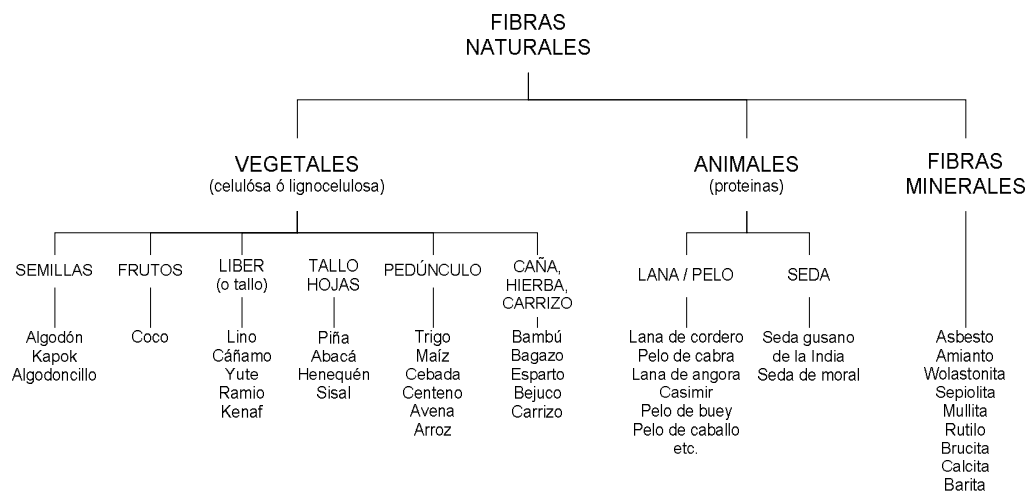


Figura 1.1. Clasificación de las fibras naturales de acuerdo a su origen [Mohanty, 2005].

1.2. FIBRAS NATURALES DE ORIGEN VEGETAL

Como fibras naturales de origen vegetal se entienden los materiales fibrosos que pueden extraerse de las plantas. Las fibras vegetales constituyen el esqueleto de la mayoría de las plantas, ya sean estas plantas anuales o plantas arbóreas madereras. Estas fibras se encuentran en los troncos, en las hojas y en las raíces, y se agrupan en fajos, donde son unidas por pegamentos y resinas naturales. Las fibras están constituidas por celulosa y lignina, además de otros componentes que aparecen en menor cantidad. Por esta razón estas fibras también reciben el nombre de fibras lignocelulósicas.

Dentro de las fibras vegetales se encuentran fibras textiles importantes, las cuales pueden clasificarse en función de la parte de la planta de la cual son extraídas: del tronco, de la hoja y del fruto o la semilla [Corrales, 2002]. Entre las extraídas del tronco están incluidas las fibras de lino, de yute y de kenaf, entre otras. Estas son fibras de celdas delgadas sobrepuestas las unas a las otras, que se encargan de brindar una buena rigidez a la planta. Entre las que son extraídas de las hojas, se incluyen las fibras de sisal, de henequén y de abacá, entre otras. Suelen ser fibras gruesas y fuertes, utilizadas en la producción de cuerdas. Dentro de las que provienen de las semillas y de los frutos hay que destacar las fibras del coco y las de algodón. Esta última es la fibra textil más importante a nivel industrial. La Tabla 1.1 ilustra las principales fibras vegetales.

Tabla 1.1. Principales fibras vegetales [Cadena, 2000].

| Nombre Comercial | Nombre Botánico | Zona Geográfica |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Fibras de los troncos | | |
| Lino | <i>Linum sp.</i> | Zonas templadas |
| Cáñamo | <i>Cannabis sativa</i> | Zonas templadas |
| Yute | <i>Corchorus capsularis</i> | India |
| Kenaf | <i>Hibiscus cannabinus</i> | India, América del Sur |
| Ramio | <i>Bohemeria nivea</i> | China, Estados Unidos |

| | | |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Roselle | <i>Hibiscus sabdarifa</i> | Brasil, Indonesia |
| Sunn | <i>Crotalia juncea</i> | India |
| Urena | <i>Urena lobata</i> | El Zaire, Brasil |
| Fibras de las hojas | | |
| Abacá | <i>Musa textilis</i> | Filipinas, Ecuador |
| Cantala | <i>Agave cantala</i> | Filipinas, Indonesia |
| Henequén | <i>Neoglazioia variegata</i> | Cuba, México |
| Ixtle | <i>Agave fourcroydes</i> | México |
| Mauritos | <i>Furcraea gigantea</i> | Brasil, Venezuela |
| Phornium | <i>Phornium tenax</i> | Argentina, Chile |
| Sansevieria | <i>Sansevieria sp.</i> | África, América del Sur |
| Sisal | <i>Agave sisalana</i> | Haití, México |
| Fibras de las semillas y frutos | | |
| Algodón | <i>Gossypium sp.</i> | Estados Unidos, Asia, África |
| Miraguano | <i>Ceiba pentrandia</i> | Trópicos |
| Nuez de Coco | <i>Cocos nucifera</i> | Trópicos |
| Otras | | |
| Plátano | <i>Musa sapientum</i> | Ecuador, Centroamérica |
| Hierba de Elefante | | África |
| Bambú | Bambusoideae | China |

1.2.1. COMPOSICIÓN DE LAS FIBRAS NATURALES DE ORIGEN VEGETAL

Las condiciones climáticas, edad y procesamiento influyen no solo la estructura de las fibras sino también su composición química. Las fibras naturales de origen vegetal principalmente se encuentran constituidas por celulosa, hemicelulosa y lignina. En la Tabla 1.2 se ilustran las composiciones químicas de varias fibras vegetales, tomadas de varios autores. La cantidad de celulosa determina la resistencia mecánica de la fibra, mientras que la lignina protege a la fibra del medio ambiente, principalmente del agua [Cadena, 2000; Corrales, 2002].

Tabla 1.2. Composición química en porcentaje de algunas de las fibras vegetales más importantes [Mohanty, 2005; Cadena, 2000; Corrales, 2002; López, 2004].

| Fibra | Celulosa (% peso) | Hemicel. (% peso) | Pectina (% peso) | Lignina (% peso) | Extractiva (% peso) | Humedad (% peso) |
|--------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Lino | 71.2 | 18.6 - 20.6 | 2.3 | 2.2 | 6.0 | 8 - 12 |
| Cáñamo | 70 - 74.9 | 17.9 - 22.4 | 0.9 | 3.7 - 5.7 | 3.1 | 6.2 - 12 |
| Yute | 61 - 71.5 | 13.6 - 20.4 | 0.2 | 8.1 - 13 | 1.8 | 12.5 - 13.7 |
| Kenaf | 45 - 57 | 21.5 | 3 - 5 | 8 - 13 | | |
| Ramio | 68.6 - 76.2 | 13.1 - 16.7 | 1.9 | 0.6 - 0.7 | 6.4 | 7.5 - 17 |
| Henequén | 77.6 | 4 - 8 | | 13.1 | | |
| Abacá | 63 - 70.1 | 20 - 21.8 | 0.6 - 1 | 5.7 - 6 | 1.8 | 5 - 10 |
| Sisal | 67 - 78 | 10 - 14 | 10 | 8 - 14 | 1.6 | 10 - 22 |
| Algodón | 82.7 - 92.9 | 2.6 - 5.7 | 2.6 | | 1.9 | 7.85 - 8.5 |
| Miraguano | 64 | 23 | 23 | 13 | | |
| Bambú | 35 - 60.8 | 15 | | 27 - 32.2 | | |
| Coco | 32 - 43 | 0.15 - 0.25 | 3 - 4 | 40 - 45 | | 8 |
| Banana | 63 - 64 | 10 | | 5 | | 10 - 12 |
| Phornium | 71.3 | | | | | |
| Ortiga | 86 | | | | | 11 - 17 |

Las cadenas de celulosa se agrupan en haces paralelos o microfibrillas de 10 a 25 nm de espesor. Las microfibrillas se combinan mediante las hemicelulosas producidas por los dictiosomas, formando una estructura llamada microfibrilla, de hasta medio millón de moléculas de celulosa en corte transversal. La hemicelulosa y la pectina contribuyen a unir las microfibrillas de celulosa, y al ser altamente hidrófilas ayudan a mantener la hidratación de las paredes jóvenes.

Entre las sustancias que se incrustan en la pared celular se encuentra la lignina, molécula compleja que le otorga rigidez. Otras sustancias incrustantes como la cutina y la suberina tornan impermeables las paredes, especialmente aquellas expuestas al aire.

La pared celular vegetal tiene tres partes fundamentales: la pared secundaria, la pared primaria y la laminilla medial. La pared secundaria se forma una vez que se ha detenido el crecimiento celular y se relaciona con la especialización de cada tipo celular; a diferencia de la pared primaria, contiene una alta proporción de celulosa, lignina y/o suberina. La pared primaria está presente en todas las

células vegetales, usualmente mide entre 100 y 200 nm y es producto de la acumulación de 3 o 4 capas sucesivas de microfibrillas de celulosa, tal como se ilustra en la Figura 1.2. Por último, la laminilla media, que es la zona en la que se unen una célula con otra, es rica en pectina y otras sustancias adhesivas [Corrales, 2002; López, 2004].

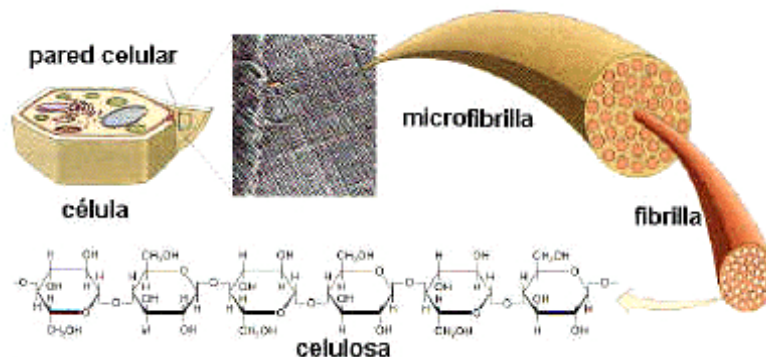


Figura 1.2. Composición de la pared celular [Internet 1].

1.2.1.1. Celulosa

La estructura de la celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucosa a través de enlaces β -1,4-glicosídico, lo que hace que sea insoluble en agua. Es una hexosana que por hidrólisis da glucosa. La celulosa tiene una estructura lineal larga, tal como se ilustra en la Figura 1.3. Su peso molecular es variable, y su fórmula empírica es $(C_6H_{10}O_5)_n$. Contiene una media de 5000 unidades de glucosa, de forma que los hidroxilos de cadenas adyacentes se enlazan a través de puentes de hidrógeno, haciéndolas impenetrables al agua, y originando fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales. La disposición en el espacio de estas unidades y la gran cantidad de puentes de hidrógeno que se dan, le confieren unas propiedades que la hacen muy resistente cuando se somete a cualquier tipo de tensión.

Las moléculas de celulosa se ordenan en filas paralelas denominadas microfibrillas, cada una de las cuales tiene un diámetro entre 5 y 12 μm , y con un contenido de entre 50 y 60 moléculas de celulosa. El ángulo que forman las microfibrillas, y el contenido en celulosa de la fibra determinan generalmente las propiedades mecánicas de las fibras celulósicas [Corrales, 2002].

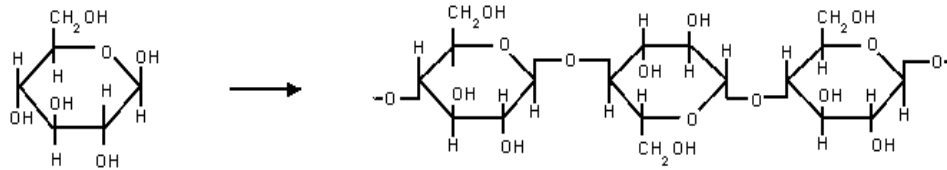


Figura 1.3. Estructura de la celulosa.

1.2.1.2. Lignina

La molécula de lignina es una molécula con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, de polímero amorfo, característico de la lignina.

La lignina es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogenicidad. Por esta razón no es posible describir una estructura definida de la lignina. Sin embargo, se han propuesto numerosos modelos que representan una “aproximación” a dicha estructura, uno de estos se puede ver en la Figura 1.4

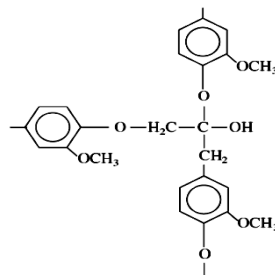


Figura 1.4. Modelo de la estructura de la lignina [Corrales, 2002].

La lignina realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas. Por ejemplo, juega un importante papel en el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos. Proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células vegetales, aumentando la resistencia mecánica de la planta. Los tejidos lignificados resisten el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular. Es térmicamente estable, pero es la responsable de la degradación UV. El contenido de lignina en las fibras influye tanto su estructura como las propiedades y la morfología [Corrales, 2002].

1.2.1.3. Pectina

La pectina es el principal componente enlazante de la pared celular de los vegetales y frutas. Químicamente, es un polisacárido compuesto de una cadena lineal de moléculas de ácido D-galacturónico, las que unidas constituyen el ácido poligalacturónico. La cadena principal que conforma la pectina puede contener regiones con muchas ramificaciones o cadenas laterales, denominadas “regiones densas”, y regiones con pocas cadenas laterales llamadas “regiones lisas”.

La pectina tiene la propiedad de formar geles en medio ácido y en presencia de azúcares. Por este motivo es utilizada en las industrias farmacéutica y alimenticia. En la terapéutica se utiliza como cicatrizante por su capacidad de parar una hemorragia. En la industria alimenticia se utiliza para la elaboración de mermeladas, jaleas y helados. [Corrales, 2002; Internet 1].

1.2.1.4. Hemicelulosa

Esta molécula, que es un polisacárido, forma parte de las paredes de las diferentes células de los tejidos vegetales. Este compuesto varía dependiendo de la edad y variabilidad de las especies cultivadas y mejoradas. La hemicelulosa se caracteriza por ser una molécula con ramificaciones, como lo es el ácido urónico, capaz de unirse a las otras moléculas mediante enlaces que constituyen la pared rígida que protege a la célula de la presión ejercida sobre esta por el resto de las células que la rodean [Corrales, 2002].

1.2.2. FIBRAS NATURALES DE ORIGEN VEGETAL EN EL ECUADOR

Acosta Solís realizó un estudio con el fin de mostrar las fibras vegetales que se utilizan en el Ecuador, calculando que existen no menos de 800 especies y señalando que se utilizan 199 especies vegetales correspondientes a 50 familias botánicas. Según el origen, 73 son árboles, 48 lianas, 19 herbáceas, 18 hemiepífitas, 16 bejucos, 10 venas, 7 arbustos y 3 epífitas. De acuerdo a la parte vegetal utilizada, de 101 especies se utiliza los tallos, de 80 las cortezas, de 35 los frutos, de 34 las hojas, de 33 la raíz, de 10 el pecíolo y de 5 la vaina - xilema.

Las fibras en el Ecuador se utilizan para los siguientes usos: 132 especies para cuerda, 50 en cestería, 36 en textiles y braceras, 25 para artesanías, 7 para esponjas, 4 para cerbatanas de indígenas (pucunas), 2 en escobas, redes, cedazos, encender fuego, embalajes y papeles y 1 en muebles, limpiadores, agujillas y columpios [Acosta, 1971].

1.2.3. UTILIZACIÓN DE FIBRAS VEGETALES COMO REFUERZO EN MATERIALES COMPUESTOS

Las regulaciones de los gobiernos y el creciente sentido ambientalista en todo el mundo han exigido el diseño de materiales que cumplan con su función y que además sean amigables con el medio ambiente. Por ésta y otras razones, el uso de fibras naturales y en especial las vegetales como refuerzo de plásticos se ha incrementado drásticamente en los últimos años.

El interés actual que se tiene en el uso de las fibras vegetales también viene dado por las muchas ventajas que poseen en comparación con las fibras tradicionales. La Tabla 1.3 presenta algunas ventajas que poseen las fibras vegetales en comparación con las de vidrio, que son las más utilizadas en materiales compuestos.

Tabla 1.3. Comparación entre fibras vegetales (FV) y fibra de vidrio [Wanbua, 2003].

| | Fibra Vegetales | Fibra de vidrio |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| Densidad | Baja | Doble que las FV |
| Costo | Bajo | Bajo, mayor a las FV |
| Renovable | Si | No |
| Reciclable | Si | No |
| Consumo de energía | Bajo | Alto |
| CO ₂ neutro | Si | No |
| Abrasión a máquinas | No | Si |
| Riesgo a la inhalación | No | Si |
| Eliminación | Biodegradable | No biodegradable |

Aunque las propiedades mecánicas de las fibras vegetales son inferiores a las que presenta la fibra de vidrio, las propiedades específicas son muy competitivas. Inclusive las fibras vegetales son un 50% más livianas que las de vidrio y en general menos costosas. La Tabla 1.4 presenta algunas de las propiedades de fibras vegetales en comparación con las sintéticas de vidrio.

Tabla 1.4. Comparación entre diferentes propiedades de las fibras vegetales y fibra de vidrio [Mohanty, 2005; López, 2004; Wanbua, 2003; Cadena, 2000].

| Fibras | Densidad (g/cm³) | Resistencia Tensión (MPa) | Módulo (GPa) | Elongación Fractura (%) | Absorción de Humedad (%) |
|---------------|--|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Vidrio – S | 2.5 | 2000-3500 | 70 | 2.5 | --- |
| Vidrio – E | 2.5 | 4570 | 86 | 2.8 | --- |
| Aramida | 1.4 | 3000-3150 | 63-67 | 3.3-3.7 | --- |
| Carbón | 1.4 | 4000 | 230-240 | 1.4-1.8 | --- |
| Cáñamo | 1.4 | 690 | 35 | 1.6 | 8 |
| Yute | 1.3 | 393-773 | 26.5 | 1.5-1.8 | 12 |
| Ramio | 1.5 | 400-938 | 61.4-128 | 3.6-3.8 | 12-17 |
| Coco | 1.2 | 175-220 | 4-6 | 15-30 | 10 |
| Sisal | 1.5 | 511-635 | 9.4-22.0 | 2.0-2.5 | 11 |
| Abacá | 1.30 | 400-1289 | 45 | 2.7 | 8 - 10 |
| Lino | 1.5 | 345-1035 | 27.6 | 2.7-3.2 | 7 |
| Algodón | 1.5 | 393-773 | 26.5 | 7-8 | 8-25 |

Las diversas investigaciones que se han realizado con el fin de reemplazar la fibra de vidrio por fibras de base celulosa han permitido su uso en muchas aplicaciones. Un ejemplo de esto se da en la industria automotriz, en donde muchos componentes, tales como paneles frontales, cubrepuestas, espaldares, etc., que utilizaban la fibra de vidrio, actualmente son fabricados con fibras vegetales. En el apartado 2.7 del presente proyecto se exponen más en detalle las aplicaciones automotrices de los compuestos reforzados con fibras vegetales

Según un estudio realizado por el gobierno del Reino Unido en el año de 1999 [Ellison, 2000], respecto de los usos y aplicaciones potenciales de la fibra vegetal en el mercado automotriz, se conoce que no menos de 50 millones de vehículos producidos al año utilizan alrededor de 20 kg de fibra vegetal cada uno, con lo cual, se estima que para cada nuevo modelo se requerirá entre 1000 y 3000

toneladas de fibra vegetal por año. Actualmente, se emplea más de 15000 toneladas de fibra vegetal por año en la industria automotriz solamente de Europa. [Mohanty, 2005; Leão, 1997].

Si bien en un inicio el refuerzo de los componentes automotrices se realizaba principalmente con fibras de yute y de sisal, en la actualidad su uso está siendo remplazado por fibras de lino, cáñamo y kenaf a gran velocidad, debido principalmente a que estas fibras poseen una combinación excelente de condiciones económicas y propiedades funcionales. El uso de las fibras de cáñamo y lino en compuestos llega a cerca del 85% del mercado automotriz.

En general, la mayoría de los beneficios para el medio ambiente de los compuestos de fibras naturales se acumulan durante la fase de utilización. La reducción de peso de las partes utilizadas en aplicaciones automotrices contribuye a la protección del medio ambiente más en cuanto a un ahorro de combustible que en cuanto al ahorro de energía en la fase de manufactura de las partes. Si se desea la misma resistencia mecánica, talvez no es ventajoso el utilizar fibras lignocelulósicas frente a fibras de vidrio en un compuesto, debido a que se precisan elementos constructivos más pesados. No obstante, si se requiere la misma rigidez, la fibra lignocelulósica puede ofrecer elementos constructivos más ligeros, debido a su rigidez específica más alta. Sin embargo, cabe recalcar que la magnitud de las ventajas para el medio ambiente depende del tipo de aplicación. En conclusión, el beneficio para el medio ambiente de utilizar este tipo de compuestos se debe normalmente a un efecto secundario, como el ahorro de peso, y no al origen 'verde' de las fibras [Moir, 2004].

1.3. FIBRA DE ABACÁ

El abacá o cáñamo de manila (*musa textilis*) es una planta herbácea que pertenece a la familia de las Musáceas. Su apariencia es muy similar al banano, pero es completamente diferente en sus propiedades y usos. El abacá y las otras mezclas de cáñamo, con diferentes niveles de calidad y resistencia, se producen y comercializan exitosamente en varios países.

El abacá crece en lugares con características agro-ecológicas especiales. Así, se produce mejor en un clima tropical, donde la temperatura anual promedio fluctúe entre 22 y 28°C, combinada con una caída de lluvia natural que varíe entre 1800 y 2500 mm distribuidos uniformemente durante el año. En otras palabras, donde el calor y la humedad prevalecen todo el año.

El abacá tiene varios usos. Al ser las fibras particularmente resistentes al agua salada, a través de los años se ha usado para fabricar redes de pesca. El uso principal de la fibra de abacá es para la producción de bolsas de té y envolturas de embutidos. Adicionalmente, se considera una excelente materia prima en la elaboración de papel de seguridad y de alta calidad, papel moneda, pañales, servilletas, papel higiénico, filtros para maquinaria, textiles para hospitales, paneles de vehículos y cables de conducción eléctrica, entre otros 200 diferentes productos [CADE].

1.3.1. PRODUCCIÓN Y CULTIVO DEL ABACÁ EN EL ECUADOR

El abacá tiene un ciclo de producción perenne. Al principio, le toma de 18 a 24 meses el producir, y después el producto se puede cosechar cada dos o tres meses. Un suelo apto para la producción favorable de abacá debe tener las siguientes características: alta fertilidad natural, ser predominantemente aluvial o volcánico, tener un alto porcentaje de materia orgánica dentro de su composición, retener la humedad pero sin inundarse durante algunas semanas en épocas lluviosas, poseer un alto contenido de potasio (suelo de tipo arcilloso). La humedad y la luz solar son dos factores esenciales para la producción de abacá.

Según la información obtenida en el III Censo Nacional Agropecuario (III CNA), llevado a cabo en el año 2000, el Ecuador cuenta con 14800 hectáreas de cultivo de abacá, las cuales se encuentran geográficamente concentradas en un triángulo formado por las provincias de Pichincha, Esmeraldas y Manabí. Las principales zonas productoras son La Concordia (39%) y Santo Domingo (36%).

Actualmente se cree que existen alrededor de 10500 hectáreas de este cultivo. Entre los principales motivos de la disminución del área cultivada están los bajos

precios pagados al productor, la dependencia del mercado exterior ya que en el país no existe industria para integrar verticalmente la producción de abacá, y la falta de una normativa que aliente el cultivo de productos biodegradables.

La producción y comercio del abacá constituye una forma de ganarse la vida para más de 21000 personas, lo cual corresponde a 5000 familias (incluyen a los propietarios). En todo el país se estima que existen 5200 jornaleros y/u obreros dedicados al cuidado del cultivo y a labores de cosecha (1 obrero por cada 2 hectáreas). Existen también 130 obreros indirectos, los cuales incluyen a comerciantes, transportistas y personal administrativo de empresas de exportación.

El ingreso obtenido en el Ecuador por las ventas al exterior de abacá fue, para los primeros cinco meses del año 2006 de 3166 millones de dólares FOB. Comparando igual período para el año 2005, se observa un pequeño aumento del 0.5%. Sin embargo, en comparación con los años anteriores, se observa una disminución en las exportaciones. Más aun, si se compara las exportaciones de la década actual con la pasada, ambas mostradas en la Figura 1.5, se puede observar una importante disminución, ratificando la problemática que actualmente sufre la fibra del abacá en el mercado mundial.

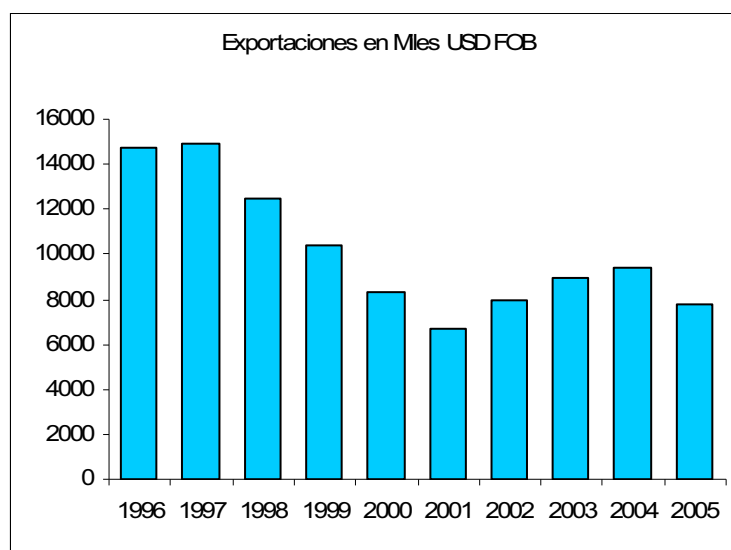


Figura 1.5. Exportaciones de la fibra de abacá en miles de USD FOB (free on board).

Fuente: Banco Central del Ecuador.

El nivel máximo de productividad de fibra de abacá en el Ecuador se da en Esmeraldas, con 3.4 Tm/ha. Sin embargo, a nivel nacional la productividad es de 1.2 Tm/ha, puesto que esto depende del tipo de planta que se esté manejado y de la edad de la misma.

De los datos obtenidos en el III CNA (censo nacional agropecuario), el 95.5% de las plantaciones con abacá se encuentran en propiedades individuales. Del total de los productores de abacá, solo el 26% pertenece a algún gremio, centro de productores o cooperativa que los agrupa. De ellos, el 77% recibe asistencia técnica, principalmente en la comercialización de la producción.

El 82% de las personas que cultivan abacá son dueños del terreno donde se realiza la plantación y el 71 % de estas viven en la misma unidad de producción agropecuaria. Del total de productores agropecuarios que cultivan abacá, el 89% obtiene sus principales ingresos de la explotación agropecuaria, y manejan más del 92% de la superficie plantado con abacá. En cuanto al tipo de comprador al que los productores venden su producción, los intermediarios abarcan el 54% del destino primario de la mercancía, la exportación le sigue en importancia con un 30%, mientras que el 16% se dirige a los procesadores de esta fibra. Las exportaciones están manejadas por tan solo 5 compañías: CADE (33.91%), Furukawa (30.59%), Chiriboga (20.78), Evans (13.28%) y Abaudesa (1.45%) [Junovich, 2002].

1.3.2. TIPOS Y CALIDADES

La planta de abacá puede llegar a crecer más de 7 metros de altura y se puede encontrar en diferentes variedades. Aun así, no todas se cultivan comercialmente. Las variedades que han sido tradicionalmente cultivadas en el Ecuador son:

- Bungalanon: Es una variedad precoz que produce buena fibra, tiene un menor desarrollo como planta, se caracteriza por tener tallos más pequeños y delgados, lo cual la hace más fácil de manejar y acarrear. Su producción empieza a los 18 meses y crece hasta el punto de mostrar de 30 a 60 tallos por mata. Es la variedad que más se siembra en el país.

- Tangongón: Esta variedad tiende a desarrollarse más lentamente que las otras, generalmente demora de 20 a 24 meses antes de que se desarrolle una flor o tallo maduro, crece bien en terrenos en los que las otras variedades no se adaptan. Los tallos son de mayor diámetro y longitud. Se caracteriza por producir una fibra ordinaria pero con excelente resistencia.
- Maguindanao: Presenta un tipo de hoja más grande y fuerte, puede mostrar un tallo maduro y con flores en un tiempo tan corto como 15 meses después de que aparece el primer retoño. Produce de 15 a 20 tallos por mata, su fibra es más blanca, suave y brillante.

Otro sistema de clasificación de la fibra de abacá está basado principalmente en su color y la medida del diámetro. Esta clasificación tiene 5 y algunas veces 6 grados de calidad. En el Ecuador se la ha clasificado en 5 calidades dependiendo principalmente de la posición que ocupan en el tallo (seudo tallo); es decir, por su color. Las fibras que se encuentran en la parte externa son de color café oscuro y se consideran grado 5, mientras que las del interior del tallo son casi blancas y se consideran grado 1. La regla para medir la calidad basada en el diámetro de la fibra es simple: mientras más delgada, mejor.

La calidad de la fibra también se ve afectada por la condición de los tallos, tallos inmaduros o sobre maduros reducen la calidad de la fibra así como también demoran su proceso de extracción.

En la planta de abacá se puede encontrar cada una de las calidades de acuerdo a la siguiente distribución: 2% de primera, 20% de segunda, 23 % de tercera, 28 % de cuarta y 27 % de quinta calidad.

Aunque el Ecuador exporta fibra de grado 2 a grado 5, la mayor demanda global es de grado 3 y 4. La fibra de abacá tiene varios usos de acuerdo a su calidad. La fibra de mejor calidad es usada para producir papel. La fibra de menor calidad es usada en la producción de bolsas de té, envolturas de salchichas, envoltura de pañales, papel higiénico, servilletas, filtros de maquinaria, ropa de hospital, etc.
[CADE]

1.3.3. PROPIEDADES

La palabra “cáñamo” se utiliza como término genérico para todas las fibras largas que contienen una fibra llamada "estopa". El abacá es una fibra dura, fuerte y flexible, lo que le hace enteramente diferente del cáñamo verdadero que es una fibra suave. Tiene baja acidez natural, las células individuales de cada fibra son cilíndricas y de superficie lisa, miden alrededor de 6 mm de largo, y de 18 a 27 μm de diámetro [Cook, 1982].

La planta del abacá crece lanzando tallos de la raíz o vástago principal, el cual tiene una altura de 2.7 a 3.5 m y 7.5 cm de espesor. La planta una vez madura consta de 12 a 30 tallos que crecen del sistema central de raíz. Cada uno de estos tallos mide cerca de 3.5 a 6 m de largo y de 10 a 20 cm en la base, siendo esta la fuente de las fibras. El tallo tiene varias hojas que se extienden de 1 a 2.5 m de largo, de 10 a 20 cm de ancho, y 10 mm de espesor en el centro. En su totalidad la planta tiene una altura de 3 a 4.5 m. Se requiere inicialmente de 2 a 4 años para que la planta del abacá madure. Sin embargo, después de la primera cosecha, el abacá está listo para ser cosechado nuevamente luego de que hayan transcurrido entre 4 y 8 meses [Cook, 1982; CADE].

Según la caracterización de las fibras de abacá que se realizó en el proyecto de titulación de Morejón y Narváez [2004], el diámetro de las fibras está entre 151.4 y 284 μm , para todas las calidades estudiadas (calidad 2, 3, 4 y 5). En cuanto a las propiedades mecánicas y físicas de esta fibra se tiene los siguientes datos:

- Esfuerzo último a la tracción (MPa): 774.7 – 1261.3
- Módulo (GPa): 18.5 – 37.2
- Deformación unitaria (%): 3.10 – 4.27
- Absorción de agua (%): 8 – 10
- Densidad (g/cm^3): 1.3

Estos valores se encuentran dentro de los rangos dados por otros autores para las mismas propiedades de la fibra de abacá, tal como se vio en la Tabla 1.4.

Químicamente las fibras de abacá están conformadas por [Cadena, 2000]:

- Celulosa (%): 63 – 70.1
- Hemicelulosa (%): 20 – 21.8
- Pectina (%): 0.6
- Lignina (%): 5.7 – 6
- Extractiva (%): 1.8

Sin embargo, según reportes del CADE, la fibra de abacá del Ecuador posee un porcentaje de celulosa de entre 70 a 80%.

1.3.4. APLICACIONES

El abacá tiene múltiples usos. En países como Japón, Estados Unidos e Inglaterra, que son los mercados de exportación de Ecuador, se fabrican papeles de seguridad y especial, recubierta de embutidos, filtros, fibras, textiles, cordelería, etc. En Brasil y Alemania se inició la producción de piezas de paneles de vehículos y en Colombia se industrializa la fibra para la construcción, cordelería y costales, que se exportan al Ecuador [CADE].

A continuación se presentan algunas de las aplicaciones de la fibra de abacá:

- Puesto que las fibras de abacá son particularmente resistentes al agua salada, se utiliza en gran parte para la fabricación de cabos marinos, razón por la cual esta fibra llega a tener carácter de materia prima estratégica para los Estados Unidos y Japón. Asimismo, se usa para la fabricación de redes de pesca.
- El principal uso de la fibra de abacá es la producción de bolsas de té y envolturas de embutidos. Por este motivo la demanda global más grande es de grado 3 y 4.
- En el Ecuador, y principalmente en Filipinas, se ha dado diversos usos artesanales a la fibra, tales como la fabricación de alfombras, muebles, esterillas, persianas, individuales de mesa, sombreros, zapatillas de tipo de alpargata, abanicos, adornos, cinturones, corbatas e incluso vestidos.
- Entre los nuevos usos para la fibra de abacá está la fabricación de papeles de diversos tipos, entre los que se cuenta papel de seguridad (muy difícil de alterar) y el papel para la fabricación de billetes. Además, aunque con poca

difusión, en algunos países se utiliza para la producción de piezas de paneles de vehículos, tal como se refirió anteriormente [CADE; Morejón y Narváez, 2004; Internet 2].

A continuación en la Figura 1.6 se muestra algunas imágenes de las aplicaciones de la fibra de abacá.

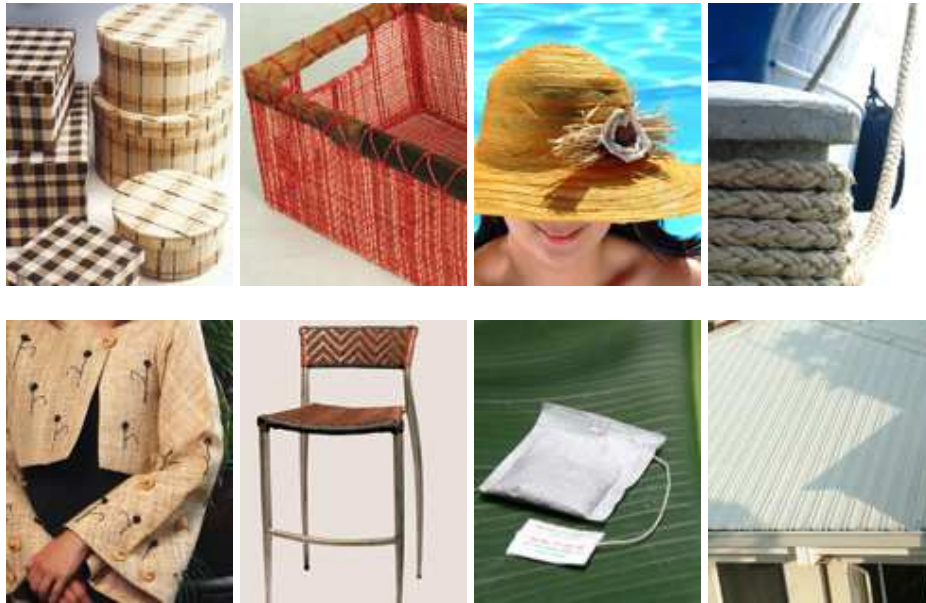


Figura 1.6. Algunas aplicaciones del abacá [Internet 2].

CAPITULO 2

COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES

En este capítulo se presenta una revisión general de los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales, detallando sus ventajas y desventajas en comparación con materiales compuestos tradicionales como los reforzados con fibras de vidrio, y se hace referencia a los resultados obtenidos por otros autores en estudios concernientes a los compuestos con fibras celulósicas. Posteriormente, se estudian las características principales del polipropileno PP, y las técnicas de procesamiento comúnmente usadas en los materiales compuestos. De igual manera, se exponen las aplicaciones actuales de los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales, orientadas principalmente al sector automotriz.

2.1. MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se fabrican combinando dos o más materiales, que se diferencian en función, forma o composición a escala macroscópica, con el fin de obtener un material con propiedades únicas. En este material destacan una o más propiedades características aportadas por las fases constituyentes, de tal forma que del conjunto resulte la mejor combinación posible.

Los materiales compuestos más utilizados son aquellos que están constituidos por dos fases diferentes a nivel molecular y separable mecánicamente, conocidas como material aglutinante (matriz) y material de refuerzo (fibra o partícula). La matriz dentro de los materiales compuestos cumple las funciones de juntar las fibras y transferirles la carga, proveer la forma a una estructura, aislar una fibra de otra de modo que la propagación de grietas se detenga o su velocidad se reduzca, proveer acabado superficial de buena calidad, proteger a las fibras del

ataque químico y del daño mecánico (desgaste), proveer propiedades tales como tenacidad, resistencia al impacto, etc. Como matriz normalmente se utilizan polímeros o metales ligeros. En este trabajo nuestro interés se limita a la utilización de polímeros en calidad de matrices.

Dentro de las matrices poliméricas, existe una subdivisión que se basa en la respuesta mecánica frente a temperaturas elevadas: las matrices poliméricas termoplásticas y las termoestables. Las termoplásticas se ablandan al calentarse (a veces se funden) y se endurecen al enfriarse (estos procesos son totalmente reversibles y pueden repetirse). Las termoestables se endurecen al calentarse y no se vuelven a ablandar. [Guerrero, 2004; MasPOCH, 1995]

Los materiales de refuerzo son añadidos a la matriz polimérica con el fin de modificar y/o mejorar las propiedades del compuesto, así como también para obtener una considerable reducción en su costo. Los materiales de refuerzo pueden ser:

- Partículas.- Algunas de las partículas inorgánicas frecuentemente incorporadas a los materiales plásticos son: talco, pigmentos, sílice, arena, grafito, carbonato cálcico, microesferas sólidas o huecas de vidrio, etc. Las partículas como material de refuerzo permiten hacer dos tipos de compuestos: los dispersoides y los particulados. Los dispersoides son materiales endurecidos por dispersión y contienen partículas de 10 a 250 nm de diámetro. En el caso de matrices metálicas, estas partículas bloquean el movimiento de las dislocaciones y producen un marcado endurecimiento del material matriz. Los particulados contienen grandes cantidades de partículas gruesas y son diseñados para obtener propiedades poco usuales, dejando en un segundo plano la resistencia del material. Ciertas propiedades de un compuesto con partículas dependen solo de sus constituyentes. Según la carga añadida se puede modificar el color, la conductividad, la lubricidad, la estabilidad dimensional, la estabilidad térmica, se reducen las contracciones en el molde, o mediante la adición de microesferas huecas se varía la densidad [MasPOCH 1995].

- Fibras.- Las fibras así como sus productos como hilos, cordones y cintas, son ampliamente usadas como materiales de refuerzo en los compuestos en ingeniería. Por lo general, este tipo de compuestos consiguen mayor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas, aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material matriz transmite la carga a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada, por ende la resistencia más alta del compuesto está a lo largo del eje de la fibra. Esta fibra de refuerzo puede ser de origen sintético o natural. La mayor parte de compuestos producidos en la actualidad son reforzados con fibras sintéticas tales como vidrio, carbón y asbesto. Sin embargo, preocupaciones ambientales y los precios altos del petróleo han llevado a intensificar las investigaciones referentes al uso de las fibras naturales como refuerzo. La forma de la fibra se selecciona dependiendo del tipo de aplicación y el método de manufactura. Estos compuestos pueden ser de fibra continua o de fibra corta, como se puede ver en la Figura 2.1. [MasPOCH, 1995; Jayaraman, 2003; Internet 3].

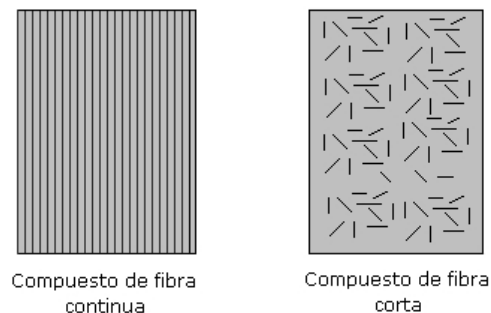


Figura 2.1. Compuestos reforzados con fibra [Guerrero, 2004].

La posibilidad de tener un sinnúmero de combinaciones entre matrices y materiales de refuerzo o disposiciones de fibra, permite la obtención de compuestos con propiedades muy especiales que se adaptan a los distintos requerimientos de diseño. Estos compuestos se pueden distinguir en función de su tipología (fibras cortas o largas, continuas o cortas, orientadas o con disposición aleatoria, laminados una sola capa o multicapa, etc.), o bien en función del tipo de sustancias componentes. En la Figura 2.2, se muestra una breve clasificación de los diferentes tipos de compuestos según su refuerzo.

| | |
|------------------------------|---|
| Fibra larga y continua | Fibra orientada unidireccional |
| | Fibra orientada bidimensionales (tejido, <i>mat</i> cosido) |
| | Fibra orientada tridimensional (tejido 3-D, cosido 3-D) |
| | Orientación aleatoria (<i>mat</i> de hilo continuo) |
| Fibra discontinua | Orientación aleatoria (<i>mat</i> de hilo troceado) |
| | Orientación predominante |
| Partículas y <i>whiskers</i> | Orientación aleatoria |
| | Orientación predominante |

Figura 2.2. Clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzo [Mayugo, 2003].

2.2. COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES

Las diversas investigaciones que se han venido realizando con el fin de reemplazar el uso de las fibras de origen sintético por fibras de base celulosa han permitido la creación de una nueva clase de materiales denominados “compuestos verdes” (*green composites*). Estos son compuestos constituidos por una matriz polimérica y una fibra vegetal como elemento de refuerzo. Su desarrollo y utilización se inició alrededor de 1980 [Corrales, 2002; Leão, 1997]. El primer trabajo de investigación que se ha podido encontrar sobre este tema data de 1973 (Paramasivam et. al.), y trata la fabricación de compuestos epoxy – sisal. La mayoría de las investigaciones utilizan las fibras vegetales con matrices termoestables. Sin embargo, las investigaciones más recientes se orientan hacia el empleo de matrices termoplásticas.

2.2.1. COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE

Los materiales compuestos termoestables están formados por una matriz polimérica que endurece bajo la acción del calor y presión, y por la fibra que actúa como refuerzo. Una vez conformado, este tipo de compuesto ya no se puede remoldear o ablandar, puesto que su endurecimiento es irreversible por haber sufrido una modificación en su estructura química y a nivel molecular.

Los termoestables son comparables a la arcilla, que una vez endurecida con el calor (cocida), adquiere su forma definitiva. Las cadenas de estos polímeros suelen formar mallas de estructura reticulada en cualquier dirección, lo que les proporciona rigidez y fragilidad. Los termoestables son los más comúnmente usados en la producción de compuestos. Su estado líquido antes del curado los hace idóneos para la producción de compuestos con fibras largas. Los termoestables más usados como matriz son el poliéster, el epoxy y las poliamidas. [Corrales, 2002; Cadena et al., 2000]

Existe una gran cantidad de investigaciones publicadas en el campo de los compuestos termoestables. En algunas publicaciones, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas, de resistencia al medio ambiente, y a la unión entre la fibra y la matriz, se han propuesto algunas modificaciones, entre estas:

- Tratamientos alcalinos de la fibra (Prassad, 1983)
- Recubrimiento metálico de la fibra (Pavithran, 1981)
- Injerto de la fibra (Nagaty et al, 1979; Mukherjea et al, 1983; Mansour, 1993; Ghosh y Ganguly, 1993).

La Tabla 2.1 contiene algunas propiedades mecánicas de diferentes compuestos, obtenidas por sus actores.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de materiales compuestos con matriz poliéster reforzados con fibras vegetales sin tratamiento [Cadena et al., 2000; Rong et. al, 2001].

| Materiales | Módulo (GPa) | Esfuerzo Ruptura (MPa) | Resistencia Impacto (kJ/m²) |
|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---|
| Poliéster | 1.75 | 41.60 | 9.3 |
| Sisal (25%) / Poliéster | 1.90 | 34.35 | 30.0 |
| Coco (25%) / Poliéster | 1.40 | 14.10 | 11.1 |
| Banano (25%) / Poliéster | 2.34 | 43.25 | 10.0 |
| Vidrio (30%) / Poliéster | 2.71 | 55.65 | 45.0 |
| Sisal (58%) / Epoxy | 8.85 | 350 | |

2.2.2. COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA

Los materiales compuestos termoplásticos son aquellos en los que la matriz polimérica está constituida por un polímero termoplástico, el cual presenta una estructura molecular lineal o muy poco ramificada, que al ser sometida a la acción del calor se funde y solidifica rápidamente al enfriarse por contacto con el aire o con las paredes del molde en que se esté calentando. Los termoplásticos pueden ser fundidos más de una vez, pero si se los funde en demasiadas ocasiones se puede causar degradación. El calor les da plasticidad y fluidez, sin que exista modificación química. Se pueden inyectar a presión en un molde determinado, adoptando la forma de la cavidad del molde, se pueden laminar, etc.

Los termoplásticos ofrecen algunas ventajas en comparación con los termoestables. Entre estas está el bajo costo del procesamiento. Las matrices termoplásticas originan materiales de baja densidad, bajo impacto ambiental y de buenas propiedades. Estas características las hacen aptas para el uso en el mercado automotriz, puesto que pueden proporcionar una buena apariencia externa, un buen aislamiento acústico, un producto final inodoro y resistencia al envejecimiento. Los polímeros termoplásticos utilizados como matriz en compuestos incluyen entre otros: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliuretano (PU) y poli cloruro de vinilo (PVC).

El procesamiento de los compuestos termoplásticos básicamente se lo hace mediante mezclas en solución o utilizando técnicas de derretimiento como la extrusión y moldeo por inyección. Esto limita la fabricación de compuestos de fibra continua y favorece la utilización de aquellos termoplásticos cuyos puntos de fusión son relativamente bajos, con el fin de evitar la degradación de la fibra.

La mayor cantidad de investigaciones se orientan a determinar los efectos que tienen las modificaciones en la interfaz fibra - matriz sobre las propiedades finales del compuesto. Muchos trabajos tratan de desarrollar nuevas técnicas de procesamiento que minimicen la degradación de la fibra. A continuación, en la Tabla 2.2, se ilustran algunos resultados obtenidos en investigaciones realizadas por diferentes autores en cuanto a propiedades mecánicas.

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de materiales compuestos con matrices termoplásticas reforzados con fibras vegetales, máximos obtenidos [Wambua et al, 2003; Cadena et al., 2000; Morejón y Narváez, 2004; P.V. Joseph et al, 1998; Herrera y Valadez, 2005].

| Materiales | Módulo (MPa) | Esfuerzo último tensión (MPa) | Elongación (%) |
|-------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Sisal (20%) / PP | 1630.8 | 36.5 | 8.33 |
| Sisal (40%) / PP | 716.4 | 38.7 | 8.56 |
| Kenaf (50%) / PP | 7200 | 62.0 | |
| Kenaf (30%) / PP | 6900 | 29 | |
| Cabuya (20%) / PE | 167.2 | 11.48 | 33.3 |
| Abacá (20%) / PE | 251.8 | 13.17 | 34 |
| Abacá (30%) / PP | 1185.6 | 33.2 | 11.8 |
| Cañamo (30%) / PP | 6800 | 52 | |
| Yute (30%) / PP | 3100 | 28 | |

2.3. PROPIEDADES DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES

Las propiedades mecánicas de los polímeros reforzados con fibras vegetales no solo dependen de las propiedades intrínsecas de sus componentes, sino también de factores como la adhesión fibra – matriz, de las propiedades de la interfaz, la relación longitud – diámetro de las fibras, la disposición geométrica u orientación de las mismas, de la fracción de volumen o peso de fibra y matriz, e incluso del proceso de conformado [Herrera y Valadez, 2005; P.V. Joseph, 1998].

2.3.1. ADHESIÓN FIBRA-MATRIZ

En los compuestos, tanto la fibra como la matriz deben cooperar para obtener un sistema efectivo contra las exigencias de carga a las cuales se somete a los materiales. Esta cooperación entre fibra y matriz no existiría sin la presencia de una región conocida como interfaz o intercara. La interfaz actúa como una “atadura” y transfiere la carga entre la matriz y la fibra de refuerzo.

Adicionalmente, gracias a que cada fibra forma una interfaz individual con la matriz, el área total es muy grande. Es por eso que la interfaz juega un rol clave en el control de las propiedades mecánicas del compuesto.

La adhesión entre las fibras de refuerzo y la matriz polimérica puede ser atribuida a una serie de mecanismos que se pueden dar en la intercara, ya sea como fenómenos aislados o con interacción entre ellos. Entre los mecanismos más importantes se tienen [López, 2004]:

- Adhesión mecánica

Debido a las formas irregulares de la superficie de una fibra y de la matriz polimérica en estado viscoelástico, se puede lograr la difusión de las fibras en el polímero si su grado de fluidez y de mojabilidad es elevado, de tal forma que pueda alcanzar a la mayor parte de la superficie de la fibra y se llegue a establecer un buen grado de unión de carácter mecánico entre ambas. La limpieza exterior de las fibras, la eliminación de residuos vegetales, de tierra y polvo, junto con la temperatura del polímero, y su mejor estado viscoelástico, contribuirán notablemente a mejorar el grado de la adhesión mecánica.

- Atracción electrostática

Estas fuerzas aparecen como consecuencia de la posible carga eléctrica entre ambas superficies. La fuerza de la intercara dependerá de la densidad de carga iónica. Aunque la atracción electrostática no haga una contribución principal a la resistencia final de la unión, si que puede afectar al proceso inicial facilitando la operación de difusión de las fibras en la matriz.

- Interdifusión

La fuerza de la unión entre fibras y polímero dependerá del grado de enmarañamiento molecular y del número de moléculas implicadas. La interdifusión puede ser promovida por la presencia de agentes plastificantes y disolventes, dependiendo del grado de difusión de la concentración molecular, de los constituyentes que intervengan y en la facilidad de movimiento molecular. El

proceso de la interdifusión puede explicar la razón por la cual las fibras previamente recubiertas de polímero se adhieren a la matriz de polímero.

- Enlace químico

Se forma un enlace químico entre un grupo químico de la superficie de la fibra y un grupo químico compatible de la matriz. La fuerza de la unión dependerá del número y tipo de enlaces. Un fallo en las superficies de contacto, implica la rotura de los enlaces.

Como se puede observar, la adhesión interfacial es resultado de una buena cobertura por parte de la matriz en las fibras así como por la formación de enlaces químicos entre ambas superficies. Pero esta intercara se ve afectada por una delgada capa de ceras y grasas presente en la superficies de las fibras vegetales, además de la existencia de un cierto grado de antagonismo entre los dos materiales, ya que las fibras tiene un marcado carácter hidrofílico, mientras que los polímeros poseen un carácter hidrofóbico [Wambua et al, 2005; Jayaraman, 2003; López, 2004].

Esta situación hace que una parte importante de las investigaciones se centren en mejorar la compatibilidad y lograr la mejor unión fibras - matriz en su zona de intercara. Si queremos aprovechar la gran resistencia y rigidez de la fibras, estas deben estar fuertemente unidas a la matriz.

Se han propuesto métodos físicos y químicos que permiten modificar la superficie de las fibras vegetales. Entre estos tenemos: el tratamiento corona, de plasma frío, la mercerización, la copolimerización de injertos monómeros en la superficie de las fibras, el uso de anhídrido maléico, anhídrido alquil succínico, ácido esteárico, cardanol formaldehído, etc. Se conoce también que el uso de agentes de acoplamiento como silanos, titanatos, circonatos, derivados de triazina, etc., mejoran la adhesión fibra-matriz [Herrera y Valadez, 2005].

X. Li et al investigaron los efectos de cinco tratamientos químicos diferentes de la fibra (álcalis, silano, permanganato de potasio, cloruro de sodio y ácido acrílico) sobre las propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno LLDPE

(polietileno lineal de baja densidad) reforzado con fibras de lino discontinuas. Los cinco tratamientos químicos contribuyen a suavizar y alisar las superficies de las fibras. Se obtuvieron grandes mejoras en cuanto a la resistencia a la tracción en las fibras tratadas al compararlas con aquellas que no se las trató. Sin embargo, estos tratamientos no disminuyeron la absorción de humedad intrínseca de las fibras. El tratamiento con ácido acrílico mostró los mejores efectos al mejorar las propiedades físicas y mecánicas del compuesto Lino – LLDPE, tal como se puede apreciar en la Figura 2.3 [Li et al, 2004].

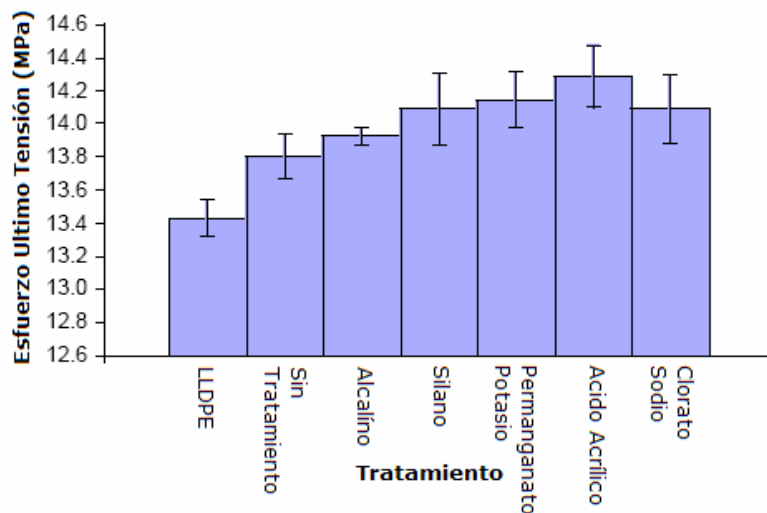


Figura 2.3. Efecto de los diferentes tratamientos químicos sobre esfuerzo último de tensión en compuestos de LLDPE / lino [Li et al., 2004].

Herrera y Valadez estudiaron el comportamiento mecánico de un compuesto cáñamo – HDPE (polietileno de alta densidad), en el cual se alteró la interacción fibra – matriz modificando las propiedades de la superficie de las fibras. Primero se incrementó el área de contacto para exponer las microfibras celulósicas y para mejorar la humidificación y la impregnación de las mismas. Además, se las trató químicamente con silano, como agente de acoplamiento. Los autores señalaron que debido al tratamiento de la superficie se mejoró la adhesión fibra – matriz, logrando disminuir la relación L/d de la fibra de 72 a ~20. También se observó un incremento en las propiedades de tensión y flexión de entre un 3 y un 30%, y se vio que el esfuerzo al corte se incrementó en un 25% [Herrera y Valadez, 2005].

S. Mishra et al [2000] y Gauthier et al [1998] encontraron que es posible disminuir la absorción de humedad de las fibras vegetales del sisal, cáñamo y novolac (fibra del banano) mediante la esterificación de los grupos –OH con anhídrido maléico. Encontraron además que la resistencia a la tracción de estos compuestos de fibras tratadas con anhídrido maléico es mayor que aquellos que no han sido tratados, justificándolo al concluir que la interacción de los grupos hidroxilos con las moléculas –OH produce una adhesión más fuerte entre fibra y matriz.

Kim et al indicaron que el uso del silano como agente de acoplamiento permite una efectiva modificación de la interfase fibra – matriz [Kim et al, 2001]. Valadez et al encontraron que los tratamientos con silano son más efectivos que los que se hacen con álcalis en su estudio con fibras de cáñamo [Valadez et al, 1999]. Este efecto se logra gracias a que las moléculas bifuncionales del silano forman un puente químico entre la superficie celulosa de la fibra y el polímero. La fórmula química del silano en general es X_3Si-R , donde X puede ser cloro, metoxi, etoxy, etc., y R es vinil, amoniopropil, etc. El grupo R reacciona con la resina y el grupo X que se hidroliza y forma un grupo silano en solución acuosa reacciona con el grupo –OH de la celulosa en la fibra.

Tripathy et al señalaron que la delignificación mediante productos decolorantes mejora la unión entre la fibra de yute y el poliéster, mejorando las propiedades mecánicas del compuesto [Tripathy et al, 1999]. Se han investigado otros tratamientos químicos que modifiquen la superficie de las fibras y mejoren la adhesión, entre estos están el tratamiento con isocianatos por Wu et al [1996]; con peróxido de benzol por Sreekala et al [2000], etc.

2.3.2. RELACIÓN LONGITUD – DIÁMETRO DE LAS FIBRAS

La longitud crítica se define como la longitud por debajo de la cual la fibra no tiene suficiente anclaje en la matriz, y ante esfuerzos pequeños será arrancada. Este concepto surge del fenómeno de que si la longitud de las fibras es lo suficientemente larga como para quedar unida a las dos zonas de la matriz que se encuentran separadas por una grieta microscópica, por donde se inicia la rotura, podrán soportar la carga.

La longitud crítica de la fibra está relacionada con su diámetro, de tal forma que, para una misma longitud de fibra, cuanto mayor sea su diámetro más superficie de contacto ofrece y mayor es la posibilidad de anclaje que puede ofrecer a la matriz ante el esfuerzo de tracción. La ecuación (2.1) muestra la relación de la longitud crítica con el diámetro de la fibra [López, 2004].

$$Lc_f = (D_f \times Sut_f) / 2A \quad (2.1)$$

donde:

Lc_f = longitud crítica de la fibra, en mm

D_f = diámetro de la fibra, en mm

Sut_f = esfuerzo último (rotura) de la fibra, en MPa

A = resistencia de la unión entre la fibra y la matriz, o resistencia matriz, en MPa

2.3.3. COMPOSICIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

La fracción en masa de fibra, su orientación y longitud son factores que afectan en gran medida las propiedades mecánicas de los compuestos. En el estudio realizado por Krishnan Jayaraman [2001], se determina que con una fracción en masa de fibra del 28.5% y una longitud de 20 mm se obtienen las mejores propiedades en los compuestos. P.V. Joseph et al [1998], utilizando un método conocido como “melt mixed” (la fibra se añade al PP en estado derretido) publicó que con una longitud de la fibra de 2 mm se obtiene la mejor mezcla de propiedades mecánicas en los compuesto de sisal / PP. Asimismo, demostró que las fibras orientadas longitudinalmente muestran mejores propiedades que las orientadas al azar.

El contenido de las fibras de refuerzo se expresa como fracción del volumen o del peso. Para un determinado grado de condiciones en la interfaz, el contenido del refuerzo determina el grado según el cual se desplazan las propiedades del compuesto, desde las de la matriz hacia las del refuerzo. El volumen crítico está directamente relacionado con la regla de las mezclas, y define el mínimo volumen de fibras que tiene que haber en el compuesto para que su efecto empiece a ser eficaz.

Otro aspecto a tener en cuenta es la orientación de las fibras. Las fibras tienden a ser fuertes solo en una dirección, que es la dirección en la cual están orientadas. Si se aplica una fuerza en dirección perpendicular a la orientación de las fibras, los compuestos tienden a ser débiles. En cambio, al aplicar la fuerza en la dirección axial en relación a las fibras, el compuesto incrementa su resistencia. De todos modos esto no se considera un defecto, puesto que algunas veces solo se quiere que el material compuesto sea fuerte en una dirección.

A continuación se presenta la Tabla 2.3, publicada por P.V. Joseph et al, en la cual se realiza una comparación entre las propiedades mecánicas de tensión de compuestos formados por fibra de sisal y matrices de polipropileno, poliestireno y polietileno de baja densidad, con orientación al azar (A) y longitudinal (L).

Tabla 2.3. Comparación de propiedades de tensión de compuestos con diferentes matrices y diferente orientación [P.V. Joseph et al, 1998].

| Masa Fibra (%) | Matriz | Esfuerzo Tensión (MPa) | | Módulo de Young (MPa) | | Elongación (%) | |
|----------------|--------|------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------|------|
| | | L | A | L | A | L | A |
| 0 | PP | 35 | 35 | 498 | 498 | 15 | 15 |
| | PS | 34.9 | 34.9 | 390 | 390 | 9 | 9 |
| | LDPE | 9.2 | 9.2 | 140 | 140 | 200 | 200 |
| 10 | PP | 36 | 29 | 730 | 695 | 7.82 | 8 |
| | PS | 21.3 | 18.16 | 629 | 516.8 | 9 | 7 |
| | LDPE | 15.6 | 10.8 | 1429 | 324 | 4 | 27 |
| 20 | PP | 39.1 | 31.14 | 971 | 798 | 7.11 | 7.33 |
| | PS | 43.2 | 25.98 | 999.9 | 553.7 | 8 | 6 |
| | LDPE | 21.66 | 12.5 | 2008 | 453 | 3 | 10 |
| 30 | PP | 44.4 | 33.84 | 1040 | 940 | 8.33 | 8.5 |
| | PS | 45.06 | 20.42 | 9998 | 624.3 | 7 | 4 |
| | LDPE | 31.12 | 14.7 | 3086 | 781 | 2 | 7 |

Se puede ver claramente que en los compuestos formados con polipropileno y polietileno, el esfuerzo a la tensión y el módulo se incrementan al aumentar el contenido de fibra (de 0 a 30%), lo que no se ocurre con el poliestireno, el cual cambia de una manera irregular. La orientación de la fibra es de suma importancia para las propiedades finales del compuesto. En la Tabla 2.3 se puede ver que,

para todas las matrices, una orientación longitudinal de la fibra permite obtener resistencias a la tracción superiores que los obtenidos con una orientación al azar. Aunque la diferencia en el incremento de la resistencia a la tracción por la adición de la fibra en el polietileno es mayor que en el polipropileno, en ningún momento llega a ser superior. Esto se atribuye a que el polipropileno es un material más cristalino comparado con el polietileno de baja densidad. En el caso del poliéster, con un 10% de carga de fibra se observa un decremento del 40% en su resistencia a la tracción, mientras que en el polipropileno existe un aumento del 3%. En conclusión, los termoplásticos y en especial el polipropileno muestran ser muy útiles como elemento para matriz en el caso de compuestos reforzados con fibras naturales, como el sisal.

2.3.4. EFECTOS DEL PROCESAMIENTO

La estructura inducida durante el proceso de transformación también afecta las propiedades finales del compuesto. Por ejemplo, se han reportado importantes diferencias entre las propiedades de piezas de PP obtenidas mediante un proceso de “baja productividad”, como es el caso del moldeo por compresión en donde la velocidad de deformación del material fundido es baja, y las piezas obtenidas con el mismo material pero con una alta productividad y, por lo tanto, altos gradientes de cizalla como es el moldeo por inyección.

En el moldeo por compresión, la evolución de la temperatura y presión, el flujo de la matriz y el movimiento de la fibra dentro del molde, provocan una reorientación en las fibras, enfriamiento y la subsiguiente cristalización de la matriz. Todo esto es un proceso complejo que interactúa con el diseño previo de los materiales y las condiciones o parámetros de procesamiento, otorgando ciertas propiedades finales al compuesto moldeado [Wakeman, 2000].

Otro aspecto muy importante en el desarrollo de los materiales compuestos es la degradación de la fibra por efectos de la temperatura aplicada en el proceso de conformado. Esta degradación puede dar lugar a una coloración y pérdida de materias volátiles de olores penetrantes, seguido por un deterioro de sus propiedades mecánicas. El resultado serían productos porosos de menor

densidad y propiedades inferiores. Lo mismo sucede cuando se incrementa el contenido en humedad en la fibra o no se lo disminuye; este incremento provocaría variaciones dimensionales afectando las propiedades mecánicas del material compuesto. Por lo tanto, el tratamiento de las fibras constituye una etapa esencial en el desarrollo de los materiales compuestos.

En el estudio antes citado de P.V. Joseph et al [1998] se determinaron los efectos de las variables de procesamiento en las propiedades de compuestos de polipropileno reforzados con fibras de sisal utilizando dos métodos de mezclado. Uno "melt mixing" en el cual la fibra y el PP se mezclan utilizando un Rheocord Mixer y el otro en el cual la fibra se añade a una pasta viscosa de polipropileno preparada con una mezcla de tolueno/xileno (1:1) para luego ser extruida. En este trabajo se determinó que con un tiempo de mezclado de 10 min., 50 rpm del husillo y 170°C de temperatura se obtienen las óptimas propiedades del compuesto. A continuación, en la Figura 2.4, se presentan algunas gráficas obtenidas en su estudio, en las cuales se puede ver el esfuerzo a tensión para diferentes parámetros de procesamiento.

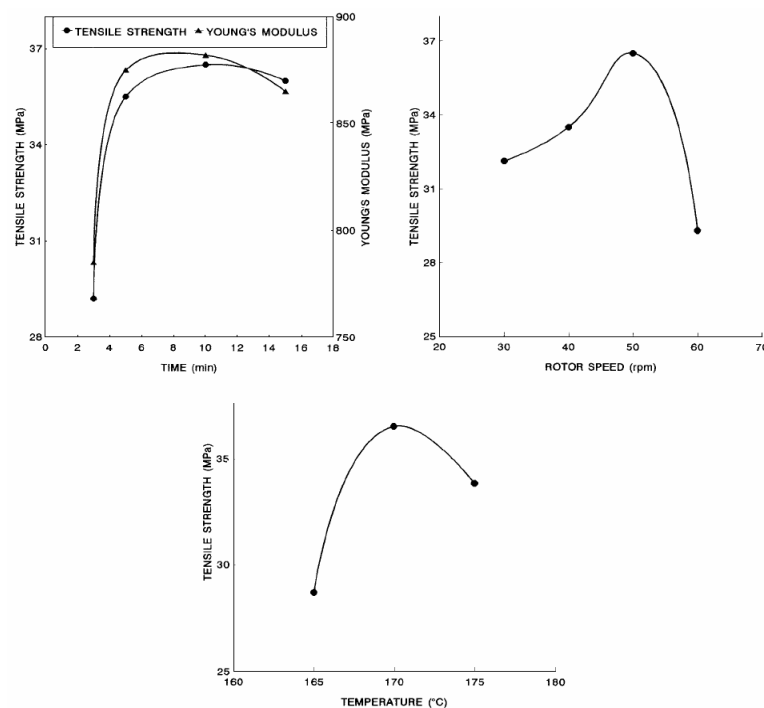


Figura 2.4. Efecto de las variables de procesamiento de compuestos de sisal (30%) con polipropileno sobre sus propiedades mecánicas [P.V. Joseph et a, 1998].

2.4. ESFUERZOS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS

El daño microestructural de un compuesto puede obedecer a alguno de los siguientes fenómenos activos dentro del mismo: rotura de fibras, formación de grietas en la matriz, rotura de la intercara fibra-matriz y pandeo de la fibra bajo esfuerzos de compresión, tal como se puede ver en la Figura 2.5.

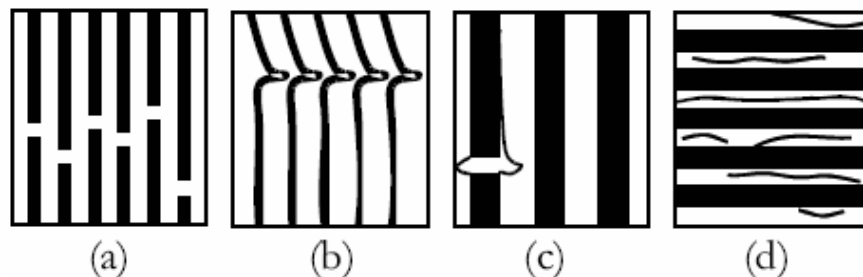


Figura 2.5. Mecanismos de daño en compuestos: (a) rotura de fibras, (b) pandeo de fibra por esfuerzos de compresión, (c) debonding, (d) agrietamiento en la matriz [Mayugo, 2003].

Aunque es necesario distinguir el comportamiento de los compuestos cuando están sometidos a cargas estáticas de cuando lo están a cargas cíclicas, en los dos casos se observan los mismos mecanismos de daño que conducen a la degradación del compuesto. Es decir, el estado de deterioro microestructural en el momento de la rotura puede ser muy similar, ya sea como resultado de la aplicación de una carga estática a un elemento estructural, ya sea como desarrollo progresivo al someter el material a esfuerzos cíclicos.

Si bien el estudio de los daños en compuestos unidireccionales sometidos a cargas axiales podría parecer poco significativo por ser tan restrictivo, lo cierto es que los resultados permiten interpretar cualitativamente los rasgos más característicos del comportamiento de la mayor parte de compuestos, incluso a fatiga. Es una buena aproximación asumir que fibra y matriz colaboran en paralelo a la rigidez del conjunto, de tal modo que en un punto donde coincidan las dos fases las deformaciones son las mismas para ambos. Además, es suficiente considerar que el comportamiento mecánico de la matriz y la fibra es puramente elástico hasta la rotura, considerándose pues solo su rigidez, su resistencia y la correspondiente deformación última.

A continuación se presentan los mecanismos de daño que pueden desencadenarse en un material compuesto sometido a carga axial [Mayugo, 2003]:

- Rotura de fibras

La carga aplicada puede causar una deformación tal en el compuesto que supere el límite de deformación de la fibra en alguno de sus puntos y que, por lo tanto, provoque allí su rotura. Alrededor de la fractura de la fibra se producirá una redistribución de tensiones. En concreto, el esfuerzo cortante en la intercara fibra-matriz aumenta alrededor de la fractura y, a menudo, puede conducir al fenómeno de desunión entre ambos componentes, lo que se ha convenido en llamar deslizamiento fibra-matriz (DFM), en inglés *debonding*. La longitud de esta zona de *debonding* está determinada por la resistencia de la intercara, aunque no suele ir más allá de unas pocas veces el diámetro de la fibra. Por otra parte, el espacio entre las dos fibras fracturadas puede asimilarse a una pequeña grieta en la matriz, que puede tender a propagarse si la concentración de esfuerzos es suficientemente elevada.

- Grietas en la matriz

Una grieta en la matriz puede aparecer, o bien porque la deformación del compuesto supere la deformación última de la matriz, o bien por el propio fenómeno de fatiga en el polímero. Las grietas en la matriz tienden a crecer en la dirección perpendicular al esfuerzo hasta alcanzar la intercara fibra-matriz. Debido a la mayor resistencia de la fibra, la grieta puede detenerse en este punto. No obstante, si la adherencia de la intercara es débil, puede tender a propagarse paralelamente a la fibra, provocando de nuevo la aparición del *debonding* (DFM). Aunque es el caso menos probable, también puede suceder que la grieta provoque la rotura de la fibra y continúe su propagación en la dirección transversal al esfuerzo. El agrietamiento de la matriz aparece simultáneamente en muchos puntos del material y es habitual referirse a la densidad de grietas en la matriz para evaluar su estado de deterioro [Mayugo, 2003].

En el siguiente apartado se describen las principales características y propiedades del polipropileno, polímero que se utiliza como matriz de los materiales compuestos estudiados en el presente proyecto.

2.5. EL POLIPROPILENO

El polipropileno es un termoplástico semicristalino, que se produce polimerizando propileno en presencia de un catalizador estéreo específico. El polipropileno tiene múltiples aplicaciones, por lo que es considerado como uno de los productos termoplásticos de mayor desarrollo en el futuro. Es un producto inerte, totalmente reciclable, su incineración no tiene ningún efecto contaminante, y su tecnología de producción es la de menor impacto ambiental. Esta es una característica atractiva frente a materiales alternativos.

Hoy en día el polipropileno es uno de los termoplásticos más vendidos en el mundo, con una demanda anual estimada de 40 millones de toneladas. Sus incrementos anuales de consumo han sido próximos al 10% durante las últimas décadas, confirmando su grado de aceptación en los mercados [Internet 4].

La buena acogida que ha tenido ha estado directamente relacionada con su versatilidad, sus buenas propiedades físicas y la competitividad económica de sus procesos de producción. Varios puntos fuertes lo confirman como material idóneo para muchas aplicaciones. Entre estos están: la baja densidad, alta dureza y la resistencia a la abrasión, alta rigidez, buena resistencia al calor, excelente resistencia química, y excelente versatilidad, entre otros [Internet 4].

En el Ecuador no se produce este polímero, sus importaciones provienen de los Estados Unidos en un 79%. Algunas de las empresas que utilizan el polipropileno como materia prima son: Poligrup, Palmplast, Husky, Quimandí S.A., Plásticos Ecuatorianos S.A., Plastigomez S.A., Plastlit S.A.

En la Figura 2.6, se muestra el historial de las importaciones del PP desde el año 1990 hasta el 2003.

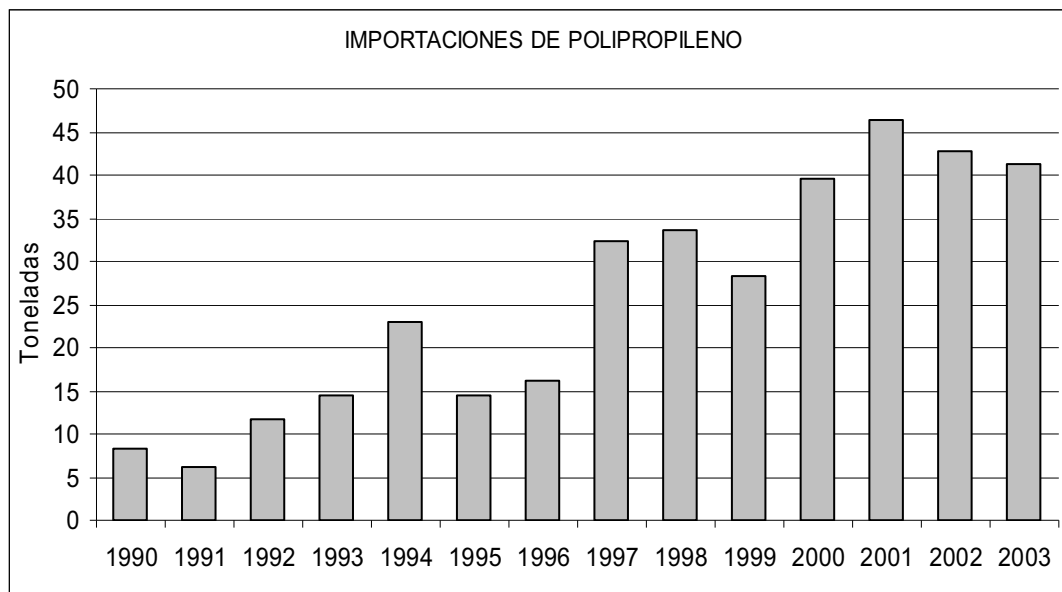


Figura 2.6. Importaciones históricas de polipropileno (1990 al 2003). Fuente ASEPLAS.

2.5.1. ESTRUCTURA DEL POLIPROPILENO

Estructuralmente es un polímero vinílico, similar al polietileno, solo que uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo, tal como se ilustra en la Figura 2.7. El polipropileno fabricado de manera industrial es un polímero lineal, cuya espina dorsal es una cadena de hidrocarburos saturados. Cada dos átomos de carbono de esta cadena principal se encuentra ramificado un grupo metilo (CH_3). Esto permite distinguir tres formas isómeras del polipropileno: isotáctica, sindiotáctica y atáctica, ilustradas en las Figuras 2.8 (a), (b) y (c), respectivamente. Estas formas se diferencian por la posición de los grupos metilo- CH_3 con respecto a la estructura espacial de la cadena del polímero.

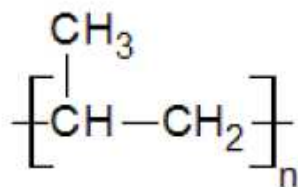


Figura 2.7. Estructura del polipropileno (PP).

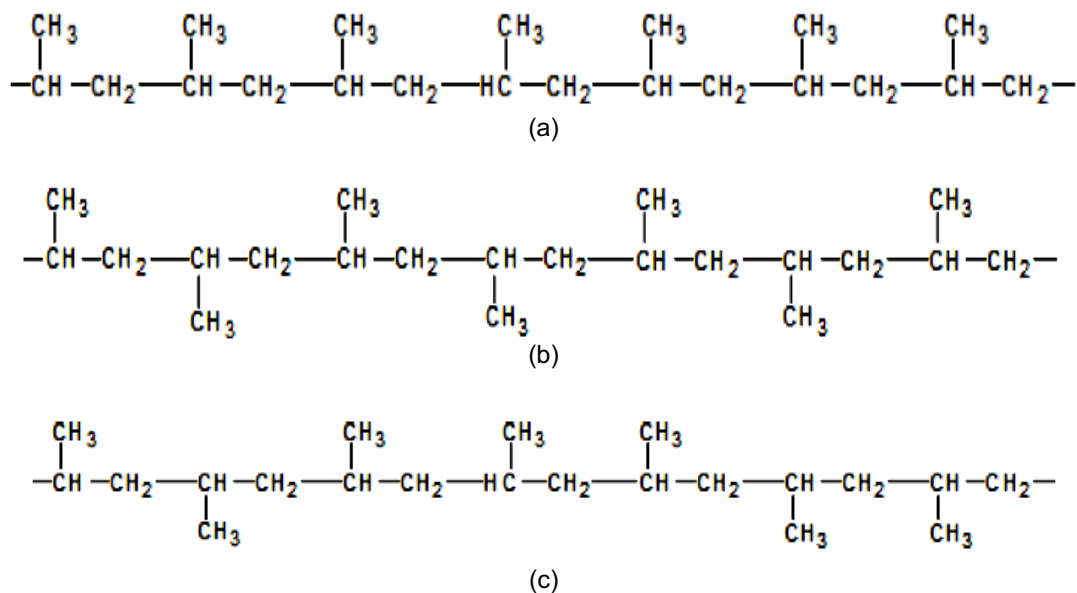


Figura 2.8. Forma de la estructura del PP. (a) Isotáctica; (b) Sindiotáctica; (c) Atáctica.

Las formas isotácticas y sindiotácticas, dada su gran regularidad, tienden a adquirir en estado sólido una disposición espacial ordenada, semicristalina, que confiere al material unas propiedades físicas excepcionales. La forma atáctica, en cambio, no tiene ningún tipo de cristalinidad. Los procesos industriales más empleados están dirigidos hacia la fabricación de polipropileno isotáctico que es el que ha despertado mayor interés comercial [Internet 4].

2.5.2. PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO

El grado de polipropileno más utilizado es el copolímero en bloque. Los copolímeros de polipropileno son generalmente de propileno y etileno, donde el propileno está presente en gran mayoría, generalmente superior al 75%. Este grado presenta una mayor resistencia a la fractura que el PP homopolímero, acompañado sin embargo, de una menor rigidez y resistencia mecánica. Como se dijo anteriormente, las moléculas del polipropileno puede ser isotácticas, sindiotácticas o atácticas. Sin embargo, el polipropileno isotáctico (i-PP) es de mayor importancia desde un punto de vista técnico y representa la casi totalidad del mercado.

Las propiedades mecánicas del polipropileno se ven afectadas en mayor medida por la longitud de las cadenas del polímero (peso molecular), por su polidispersidad, por los comonómeros eventualmente incorporados, etc. Un mayor peso molecular resulta en una mayor resistencia al impacto y en un mayor alargamiento del material. Sin embargo, la resistencia a la cedencia se ve reducida por un mayor peso molecular [Morhain, 2001].

- Dispersión de pesos moleculares

Como en la síntesis de otros polímeros, la longitud de las cadenas de polipropileno creadas en una misma partida no es uniforme. Se obtiene una dispersión de pesos moleculares más o menos amplia, que condiciona las propiedades mecánicas del grado producido. La distribución de pesos moleculares viene restringida por los procesos de fabricación, por las condiciones de operación, y sobre todo por los sistemas catalíticos empleados.

- Viscosidad

La viscosidad en fundido es, junto con la dispersión de pesos moleculares, una de las características más importantes a la hora de la caracterización de los grados de polipropileno, ya que influye directamente sobre las condiciones de procesado, y por ello sobre la economía de los procesos.

- Cristalinidad

Al tratarse de moléculas altamente lineales, las moléculas de polipropileno tienden a tomar en estado sólido una estructura ordenada, semicristalina. Las moléculas forman cadenas largas y estables, con altos pesos moleculares. Esta es la que le confiere sus propiedades.

Entre otras propiedades se puede mencionar:

- La densidad del polipropileno, está comprendida entre 0.90 y 0.93 g/cm³
- Posee un alto punto de fusión, no funde por debajo de los 160°C
- Posee alta resistencia al impacto y a la abrasión
- Posee una gran capacidad de recuperación elástica

- Es un material más rígido que la mayoría de los termoplásticos. Una carga de 25.5 kgf/cm^2 , aplicada durante 24 horas no produce deformación apreciable a temperatura ambiente y resiste hasta los 70°C
- Tiene una excelente compatibilidad con el medio y es fácil de reciclar
- Por su bajo rozamiento puede utilizarse en calidad de material para elementos deslizantes no lubricados
- Tiene buena resistencia química a la humedad y al calor sin deformarse
- Tiene buena dureza superficial y estabilidad dimensional
- La resistencia eléctrica transversal es superior a $10^{16} \Omega/\text{cm}$
- Por presentar baja polaridad, su factor de pérdidas es bajo
- Tiene muy buena rigidez dieléctrica
- Tiene naturaleza apolar, y por esto posee gran resistencia a agentes químicos; sin embargo presenta poca afinidad con las fibras celulósicas (polares)
- Presenta poca absorción de agua
- Tiene gran resistencia a soluciones de detergentes comerciales
- El PP, como los polietilenos, poseen una débil resistencia a los rayos UV (salvo estabilización o protección previa)

A continuación se introducen conceptos sobre las técnicas de procesamiento de los materiales compuestos y se describe en particular la técnica de moldeo por compresión, utilizada en el presente proyecto para la fabricación de los materiales compuestos PP / abacá.

2.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS

En las últimas décadas se han venido desarrollando varias técnicas avanzadas para la manufactura con compuestos. Entre estas: moldeo por inyección, moldeo por extrusión, moldeo por compresión, pultrusión, estratificación, moldeo por aspersión, autoclave, etc. Cada técnica posee sus ventajas y desventajas en términos de procesamiento, tamaño del producto, forma del producto, costo por producto, etc. El éxito de la producción de un artículo depende de la correcta

selección de la técnica de manufactura así como también de la adecuada selección de los parámetros de procesamiento [Guerrero 2005].

Los procesos de manufactura de compuestos pueden ser divididos en procesos para termoestables y para termoplásticos. En términos de aplicaciones comerciales, las partes de compuestos termoestables dominan el mercado de los compuestos. Se puede estimar que entre 70 y 75% son compuestos termoestables y del 25 al 30% son compuestos termoplásticos. Sin embargo, el crecimiento es más favorable para compuestos termoplásticos que para los termoestables: el 9% y el 3% anual, respectivamente. Este alto crecimiento puede ser explicado por una serie de ventajas asociadas a los termoplásticos: buen desempeño mecánico, resistencia a altas temperaturas; constante dieléctrica favorable (aplicaciones eléctricas), buen reciclaje, altas tasas de producción, etc.

La mayoría de procesos disponibles para los compuestos termoestables son usados también en la producción de partes con compuestos termoplásticos. En el sector comercial, las técnicas de manufactura predominantes son el moldeo por inyección, moldeo por compresión, y en algún grado, el autoclave o estratificado de preformas.

Existen algunas diferencias importantes al procesar termoplásticos en relación con los termoestables. Entre estas se tiene el tiempo necesario para su procesamiento: en termoplásticos, al tratarse de un proceso enteramente mecánico, este puede durar pocos segundos, mientras que con los termoestables puede durar hasta horas por existir reacciones químicas en su procesamiento.

2.6.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE Y TERMOPLÁSTICA

2.6.1.1. Ventajas y Desventajas del Procesamiento de Compuestos Termoestables

Las resinas comunes son epoxy, poliéster y vinylester. Estos materiales pueden ser sistemas de uno o de dos componentes y generalmente están en estado líquido a temperatura ambiente. Los termoestables se curan a elevadas

temperaturas o a temperatura ambiente, dependiendo del catalizador, para obtener la forma final. Los métodos de manufactura de los termoestables brindan las siguientes ventajas:

- El procesamiento es más fácil porque el sistema de resina inicialmente está en estado líquido.
- Las fibras se mojan fácilmente con los termoestables, esto implica menos porosidades.
- Los requerimientos de calor y temperatura son menores en el procesamiento de compuestos termoestables. Esto resulta en ahorros de energía.
- En el procesamiento de termoestables se puede utilizar herramientas de bajo costo.

Las desventajas son:

- El procesamiento de compuestos termoestables requiere de largos periodos de tiempo y por ello resulta en menores tasas de producción que en el caso de los termoplásticos.
- Una vez curados y solidificados, las partes de compuestos termoestables no pueden ser reconformadas para obtener otras formas.
- El reciclaje de compuestos termoestables es un problema.

2.6.1.2. Ventajas y Desventajas del Procesamiento de Compuestos Termoplásticos

La materia prima en el caso de compuestos termoplásticos está en estado sólido y necesita ser fundida para obtener el producto final. Las ventajas del procesamiento de compuestos termoplásticos incluyen:

- El ciclo del proceso es usualmente muy corto debido a que no existe reacción química durante el procesamiento. Por ello pueden emplearse métodos de producción de grandes volúmenes.
- Los compuestos termoplásticos pueden ser reformados y reconformados con la aplicación de calor y temperatura.
- Los compuestos termoplásticos son fáciles de reciclar.

Las desventajas incluyen:

- Los compuestos termoplásticos requieren de herramientas fuertes y pesadas para el procesamiento. El costo de las herramientas es bastante alto. Como ejemplo, el costo de las herramientas para moldeo por inyección es típicamente de más de 50 000 USD, mientras que el costo de mandriles para el bobinado (filament winding) es típicamente menor a 500 USD.
- Los compuestos termoplásticos no son fáciles de procesar y en muchas ocasiones requieren algún equipo para aplicar presión y temperatura. Este es el caso del moldeo por compresión que requiere de una prensa calefactora.

2.6.2. PROCESOS DE MANUFACTURA PARA COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA

2.6.2.1. Moldeo por inyección

El moldeo por inyección de materiales termoplásticos es un proceso cíclico en el cual un polímero fundido es inyectado en una cavidad cerrada, donde solidifica mediante enfriamiento, tomando la forma del molde (cavidad cerrada), entonces el molde es abierto, la pieza moldeada es removida y el ciclo se vuelve a repetir. Mediante el moldeo por inyección se fabrican una gran variedad de partes a gran velocidad, las cuales pueden ser muy complejas, y cuyo peso puede encontrarse entre 5 g y 85 kg. Es un proceso muy automatizado cuyo tiempo de ciclo generalmente se encuentra entre 20 y 60 s. Se estima que mediante esta técnica se procesa el 25% del total de las resinas termoplásticas [Cogswell, 1992, Internet 4].

2.6.2.2. Moldeo por extrusión

En el moldeo por extrusión se utiliza un tornillo helicoidal que empuja el material a través de una cámara de calentamiento, a una velocidad especificada bajo las condiciones de operación. Las materias primas (fibra y matriz polimérica) son transportadas desde la tolva, hasta la boca de descarga, en una corriente continua.

En la cámara de calentamiento el polímero se plastifica (mediante calor y fricción) produciendo así el mezclado fibra/matriz, el cual emerge de la boca de extrusión o boquilla en un estado blando, y adopta la forma de esta última. Posteriormente se corta en la medida adecuada. Se producen por extrusión tuberías, perfiles, vigas y materiales similares [Morejón y Narváez, 2004].

2.6.2.3. Autoclave o estratificado de preimpregnados

En este proceso se coloca los preimpregnados (prepregs) termoplásticos sobre la herramienta en la secuencia deseada y se utiliza soldadura con el fin de evitar el movimiento relativo entre las placas apiladas. Este montaje de prepregs se empaqueta al vacío para luego ser introducido en un autoclave, tal como se observa en la Figura 2.9. El proceso dentro del autoclave es similar a la técnica de moldeo por compresión, siendo la única diferencia la forma de aplicar presión y calor. Después del ciclo de procesamiento, la parte es retirada de la herramienta [Cogswell, 1992].



Figura 2.9. Empaque al vacío de preimpregnados que se introducen a un autoclave [Cogswell, 1992].

2.6.3. MOLDEO POR COMPRESIÓN DE TERMOPLÁSTICOS

El moldeo por compresión es una de las técnicas de manufactura de compuestos poliméricos más empleada y desarrollada de la industria automotriz. Esto se debe básicamente a su similitud con el proceso de estampado de metales, el cual ha sido usado por mucho tiempo y por lo cual se tiene un buen conocimiento del mismo. El moldeo por compresión permite la obtención de componentes de gran tamaño y buenas propiedades mecánicas, ya que las fibras de refuerzo conservan en el componente fabricado su longitud y orientación inicial. Adicionalmente, es la única técnica de manufactura de termoplásticos que se encuentra bien difundida en aplicaciones comerciales para la fabricación de partes estructurales.

En general el costo del proceso, equipos y moldes necesarios para el moldeo por compresión son significativamente menores a los del moldeo por inyección. En el moldeo por compresión se presenta poco desperdicio de material y permite manejar altos contenidos y longitudes de fibra de refuerzo, logrando así alcanzar mejores propiedades físicas y mecánicas. Adicionalmente, mediante implementos de automatización es posible tener una alta capacidad de producción, permitiendo alcanzar tiempos de ciclo de moldeo en un rango de 30 a 60 segundos.

El proceso empleado en el presente proyecto se ajusta de mejor manera a la técnica de manufactura conocida como prensado en caliente (hot press), o moldeo por compresión de preformas termoplásticas. Este procesamiento permite fabricar únicamente componentes relativamente simples, planos y de gran tamaño.

La técnica de moldeo por compresión de preformas termoplásticas, consiste en ubicar las materias primas (matriz termoplástica y fibra de refuerzo) cortadas de acuerdo al tamaño, cantidad, forma y orientación requerida dentro de un molde metálico, en cuya superficie previamente se ha aplicado un agente que facilite la remoción de la parte una vez moldeada. Posterior a esto, comienza una fase conocida como precalentamiento, en donde el molde aun frío, y con la carga en su interior, es ubicado entre dos planchas calefactoras que suministran el calor, tal como se observa en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Equipo para el moldeo por compresión (técnica de prensado en caliente).

Por lo general, las planchas son calentadas eléctricamente, y la temperatura deseada es regulada mediante un termostato o un potenciómetro. Asimismo, existen equipos con control computarizado que regulan las temperaturas y demás los parámetros de procesamiento.

En primera instancia, el calor suministrado por las planchas calefactoras es absorbido por el molde para luego calentar el material que se encuentra en su interior. Por este motivo, es necesario considerar el tiempo de precalentamiento en el cual el molde se calienta. Una ligera presión es aplicada hasta que el material alcance la temperatura de fusión o derretimiento del polímero termoplástico utilizado.

Una vez que la temperatura se estabiliza, empieza la fase de moldeo. En esta fase, además de mantener el calor, es necesario aplicar una mayor presión durante un tiempo previsto. El calor y la presión son mantenidos y especificados de acuerdo al diseño de los parámetros del proceso para la parte o componente a fabricar. La presión es aplicada con la ayuda de una prensa hidráulica, mediante el movimiento de la plancha inferior contra la plancha superior, que generalmente permanece estática. Un manómetro mide la presión aplicada.

Existen dos condiciones que permiten una buena consolidación de la parte y por ende unas buenas propiedades en la misma. Primero, debe haber un buen contacto entre las capas de material; y segundo, debe haber un calor y tiempo suficiente de moldeo para que exista una buena adherencia (difusión molecular) entre las fases de los materiales. Con el fin de crear un buen contacto, el aire entre capas debe ser removido, para lo cual se debe aplicar una cierta presión en la fase de moldeo.

Luego de la fase de moldeo, se remueve el molde y se coloca en una zona de enfriamiento, en donde la presión se mantiene durante todo el proceso de enfriamiento o hasta que la parte este completamente solidificada. Algunos equipos de moldeo por compresión poseen un sistema de enfriamiento integrado, por lo cual es posible que el enfriamiento del molde se realice en la misma prensa en la que se moldeó (prensa calefactora), sin que exista un desplazamiento del mismo. Después del enfriamiento, se abre el molde y la parte es retirada [Cogswell, 1992; Rojas, 2003].

A continuación se va a hablar sobre las aplicaciones de los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales, orientadas principalmente al sector automotriz.

2.7. APLICACIONES AUTOMOTRICES DE LOS COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES

Aun cuando muchos de los intentos de incorporar fibras vegetales dentro de los componentes de vehículos no han tenido el éxito que se esperaba, el creciente sentido ambientalista hoy por hoy hace que importantes empresas busquen la manera de incorporar materiales renovables y amigables con el medio ambiente en grandes industrias como la automotriz y de la construcción.

En 1991, Daimler Mercedes Benz gracias a su proyecto “Beleem Project” con base en Brasil, se convirtió en el pionero en reemplazar la fibra de vidrio tradicional con fibras naturales en componentes automotrices. En 1996, Daimler

Mercedes Benz, con su vehículo modelo “E-Class”, fue el primero en usar compuestos de yute para la fabricación de los paneles cubre puertas. A partir de eso la compañía Chrysler comenzó a investigar la utilización de fibras vegetales en componentes para sus vehículos [Mohanty, 2005]. En la Figura 2.6 se ilustran los componentes reforzados con fibra vegetal que se incorporaron en el “E-class”.

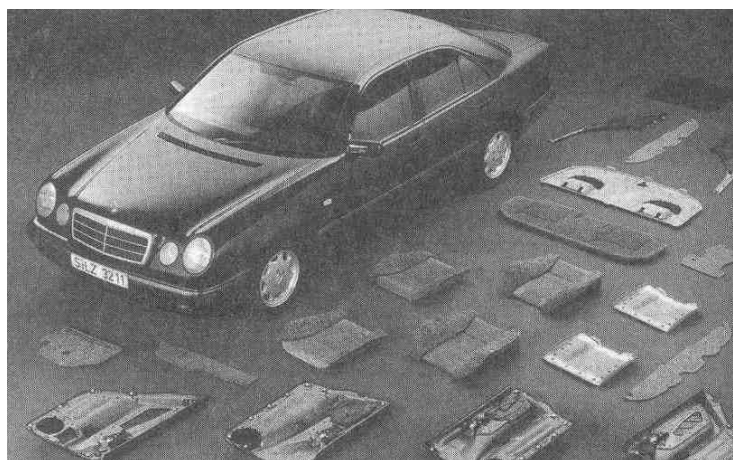


Figura 2.11. Componentes interiores reforzados con fibras vegetales, utilizados en el vehículo modelo Mercedes “E-class” [Mohanty, 2005].

Actualmente, debido a la unión entre Daimler Mercedes y Chrysler (Daimler Chrysler), esta compañía se ha convertido en líder en la investigación y empleo de componentes plásticos reforzados con fibras naturales en el mercado automotriz. Componentes interiores tales como tableros de instrumentos y cubre puertas de polipropileno reforzados con fibra naturales son fabricados por Jonson Controls y empleados por DaimlerChrysler en sus vehículos. De igual manera, el primer uso de componentes externos con fibras vegetales (lino), es la cubierta de motor del Mercedes Benz Travego, lo cual representa un hito en la aplicación de estos compuestos debido a que los componentes exteriores deben ser capaces de soportar condiciones extremas tales como condiciones climáticas, humedad y desgaste.

Entre las aplicaciones automotrices bien establecidas de los compuestos reforzados con fibras vegetales se incluyen los paneles de instrumentos, revestimiento para puertas delanteras y traseras, revestimiento para portaequipajes, y tableros traseros. Asimismo existen aplicaciones potenciales

como los espaldares de asientos, paneles de instrumentos, cubiertas de baterías y motores, empaques de alimentos, guantes, soportes de armas, etc. [Li et al, 2004; Mohanty, 2005].

CAPITULO 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se detalla el procedimiento experimental empleado en el presente proyecto, se establece el alcance y los objetivos del mismo. Se presenta la estrategia metodológica, la cual ha sido organizada en tres etapas, detallando las pruebas y ensayos realizados. Asimismo, se presentan las características de los materiales utilizados, se listan los equipos con sus especificaciones y se describen las técnicas empleadas a lo largo de todo el estudio experimental.

3.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

Si bien son muchas las investigaciones realizadas con el fin de reemplazar las fibras tradicionales por fibras vegetales como material de refuerzo en materiales compuestos, la gran parte de estas se centran en determinar los efectos que tienen las modificaciones en la interfaz fibra - matriz sobre las propiedades finales del compuesto, y no en el estudio de los efectos que ocasiona la composición de los mismos y las variables del procesamiento. Adicionalmente, existe muy poca información referente al uso de la fibra de abacá en matrices termoplásticas, fibra de uso común y que constituye una fuente de empleo para más de 5 000 familias en el Ecuador. Las fibras de abacá presentan buenas propiedades mecánicas específicas, son un 50% más livianas que las de vidrio, menos abrasivas, su uso permite a sus compuestos tener altas especificaciones en dureza y rigidez, un aspecto agradable, y combinadas con cierto tipo de matrices, otorgan propiedades aislantes de vibraciones y sonidos.

Las propiedades mecánicas de los polímeros reforzados con fibras vegetales, no solo dependen de las propiedades intrínsecas de sus componentes, sino también de factores como la disposición geométrica u orientación de las fibras, la fracción de volumen o peso entre fibra-matriz, e incluso del proceso de manufactura.

Entre los métodos más utilizados para procesar compuestos termoplásticos reforzados con fibras vegetales están el de inyección y el de extrusión, lo cual limita su uso en compuestos de fibras largas, y tienden a degradar a la fibra durante el proceso. Por este motivo, el presente proyecto trata de aportar con el estudio de una técnica de manufactura simple que minimice la degradación mecánica y térmica de la fibra.

Las muchas investigaciones realizadas a nivel internacional referentes a este tema y la investigación descrita en el proyecto de titulación “Materiales Compuestos de Matrices Polietilénicas Reforzados con Fibras Naturales de Abacá y Cabuya” [Morejón y Narvaez, 2004] son la base bibliográfica y de referencia para el presente proyecto. La investigación se llevó a cabo en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) de la Escuela Politécnica Nacional.

Las hipótesis que se manejan para el presente proyecto son las siguientes:

- El moldeo por compresión hace posible la producción de compuestos utilizando polipropileno como matriz y fibras de abacá cortas y continuas, orientadas y al azar, como refuerzo.
- El moldeo por compresión disminuye la degradación inducida a la fibra durante la elaboración de los materiales compuestos.
- La inclusión de fibras de abacá dentro de una matriz de polipropileno conlleva un incremento en las propiedades mecánicas del mismo, principalmente en cuanto a los módulos de elasticidad en tensión y en flexión.
- Las propiedades mecánicas mejoran con el aumento de la longitud y concentración de fibras
- La utilización de fibras químicamente modificadas como refuerzos en los compuestos permitirá mejorar las propiedades mecánicas obtenidas al utilizar fibras sin modificación.

3.2. ALCANCE Y OBJETIVOS

3.2.1. ALCANCE

El presente proyecto de titulación trata sobre el procesamiento mediante moldeo por compresión de materiales compuestos de matriz polipropilénica y reforzados con fibras de abacá, estudiando las diferentes propiedades mecánicas obtenidas en los compuestos mediante la variación de parámetros como el porcentaje en masa de fibra, longitud de las fibras, orientación de las fibras y parámetros del proceso de transformación.

El polipropileno a utilizarse como matriz es un copolímero isotáctico con un índice de fluidez de 10, PP-Braskem H-301. Se utilizará como refuerzo las fibras de abacá, caracterizadas según el trabajo de Morejón y Narváez [2004] por su longitud, diámetro y propiedades mecánicas entre las distintas calidades de abacá.

En una primera instancia se determinará la procesabilidad del polipropileno mediante moldeo por compresión, obteniendo parámetros de procesamiento que garanticen la obtención de muestras libres de defectos. Utilizando como base estos datos se procederá a la fabricación de planchas (preformas) de polipropileno que combinadas con fibra de abacá permitirá la obtención de compuestos tipo sánduche. Se obtendrán diferentes muestras del material compuesto, modificando su composición, es decir la fracción en masa de los componentes, la orientación y longitud de las fibras; y los parámetros de operación del moldeo.

Las propiedades físicas y mecánicas de las muestras obtenidas se evaluarán mediante ensayos estandarizados de tracción, flexión, y dureza. Asimismo, se determinarán propiedades físicas tales como la densidad y absorción de humedad. De acuerdo con los resultados obtenidos, se establecerán valores de los parámetros de procesamiento y la composición del material que garanticen las mejores propiedades.

Este estudio trata de contribuir con el desarrollo de nuevos materiales que además de cumplir con su función de diseño sean amigables con el medio ambiente.

Otro aspecto importante de este estudio es el de abrir un nuevo campo para la utilización de la fibra de abacá en nuestro país. En el Ecuador existen alrededor de 14 000 hectáreas sembradas, de cuya producción solamente alrededor del 14% se extrae como fibra para exportar, quedando un desperdicio de 84 – 85%, el cual podría ser utilizado para agregar valor a las exportaciones y hacer más amplio el negocio del abacá en el país.

3.2.2. OBJETIVO GENERAL

Determinar la composición y los parámetros de procesamiento que resultan en las mejores propiedades físicas y mecánicas de un material compuesto (polipropileno reforzado con fibras de abacá) obtenido por el proceso de moldeo por compresión.

3.2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física y mecánicamente los materiales empleados en la elaboración de los materiales compuestos.
- Estudiar la procesabilidad mediante moldeo por compresión del polipropileno en función de los parámetros del proceso: temperatura, tiempo y presión de precalentamiento, moldeo y enfriamiento
- Caracterizar las propiedades mecánicas de los compuestos obtenidos en función de la composición, longitud y orientación de la fibra, y determinar las condiciones de procesamiento para obtener los mejores resultados.
- Estudiar el efecto que tiene el modificar la adhesión fibra – matriz mediante un tratamiento químico sobre las propiedades mecánicas de los compuestos.
- Exponer los mejores resultados en función de cada una de las variables.

3.3. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

3.3.1. ETAPAS DEL PROCESO

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en 3 etapas:

En una primera etapa se estudió la procesabilidad del polipropileno H-301 marca BRASKEM mediante la técnica de moldeo por compresión. Esta etapa comprendió la adecuación de los equipos necesarios para la fabricación de las placas de PP, materia prima de los compuestos tipo sánduche. Se determinó los efectos del sistema de enfriamiento utilizado, la masa de PP mínima necesaria, se optimizó y determinó los parámetros de procesamiento que permiten obtener las placas sin defectos visuales, es decir sin burbujas y llenado incompleto. En resumen, las variables estudiadas en esta etapa fueron: la cantidad en masa de PP necesaria en el molde, y los tiempos, temperaturas y presiones en sus diferentes etapas del moldeo por compresión para el conformado de placas de PP.

En la segunda etapa, se estudió la composición de los materiales, realizando un estudio de las propiedades mecánicas en función de la fracción de masa de fibra, tamaño y orientación de la misma. Se escogieron los compuestos que mejores resultados presentaban. Fue necesario establecer una metodología para la fabricación de estos compuestos tipo sánduche, basándose en una referencia bibliográfica.

Para los compuestos escogidos en la etapa anterior, en la tercera etapa se estudió la influencia que tiene cada una de las fases del procesamiento del moldeo por compresión (descritas en el apartado 2.6.3) dentro de las propiedades del compuesto. La primera fase es la del precalentamiento, en la cual intervienen las variables de tiempo, temperatura y presión. La segunda fase es la del moldeo, en la cual las variables que intervienen son las mismas que la fase anterior. La tercera y última fase es la del enfriamiento, para lo cual, por la característica del sistema de enfriamiento utilizado, fue necesario el estudio de temperatura inicial y flujo del agua de enfriamiento, así como la presión en la prensa.

Concluidas estas etapas, a los compuestos que presentaron las mejores propiedades mecánicas, y con los cuales se determinaron las mejores condiciones de procesamiento, se los caracterizó de manera más detallada. Se determinaron propiedades como densidad, absorción de agua y dureza. Además, con el fin de realizar comparaciones de estos compuestos con los de fibra continua y fibra modificada mediante la mercerización se realizó los ensayos mecánicos de tracción y flexión a 3 puntos.

A continuación en la Figura 3.1 se ilustra un esquema del proceso experimental.

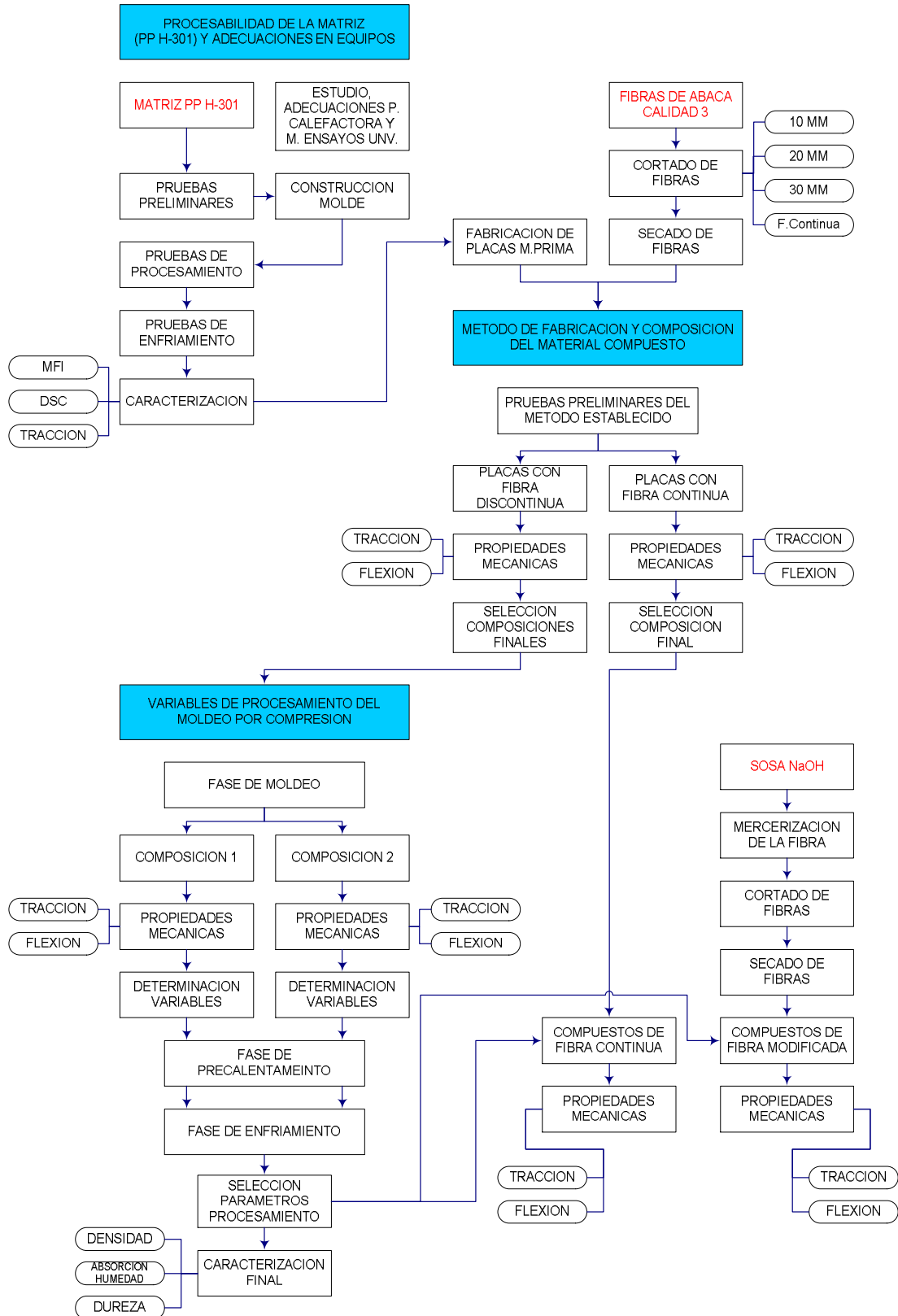


Figura 3.1. Esquema del diseño experimental.

3.3.2. TÉCNICAS Y EQUIPOS UTILIZADOS

Tanto las técnicas como los equipos empleados se encuentran detallados a continuación, en las distintas tareas realizadas: acondicionamiento de las fibras, caracterización de los materiales, fabricación del material compuesto.

3.3.2.1. Acondicionamiento de las fibras

Con el acondicionamiento de las fibras se logra tener el material de refuerzo listo para ser añadido a la matriz durante el proceso de transformación. Al encontrarse las fibras de abacá inicialmente en filamentos largos, fue necesario utilizar tijeras de podar para obtener fibras en las longitudes a estudiar. Las tijeras de marca Pretul fueron diseñadas para cortar tallos de plantas medianas. Consta de cuchillas curvas que permiten concentrar la fuerza de corte en su centro.

El secado de las fibras se realizó en primera instancia al ambiente durante 48 horas, a continuación se las secó en una estufa de marca Venticell con circulación de aire y control automático, ilustrada en la Figura 3.2. El proceso se realizó a 120°C durante 4 horas, con lo cual se obtuvo una disminución de alrededor del 10% en su peso, a causa de la eliminación de la humedad presente en las fibras. Con estos procesos se logró obtener fibras adecuadas para el moldeo con la matriz.



Figura 3.2. Estufa con circulación de aire marca Venticell.

3.3.2.2. Modificación de la fibra - Mercerización

La mercerización de la fibra de abacá se realizó acorde a la información preliminar del proyecto de titulación de Daysi Través [2007]. Siguiendo el procedimiento con el cual se han obtenido los mejores resultados, se prepara una solución de sosa al 30% con una relación de licor de 1 a 20, según la masa de fibra a modificar. Posterior a esto se sumergen las fibras en esta solución durante 2 minutos, para luego retirarlas y realizar un lavado profundo con agua para eliminar todo rastro de solución de sosa que pudiese quedar en la misma. El corte y secado de las fibras se lo hizo acorde a lo descrito en el apartado anterior.

A continuación, en la Figura 3.3, se muestra la secuencia del proceso seguido para la modificación de la fibra por mercerización.



Figura 3.3. Proceso de mercerización de la fibra de abacá.

3.3.2.3. Caracterización de los materiales

La caracterización de los materiales comprende todas las técnicas utilizadas con el fin de determinar propiedades físicas y mecánicas tanto del compuesto obtenido como de sus materias primas. Para ello se utilizan las siguientes máquinas con sus respectivas técnicas:

3.3.2.3.1. Máquina de ensayos universal – Ensayos de tracción y flexión

La máquina de ensayos universales marca Instron modelo 1011, ilustrada en la Figura 3.4, permite determinar propiedades mecánicas utilizando probetas adecuadas de tracción y flexión a 3 puntos que se mantienen en la zona de ensayo mediante un dispositivo de mordazas accionadas mecánicamente, o para el caso del ensayo de flexión mediante una base fija con puntos de apoyo regulables a voluntad.



Figura 3.4. Máquina de Ensayos Universal Instron en conjunto con su sistema computarizado de control.

Este modelo dispone de control computarizado, manejado por el software “Series IX Automated Materials Testing System V.5.25”, el cual, además de permitir controlar y configurar los ensayos mecánicos en la máquina, recoge todos los datos proporcionados y de forma automática los procesa, obteniendo de esta manera los datos buscados. Las características más destacables del equipo son: capacidad de la celda de carga instalada 5 kN, y potencia de 500 W.

Los ensayos de tracción se realizaron en acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM D-638 [1997], mientras que para los ensayos de flexión a 3 puntos la metodología utilizada se describe en la norma ASTM D-5943 [1996]. Las probetas se obtuvieron por medio de la troqueladora de marca Ceast, como se observa en la Figura 3.5 (a), a partir de las planchas obtenidas de la matriz de PP y del material compuesto. La guillotina funciona mediante accionamiento manual, ejerciendo una presión sobre las placas a través de troqueles especiales de dimensiones especificadas en las normas para cada ensayo.

Para las probetas de ensayo de flexión fue necesario fabricar un troquel de dimensiones previstas por la norma ASTM D-5943 [1996]. Este troquel se fabricó a partir de flejes de acero, los cuales se doblaron y se soldaron en un extremo. Se tuvo mucho cuidado en obtener un filo de corte uniforme con el fin de evitar dañar el material el momento del corte. Los troqueles utilizados para las probetas de tracción tipo IV, según norma, y flexión se pueden apreciar en la Figura 3.5 (b).

Para la medición de los espesores en las probetas, y por ende su sección transversal y/o separación entre apoyos, fue necesario utilizar un medidor de espesores de marca Mitutoyo, modelo IDF-112 cuya apreciación es de 1/1000 mm, ilustrado en la Figura 3.5 (a).



(a)



(b)

Figura 3.5. (a) Medidor de espesores Mitutoyo y troqueladora marca Ceast; (b) Troqueles para el corte de las probetas de ensayo de tensión y flexión.

3.3.2.3.2. Plastómetro - Índice de fluidez

El índice de fluidez, comúnmente llamado MFI (*Melt Flow Index*), corresponde a la cantidad de material en peso que fluye a través de un capilar durante un tiempo de 10 minutos, para unas condiciones de temperatura y de presión predefinidas. El índice de fluidez es un parámetro muy utilizado en la industria para determinar la procesabilidad de un material. Es una medida relacionada a la viscosidad del polímero, la fluidez a bajas velocidades de deformación y a su densidad [Gordillo, 2000]

El índice de fluidez de los materiales preparados fue determinado utilizando el equipo “Melt Flow Tester” modelo 6942 del fabricante Ceast S.A., ilustrado en la Figura 3.6, y siguiendo el procedimiento descrito por la norma ASTM D-1238 [1995]. El plastómetro está formado por una unidad calefactora eléctrica que controla la temperatura en la zona de alimentación, intermedia y salida del material.



Figura 3.6. Plastómetro Ceast modelo 6942.

En el interior del cilindro calefactor se aloja un canal cilíndrico por el que se introduce el material a fundir. El eje virtual de este canal es perpendicular a la base del aparato. En la parte inferior de este canal cilíndrico se aloja una tobera, desmontable, de acero tratado por la que debe fluir el material fundido.

En el interior del canal se aloja un émbolo desmontable, que empuja al material fundido a través del canal. Sobre el émbolo se colocan pesos de valor estándar y definidos por la norma para ejercer una presión determinada sobre el material fundido. Para determinar el MFI, es necesario medir el volumen de material que fluye a través de la boquilla en un tiempo determinado.

3.3.2.3.3. Calorimetría diferencial de barrido (DSC) – Porcentaje de Cristalinidad, Temperatura de Transición Vítrea

La temperatura de transición vítrea y el porcentaje de cristalinidad se determinaron mediante un calorímetro Shimadzu DSC-50, ilustrado en la Figura 3.7. Este equipo consta de una célula equipada con sensor cerámico que soporta temperaturas de hasta 600°C. El calorímetro está conectado a un ordenador equipado con un programa computacional que permite el tratamiento de los datos obtenidos en los ensayos.



Figura 3.7. Calorímetro diferencial de barrido (DSC).

3.3.2.3.4. Ensayo de dureza

El uso del medidor de dureza Shore D marca Bareiss, con escala analógica 0-100 y punta de acero de 1.4 mm diámetro y cono de 30°, ilustrado en la Figura 3.8, permitió obtener los datos de la dureza superficial de los materiales compuestos. Para esto se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM D-2240.



Figura 3.8. Durómetro Shore D marca Bareiss.

3.3.2.3.5. *Determinación de la densidad*

Basándose en las técnicas descritas en el trabajo de Morejón y Narváez [2004], la densidad de los compuestos finales se determinó mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D-792-91. Para esto se utilizó las probetas del ensayo a flexión, el conjunto de determinación de densidades Mettler Toledo, una balanza analítica Denver Instrument, modelo AA-200, de apreciación 0.0001 g y agua destilada como líquido de inmersión, mostrado en la Figura 3.9.



Figura 3.9. Sistema de balanza de plato suspendido para determinación de densidades de sólidos.

3.3.2.3.6. *Determinación de absorción de humedad*

La absorción de agua se determinó mediante el uso del Aparato de Kubelka, el cual se ilustra en la Figura 3.10, siguiendo el procedimiento descrito en la norma INEN 556. Las probetas para estas pruebas son las mismas utilizadas para el ensayo de flexión a 3 puntos.

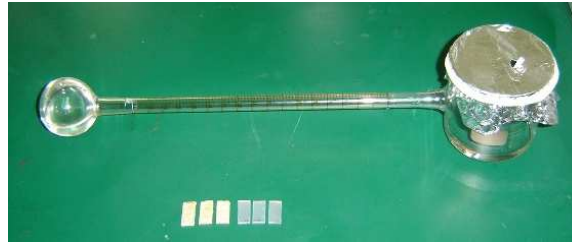


Figura 3.10. Aparato de Kubelka.

3.3.2.4. Fabricación del material compuesto

A continuación se describe brevemente los equipos y técnicas utilizadas para la fabricación de las placas del material compuesto.

3.3.2.4.1. Prensa calefactora

Para la conformación de los materiales estudiados (placas de material compuesto) se emplea la operación de moldeo por compresión. La prensa calefactora de laboratorio utilizada es el modelo 2112, marca Carver Laboratory, ver Figura 3.11. Es una prensa hidráulica de accionamiento manual, consta de un manómetro con escala de fuerza en un rango de 0 – 24000 lbf (0 – 11 Ton). Las planchas calefactoras pueden alcanzar temperaturas de hasta 400°C, independientemente. Posee un sistema de enfriamiento propio, el cual consta de placas de aluminio enfriadas mediante circulación interna de agua.



Figura 3.11. Prensa calefactora y baño térmico como sistema de enfriamiento.

Como se dijo anteriormente, el proceso de moldeo por compresión involucra variables de temperatura, tiempo, y presión en sus diferentes etapas. El procedimiento utilizado trata de determinar los efectos de cada una de estas variables sobre las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto final.

3.3.2.4.2. Baño térmico y sistema de enfriamiento

Con el fin de controlar la temperatura, el flujo de agua de enfriamiento, y por ende los tiempos en la etapa de enfriamiento del proceso del moldeo por compresión, se utilizó la máquina de baño térmico modelo G 000-5744, y bomba modelo D1 001-3950, del fabricante Haake, ilustrada en la Figura 3.12.

Como se especificó anteriormente, la prensa calefactora posee incorporado un sistema de enfriamiento a base de agua. El agua utilizada se toma de la acometida pública (EMAAP-Q) a través de mangueras conectadas a una red de tuberías internas en las placas de aluminio, propias de la prensa. Al hacerlo de esta manera, se está propenso a las variaciones de temperatura y flujo que la fuente pueda tener, además, al no tratarse de un sistema cerrado, se necesita una gran cantidad de agua la cual es desechada. Por estas razones se optó por utilizar el baño térmico en conjunto con su bomba, y así controlar la temperatura y flujo de agua, además de disminuir su consumo.

La bomba se conecta a la prensa por medio de las mangueras que salen de su filtro. La máquina de baño térmico posee un sistema de refrigeración y de calefacción, además de un control, el cual regula la temperatura de agua en un rango de -10°C a 100°C . Con todas las conexiones hechas, es decir considerando ya las caídas de presión, la bomba posee un caudal de 14.6 ml/s (52.56 l/h).

3.3.2.4.3. Molde cerrado tipo macho-hembra

Se fabricó un molde tipo macho-hembra, cuyos planos aparecen en el Anexo 4. La parte hembra del molde es hecha de acero estructural A-36, la parte macho del mismo es de duraluminio, tal como se ilustra en la Figura 3.12.

Las dimensiones reales de la cavidad del molde son $115.1 \times 131.2 \times 12\text{ mm}^3$.



Figura 3.12. Molde tipo macho-hembra utilizado en el moldeo por compresión.

3.3.2.4.4. Balanza analítica

La balanza analítica marca Mettler Toledo modelo PG5002-S, ilustrada en la Figura 3.13., con una apreciación de 0.01 g, y carga máxima de 5100 g, permite determinar el peso de los diferentes materiales. En la elaboración de los materiales compuestos, se utiliza la balanza para determinar la fracción másica de cada uno de sus componentes: fibra de abacá y polipropileno.



Figura 3.13. Balanza analítica marca Mettler Toledo modelo PG5002-S.

3.3.2.4.5. Torre de alimentación y molde de madera

Para la formación del mat de fibra corta se fabricó y utilizó una torre de alimentación, basándose en la descrita y utilizada por Jayaraman [2001] en su estudio. La torre es formada con cartón, el cual se dobla y pega para obtener la forma de 500 mm de alto por 115x113 mm² de base, tal como se muestra en la Figura 3.14 (a).

Adicionalmente se construyó un molde de madera de $115 \times 113 \times 30 \text{ mm}^3$, dimensiones similares a las del molde metálico, con la excepción del alto de sus paredes, tal como se aprecia en la Figura 3.14 (b). La fibra corta se deja caer por la torre en una placa de PP, la cual se encuentra dentro del molde de madera, garantizando el obtener una distribución al azar. Una explicación más detallada del proceso a seguir para la formación del mat de fibra y del material compuesto se describe en el apartado 3.4.2.1.

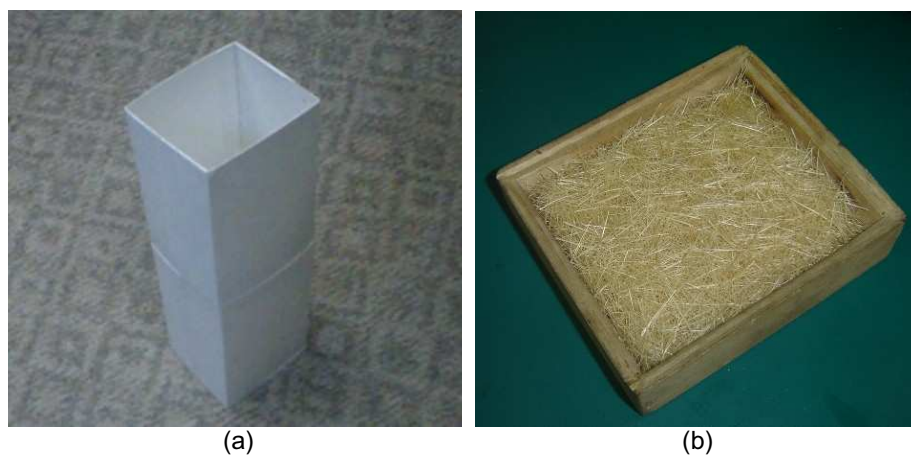


Figura 3.14. (a) Torre de alimentación; (b) molde de madera.

3.3.3. MATERIALES

En este apartado se presentan las principales características de los materiales que se han utilizado en el presente proyecto de titulación. Para cada uno de ellos se detalla brevemente su procedencia y utilización común. Asimismo, se especifican las características técnicas entregadas por el proveedor en comparación con algunas determinadas durante la experimentación.

3.3.3.1. Polipropileno - Matriz

El polipropileno que se utilizó en el presente proyecto de titulación es el polipropileno isotáctico homopolímero PP H-301 con índice de fluidez 10, de la casa fabricante Braskem S.A. Unidad Polifinas Triunfo PP, ilustrado en la Figura 3.15. Este grado de PP presenta una excelente procesabilidad en procesos de molde cerrado, como el moldeo por inyección y por compresión. Se utiliza para

propósitos que requieran buena fluidez a temperaturas de transformación moderadas. Por su toxicidad nula, baja transferencia de olor y sabor, y por presentar un excelente balance entre dureza y resistencia al impacto, es muy apto para aplicaciones como recipientes para comida, recipientes de cosméticos, vasos de bebidas, estantes de los refrigeradores, cuerdas, cintas, etc. Su procesado no requiere ningún pretratamiento de secado y el punto de fluidez es de 153°C. Esta calidad de PP cumple, gracias a su composición, con los requerimientos de aplicaciones para plástico con contacto con alimentos.



Figura 3.15. Polipropileno PP H-301 Braskem.

A continuación, en la Tabla 3.1., se presentan las características del PP H301 dadas por el fabricante.

Tabla 3.1. Propiedades de polipropileno homopolímero Braskem PP H301. Fuente IDES

| Propiedades Físicas | | |
|--------------------------|-------------------------|------------|
| Densidad | 0.905 g/cm ³ | ASTM D792 |
| MFI (230° C / 2.16 kg) | 10g / 10min | ASTM D1238 |
| Propiedades Mecánicas | | |
| Esfuerzo de fluencia | 33 MPa | ASTM D638 |
| Elongación a la fluencia | 13% | ASTM D638 |
| Módulo de flexión | 1530MPa | ASTM D790 |
| Dureza Rockwell R | 90 | ASTM D785 |
| Propiedades Térmicas | | |
| Punto vicat | 153° C | ASTM D1525 |

3.3.3.2. Fibra de abacá – Refuerzo

La fibra de abacá, que sirve como refuerzo de la matriz de PP, fue suministrada por la Cooperativa Abacá del Ecuador a través del Centro Textil Politécnico de la EPN. Se dispuso de fibra de calidad 3, ilustrada en la Figura 3.16., proveniente de Santo Domingo. Esta fibra ha sido ya caracterizada en el trabajo de Morejón Y Narváez [2004], en el cual consta información de diámetro y resistencia mecánica a la tracción. Estos resultados se muestran a continuación:



Figura 3.16. Fibra de abacá calidad 3.

3.3.3.2.1. Diámetro de la fibra

Se especifica un promedio en el diámetro de la fibra, además de la frecuencia o diagrama de distribución de los diámetros de fibra en diferentes rangos. El tamaño de la muestra es de 30, tomada al azar. Los resultados se ilustran en la Tabla 3.2 y Figura 3.17.

Tabla 3.2. Frecuencia, promedio y desviación estándar del diámetro de la fibra de abacá calidad 3 [Morejón y Narvaez, 2004].

| Diámetro (mm) | Frecuencia |
|---------------|------------|
| 0.171 – 0.195 | 4 |
| 0.196 – 0.220 | 3 |
| 0.221 – 0.245 | 9 |
| 0.246 – 0.270 | 3 |
| 0.271 – 0.295 | 7 |

| | |
|------------------|------------------------|
| 0.296 – 0.320 | 2 |
| 0.321 – 0.345 | 0 |
| 0.346 – 0.370 | 0 |
| 0.371 – 0.393 | 2 |
| Promedio (mm) | Desviación Estándar |
| 0.252 | 0.054 |

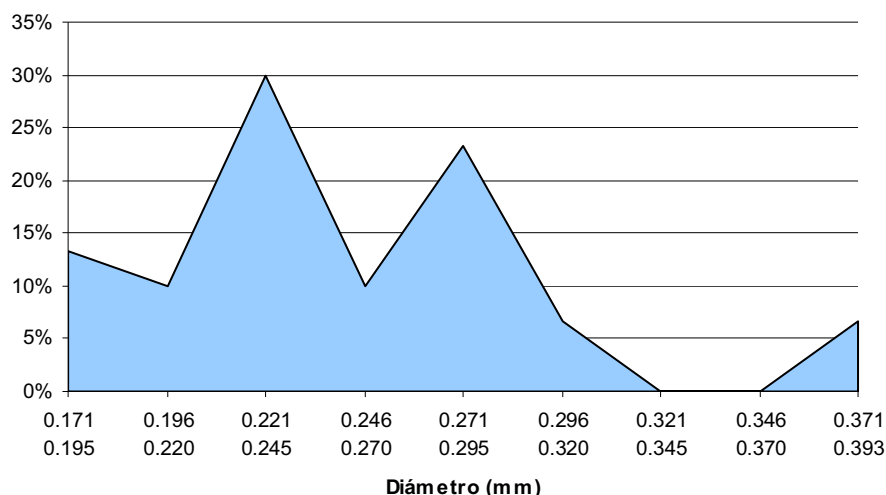


Figura 3.17. Distribución del diámetro de fibra de abacá [Morejón y Narvaez, 2004].

Es decir, la fibra de abacá calidad 3 posee un diámetro promedio de 0.252 con una desviación estándar de 0.054. Considerando una distribución normal, existe la probabilidad del 95% de que el diámetro de esta fibra esté entre 0.144 y 0.360 mm, lo cual se demuestra en la Figura 3.17. Además, se puede apreciar que existe una probabilidad del 63% de que el diámetro de la fibra este en un rango menor a 0.295 mm.

3.3.3.2.2. *Propiedades mecánicas de la fibra*

Al realizar el corte de la fibra no se consideró que esta sea parte inicial, media o final de la longitud total de cada fibra, tal como se describe en el trabajo de referencia. Sino más bien se cortó toda la fibra y se realizó una mezcla de esta, con el fin de obtener una mejor uniformidad en las propiedades de la misma. Los datos de esfuerzo de rotura a la tensión y módulo se describen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Propiedades mecánicas de la fibra de abacá calidad 3 [Morejón y Narváez, 2004].

| Abacá Calidad 3 | Deformación (%) | Esfuerzo (kg/mm²) | Módulo (kg/mm²) |
|------------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Parte Inicial | 3.877 ± 0.289 | 78.99 ± 13.95 | 2149.30 ± 288.13 |
| Parte Media | 3.849 ± 0.307 | 128.62 ± 9.84 | 3441.86 ± 210.03 |
| Parte Final | 3.315 ± 0.428 | 126.24 ± 20.43 | 3840.70 ± 431.48 |
| PROMEDIO | 3.680 ± 0.474 | 111.28 ± 30.17 | 3143.95 ± 866.45 |

Según Morejón y Narváez [2004], la fibra de abacá calidad 3 utilizada posee una resistencia última a la tensión de $111.28 \pm 30.17 \text{ kg/mm}^2$ ($1091 \pm 295.87 \text{ MPa}$), con un módulo de elasticidad de $3143.95 \pm 866.45 \text{ kg/mm}^2$ ($30832 \pm 8497 \text{ MPa}$).

3.3.4. SOSA NaOH - TRATAMIENTO DE LA FIBRA

El hidróxido de sodio (NaOH) 1310-73-2 de la casa fabricante J.T. Baker, ilustrado en la Figura 3.18, se utilizó para el proceso de mercerización. Las principales propiedades físicas y químicas provistas por el fabricante son:

- Forma: Sólido, en pellets.
- Color: Blanco
- Olor: Inodoro
- Punto de fusión: 319°C
- Punto de ebullición: 1390°C
- Presión de vapor a 60°C: 1.73 kPa
- Densidad a 20°C: 2.13 g/cm³
- Solubilidad en Agua a 20°C: 420 g/l
- PH: 13 - 14 (0.5% solución.)

El hidróxido de sodio es usado en la industria (principalmente como una base química) en la fabricación de papel, tejidos, y detergentes. A temperatura ambiente, el hidróxido de sodio es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe humedad del aire. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales combustibles.



Figura 3.18. Sosa cáustica 1310-73-2 utilizada para la mercerización de la fibra.

3.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.4.1. PRIMERA ETAPA: PROCESABILIDAD DE LA MATRIZ

En este apartado se describen las pruebas realizadas para estudiar el procesamiento del PP H-301 mediante moldeo por compresión. Se divide en tres partes, en la primera, se determina el índice de fluidez del PP virgen, en función del tiempo de calentamiento; en la segunda, se establecen las variables de la fase enfriamiento mediante un análisis del porcentaje de cristalinidad y de la respuesta mecánica a la tracción. La tercera se centra en determinar los parámetros de las demás fases del moldeo por compresión, mediante un análisis visual de defectos.

Basándose en lo expuesto en el apartado 2.6.3 respecto al proceso del moldeo por compresión y en las condiciones de procesamiento que se pueden controlar con el uso de la prensa calefactora, se listan a continuación las variables o parámetros que se estudian en el presente proyecto y que intervienen en las diferentes fases del proceso:

Fase de precalentamiento:

- T_1 : temperatura de precalentamiento
- t_1 : tiempo de precalentamiento
- P_1 : presión de precalentamiento

Fase de moldeo:

- T_2 : temperatura de moldeo
- t_2 : tiempo de moldeo
- P_2 : presión de moldeo

Fase de enfriamiento:

- T_3 : temperatura inicial del agua de enfriamiento
- t_3 : tiempo de enfriamiento
- P_3 : presión de enfriamiento

Otra variable que se consideró en este proceso que tiene la característica de ser tipo “batch” (por tanda), es la cantidad en masa de material que se coloca en el molde.

3.4.1.1. Índice de fluidez del PP H-301

Según la norma ASTM D-1238 [1995], para una matriz de PP, el peso necesario es de 2.160 kg y la temperatura de 230°C. Se determinó el índice de fluidez del PP sin procesar, es decir de los pellets entregados por el fabricante. Además, con el fin de analizar el efecto que se induce sobre el MFI del PP al mantenerlo bajo efectos del calor, se ensayaron placas de PP fabricadas con una temperatura de 180°C y presión atmosférica aplicada durante tiempos de 10, 15, 30, 45 y 60 minutos.

De cada ensayo se obtienen 10 muestras con sus respectivos MVR (melt volumen rate), calculados automáticamente por la máquina basándose en el procedimiento B descrito en la norma. Las muestras son pesadas para obtener la densidad de cada una. Al multiplicar los MVR por la densidad respectiva, tal como se describe en la ecuación (3.1), se obtiene el MFI de cada muestra. Finalmente se calcula un promedio de los MFI obtenidos. El índice de fluidez se expresa en gramos extraídos por la tobera en un tiempo de diez minutos [g/10 min].

$$MFI = \rho \times MVR \quad (3.1)$$

donde:

MFI = índice de fluidez, en g/10min.

ρ = densidad, en g/cm³

MVR = tasa de fusión volumétrica, en cm³/10min.

3.4.1.2. Parámetros de enfriamiento

Para determinar los efectos que tiene la fase de enfriamiento en las propiedades del material estudiado se realizaron pruebas variando la fuente y la temperatura inicial del agua que pasa enfriando las placas de aluminio, propias de la prensa, que están en contacto con el molde. Se mantuvieron constantes los demás parámetros del moldeo por compresión, y los valores recomendados por bibliografía [Jayaraman, 2001], ilustrados en la Tabla 3.5. Estas placas se caracterizaron determinando el porcentaje de cristalinidad, y propiedades mecánicas de tracción. Como suministro del agua de enfriamiento para estas pruebas se utilizó: red pública EMAAP-Q a una temperatura inicial del agua (T_3) no determinada, y un baño térmico con caudal fijo en el cual se regula T_3 a 0°C para una prueba y a 15°C para otra. Cabe recalcar que la T_3 es la temperatura inicial del agua, pero esta aumenta en el transcurso del tiempo por tratarse de un sistema cerrado. Para el caso de $T_3 = 0^\circ\text{C}$, la temperatura final aproximada es de 10°C, en el caso de $T_3 = 15^\circ\text{C}$, la temperatura luego del proceso es de aproximadamente 20°C. La Tabla 3.4., muestra las pruebas o placas realizadas.

Tabla 3.4. Pruebas realizadas para determinar efecto del enfriamiento en el PP.

| Pruebas | T_3 (° C) | Fuente |
|--------------------|-------------|--------------|
| PP-ENF-S/CONTROL | Variable | EMAAP-Q |
| PP-ENF-0°/CONTROL | 0 | Baño térmico |
| PP-ENF-15°/CONTROL | 15 | Baño térmico |

3.4.1.2.1. Porcentaje de cristalinidad

Se calculó el porcentaje de cristalinidad para las muestras elaboradas con las distintas condiciones de enfriamiento, a través de la ecuación (3.2).

$$W_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} 100 \quad (3.2)$$

donde:

W_c = porcentaje de cristalinidad de la muestra, en %

ΔH_m = entalpía de fusión experimental de la muestra, en J/g

ΔH_m^0 = entalpía de fusión del material 100% cristalino, en J/g

La entalpía de fusión experimental se determinó del análisis térmico de calorimetría diferencial de barrido (DSC), mientras que la entalpía teórica del material 100% cristalino ($\Delta H_m^0 = 207$ J/g [Wunderlich, 1990]) se obtuvo de la “Tabla 1.3” del libro de Ehrenstein [2004], dicha tabla se transcribe en el Anexo 3.

Para todos los ensayos de DSC se utilizaron panes de aluminio de 4 mm de diámetro, los cuales se pesaron antes y después de contener la muestra de PP, mediante el uso de una balanza Shimadzu modelo Libror AEL-40SM, con apreciación de 0.00001 g. Las muestras se obtuvieron raspando las superficies de cada probeta preparada. El perfil de temperatura se ajustó a un rango de 20 a 180 °C con una tasa de incremento de 10°C/min.

3.4.1.2.2. *Ensayo de tracción del PP obtenido con diferentes enfriamientos*

Continuando con el estudio de las variables del enfriamiento, se prepararon las probetas tipo IV, según norma, para ensayos a tracción. La apertura entre mordazas utilizada fue de 65 mm, mientras que la velocidad de ensayo fue de 10 mm/min. Aunque esta velocidad no está normalizada para este tipo de probetas, se la usó porque permite la rotura de la probeta en un tiempo menor a 5 minutos y además se aproxima a la utilizada posteriormente en los materiales compuestos (5 mm/min).

3.4.1.3. **Pre calentamiento y moldeo de la matriz mediante moldeo por compresión**

Para determinar los demás parámetros del procesamiento por moldeo por compresión de la matriz se tomó en cuenta varios aspectos, sin querer decir que estos garantizan las mejores propiedades mecánicas en la misma. Estos aspectos

son: disminuir los daños o degradación que puede sufrir la fibra al ser incorporada a la matriz para formar el compuesto, ya que la fibra de abacá posee una baja resistencia térmica [Morejón y Narváez, 2004]; disminuir el tiempo que lleva la fabricación de las placas de PP; y, reducir al mínimo la presión necesaria para obtener placas sin defectos visibles.

Para la evaluación visual de las placas de PP obtenidas se consideró la presencia de burbujas y el llenado completo del molde con el material (placas completas). Las variables de procesamiento se estudiaron y determinaron individualmente variando una sola condición y manteniendo constante el resto de condiciones del proceso de moldeo por compresión.

En todas las pruebas, para el moldeo y precalentamiento se tomó como punto de partida a los parámetros expuestos en bibliografía [Jayaraman, 2001], y para el enfriamiento se utilizaron las condiciones que se determinaron en la etapa anterior, cuyos resultados se detallan en el apartado 4.1.3. Estas condiciones se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Parámetros iniciales del moldeo por compresión.

| | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| <i>Precalentamiento</i> | $T_1 = 180 \pm 5^\circ \text{ C}$ | $t_1 = 10 \text{ min.}$ | $P_1 = 0 \text{ MPa}$ |
| <i>Moldeo</i> | $T_2 = 180 \pm 5^\circ \text{ C}$ | $t_2 = 5 \text{ min.}$ | $P_2 = 0.736 \text{ MPa (2500 lbf)}$ |
| <i>Enfriamiento</i> | $T_3 = 0 \pm 2^\circ \text{ C}$ | $t_3 = 10 \text{ min.}$ | $P_3 = 0 \text{ MPa}$ |

3.4.1.3.1. Determinación de cantidad de material necesaria

Para determinar la cantidad de masa necesaria en gramos de pellets de PP que se debe poner en el molde, se realizaron varias pruebas colocando las cantidades mostradas en la Tabla 3.6, y manteniendo constantes los demás parámetros del moldeo por compresión. Estos parámetros se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.6. Pruebas para determinar la masa necesaria de PP.

| Prueba | Masa de PP (g) |
|---------------|-----------------------|
| <i>PP-01</i> | 5 |
| <i>PP-02</i> | 10 |

| | |
|--------------|----|
| <i>PP-03</i> | 15 |
| <i>PP-04</i> | 20 |
| <i>PP-05</i> | 25 |
| <i>PP-06</i> | 13 |

3.4.1.3.2. Temperatura mínima de precalentamiento y moldeo

Una vez determinada la masa mínima de material a utilizar, se prosiguió a variar y determinar la temperatura mínima de precalentamiento (T_1) y de moldeo (T_2) necesaria para garantizar una correcta fusión del PP y obtener placas aceptables mediante inspección visual. Se varió la temperatura en un rango de 150 a 200°C, de la forma mostrada en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Pruebas para determinar temperaturas de procesamiento.

| Pruebas | Temperatura T_1 (° C) | Temperatura T_2 (° C) |
|----------------|---|---|
| <i>PP-07</i> | 200 ± 5 | 200 ± 5 |
| <i>PP-08</i> | 200 ± 5 | 190 ± 5 |
| <i>PP-09</i> | 190 ± 5 | 200 ± 5 |
| <i>PP-10</i> | 190 ± 5 | 190 ± 5 |
| <i>PP-11</i> | 190 ± 5 | 180 ± 5 |
| <i>PP-12</i> | 180 ± 5 | 190 ± 5 |
| <i>PP-13</i> | 180 ± 5 | 180 ± 5 |
| <i>PP-14</i> | 180 ± 5 | 170 ± 5 |
| <i>PP-15</i> | 170 ± 5 | 180 ± 5 |
| <i>PP-16</i> | 170 ± 5 | 170 ± 5 |
| <i>PP-17</i> | 170 ± 5 | 160 ± 5 |
| <i>PP-18</i> | 160 ± 5 | 170 ± 5 |
| <i>PP-19</i> | 160 ± 5 | 160 ± 5 |
| <i>PP-20</i> | 160 ± 5 | 150 ± 5 |
| <i>PP-21</i> | 150 ± 5 | 160 ± 5 |
| <i>PP-22</i> | 150 ± 5 | 150 ± 5 |

Puesto que no se desea que el tiempo que demoran las placas calefactores en realizar estos cambios de temperatura sea muy grande, la secuencia de las pruebas se dio con el fin de evitar una gran diferencia entre las temperaturas de precalentamiento y de moldeo. Se tomó como referencia la mínima temperatura de 166°C que es a la cual el PP homopolímero comienza a derretirse, y la máxima temperatura de 200°C a la cual es aconsejable procesar la fibra para que esta no se degrade.

Se eligió como temperaturas de procesamiento a las temperaturas mínimas a las cuales se obtuvieron placas sin burbujas. De esta manera se disminuye el riesgo de degradación de la fibra al momento de conformarla junto con la matriz. Además, se disminuyen costos de consumo de energía.

3.4.1.3.3. Presión mínima de procesamiento

En cuanto a la presión, se decidió que para la obtención de las placas de PP, únicamente se la aplicará en la fase de moldeo. Esto se debe a que en las pruebas anteriores se observó que para el conformado de las matrices no hace falta presión en el precalentamiento ni en el enfriamiento. Para determinar con qué presión mínima se obtienen placas visualmente aceptables se prosiguió a realizar las pruebas descritas en la Tabla 3.8, variando la fuerza aplicada en un rango de 3000 a 5000 lbf y manteniendo las otras condiciones constantes ($T_1 = T_2 = 180^\circ\text{C}$, $T_3 = 0^\circ\text{C}$, $t_1 = 10$ min, $t_2 = 5$ min, $t_3 = 10$ min, $P_3 = 0$ MPa).

Tabla 3.8. Pruebas para determinar presión mínima necesaria de procesamiento.

| Pruebas | Presión P_2 (MPa) | Fuerza (lbf) |
|---------|---------------------|--------------|
| PP-23 | 0.884 | 3000 ± 100 |
| PP-24 | 0.736 | 2500 ± 100 |
| PP-25 | 0.589 | 2000 ± 100 |
| PP-26 | 0.442 | 1500 ± 100 |
| PP-27 | 0.295 | 1000 ± 100 |
| PP-28 | 0.147 | 500 ± 100 |

Dado que la apreciación del manómetro es de 100 lbf y comienza a partir de los 300 lbf, se decidió ir variando la presión en pasos de de 500 lbf. La presión que se calcula adicionalmente representa a aquella presión real que está siendo aplicada sobre el material. Para determinar esta es necesario conocer el área del molde (131 x 115 mm²).

3.4.1.3.4. Tiempo mínimo de precalentamiento y moldeo

Asimismo, con el afán de disminuir el tiempo de exposición del material al calor, se procedió a determinar los tiempos mínimos necesarios para la obtención de las placas de PP sin defectos visuales. Los tiempos de precalentamiento (t_1) y moldeo (t_2) probados, se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Pruebas para determinar el tiempo de procesamiento de la matriz PP.

| Pruebas | Tiempo t_1 (min) | Tiempo t_2 (min) |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>PP-29</i> | 10 | 5 |
| <i>PP-30</i> | 10 | 4 |
| <i>PP-31</i> | 10 | 3 |
| <i>PP-32</i> | 10 | 2 |
| <i>PP-33</i> | 10 | 1 |
| <i>PP-34</i> | 5 | 5 |
| <i>PP-35</i> | 5 | 4 |
| <i>PP-36</i> | 5 | 3 |
| <i>PP-37</i> | 5 | 2 |
| <i>PP-38</i> | 5 | 1 |
| <i>PP-39</i> | 4 | 5 |
| <i>PP-40</i> | 4 | 4 |
| <i>PP-41</i> | 4 | 3 |
| <i>PP-42</i> | 4 | 2 |
| <i>PP-43</i> | 4 | 1 |
| <i>PP-44</i> | 3 | 5 |
| <i>PP-45</i> | 3 | 4 |
| <i>PP-46</i> | 3 | 3 |

| | | |
|--------------|---|---|
| <i>PP-47</i> | 3 | 2 |
| <i>PP-48</i> | 3 | 1 |

No es posible utilizar tiempos menores de 3 min. en el precalentamiento ya que en promedio es lo que tarda el molde en alcanzar y estabilizar su temperatura a la ajustada en el potenciómetro de las placas calefactoras.

Con las variables del moldeo por compresión determinadas y establecidas en esta etapa, se fabricarán las placas que posteriormente formarán parte de la matriz del material compuesto tipo sánduche. Además, con alguna ligera modificación, servirán como base para la elaboración del compuesto en la etapa del estudio de su composición.

3.4.2. SEGUNDA ETAPA: COMPOSICIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

En esta parte del estudio experimental se determinó el efecto que tiene la longitud de la fibra y su fracción en masa sobre las propiedades mecánicas de tracción y flexión del material compuesto.

Todos los compuestos con diferente porcentaje en peso de fibra y con diferentes longitudes de la misma, se los fabricó utilizando las mismas condiciones de procesamiento, que se ilustran en la Tabla 3.10. Para establecer estas condiciones se tomó como base los resultados de la fase anterior, de procesabilidad de la matriz, resultados que se detallan en el apartado 4.1. Sin embargo, se decidió duplicar el tiempo de calentamiento y la fuerza aplicada, con el fin de lograr una mejor humectación de la fibra con el PP, sin querer decir que con esto se logra obtener las mejores condiciones para el conformado de este tipo de material.

Tabla 3.10. Parámetros de procesamiento utilizados en la fase de composición del material.

| | | | |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| <i>Pre calentamiento</i> | $T_1 = 180 \pm 5^\circ \text{C}$ | $T_1 = 10 \text{ min.}$ | $P_1 = 0 \text{ MPa}$ |
| <i>Moldeo</i> | $T_2 = 180 \pm 5^\circ \text{C}$ | $T_2 = 2 \text{ min.}$ | $P_2 = 0.884 \text{ MPa (3000 lbf)}$ |
| <i>Enfriamiento</i> | $T_3 = 0 \pm 2^\circ \text{C}$ | $T_3 = 10 \text{ min.}$ | $P_3 = 0 \text{ MPa}$ |

Como materia prima en la fabricación de los materiales compuestos se utilizaron las placas de PP pre-moldeadas como matriz y la fibra cortada y secada como refuerzo. Basándose en la bibliografía, se decidió trabajar con longitudes de 10, 20, 30 mm para la fibra discontinua y 110 mm (ancho del molde) para la fibra continua. Asimismo, las fracciones en masa de fibra fueron de 15%, 20%, 30% y 35%.

Para un mejor entendimiento, en la Figura 3.19 se ilustra un esquema general de las pruebas realizadas en esta etapa del estudio experimental.

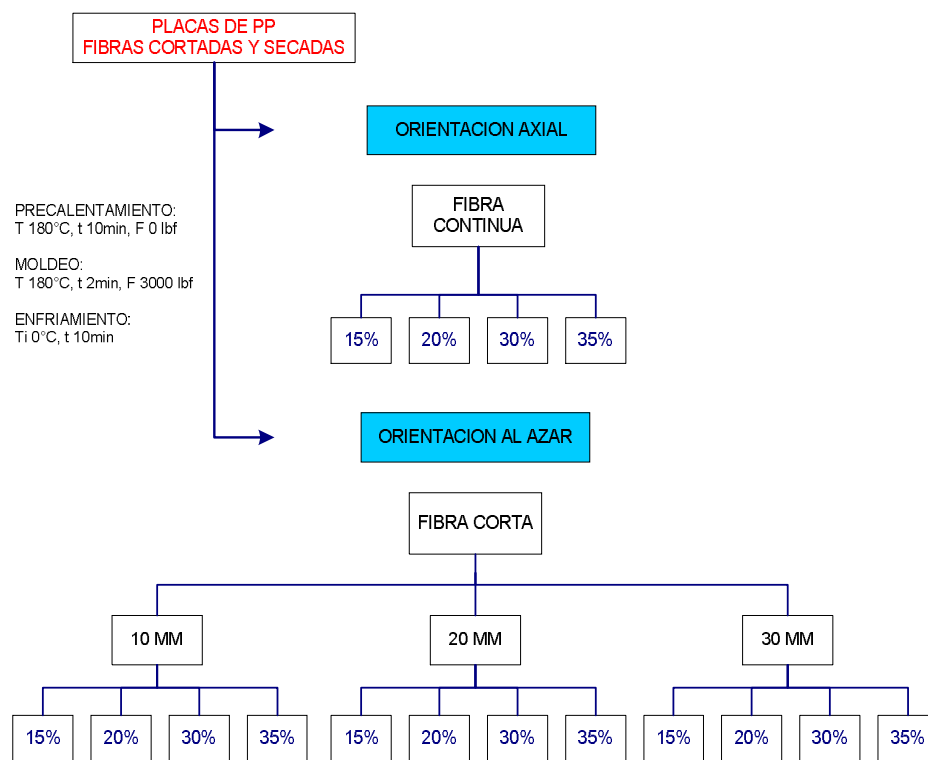


Figura 3.19. Esquema del proceso realizado en la etapa de composición.

Para evaluar las propiedades del material compuesto en relación a las del PP solo, es decir, analizar si existe un aumento o un refuerzo en las propiedades mecánicas de este, se fabricó y ensayó en primer lugar placas de PP sin fibra. Se colocó dos placas de PP pre-fabricadas en el molde de acero, para luego ser moldeadas con las mismas condiciones de procesamiento de los compuestos mencionadas en la Tabla 3.10.

La serie de pruebas realizadas para determinar la composición óptima del material compuesto se ilustra en la Tabla 3.11. En la primera columna de esta tabla se muestra una codificación de cuatro dígitos para cada prueba. Estos dígitos denotan la utilización de fibra continua o la longitud de la fibra utilizada, en caso de tratarse de fibras cortas, y el porcentaje másico de fibra incorporada.

Tabla 3.11. Pruebas realizadas para determinar la composición del material compuesto.

| Prueba | Longitud de Fibra (mm) | Fibra (%) | Orientación |
|---------------|-------------------------------|------------------|--------------------|
| 0000 | 0 | 0 | N/A |
| 1510 | 10 | 15 | Al azar |
| 2010 | 10 | 20 | Al azar |
| 3010 | 10 | 30 | Al azar |
| 3510 | 10 | 35 | Al azar |
| 1520 | 20 | 15 | Al azar |
| 2020 | 20 | 20 | Al azar |
| 3020 | 20 | 30 | Al azar |
| 3520 | 20 | 35 | Al azar |
| 1530 | 30 | 15 | Al azar |
| 2030 | 30 | 20 | Al azar |
| 3030 | 30 | 30 | Al azar |
| 3530 | 30 | 35 | Al azar |
| 15FC | 118 | 15 | Unidireccional |
| 20FC | 118 | 20 | Unidireccional |
| 30FC | 118 | 30 | Unidireccional |
| 35FC | 118 | 35 | Unidireccional |

3.4.2.1. Procedimiento para elaborar placas tipo sánduche

Para la elaboración de las placas del material compuesto tipo sánduche se siguieron los siguientes pasos:

- Se garantiza la disponibilidad de las materias primas, fibra cortada y secada, y dos placas de PP premoldeadas.

- Se pesan las placas para determinar la cantidad en masa de fibra necesaria para cumplir las fracciones de 15%, 20%, 30%, y 35% en fibra. A continuación se muestra la ecuación utilizada para determinar la masa de fibra necesaria:

$$M_{fibra} = \frac{M_{pp} \times \% fibra}{100 - \% fibra} \quad (3.3)$$

- Se coloca una de las placas en la base del molde de madera. A continuación se añaden las fibras. En las placas con fibras orientadas al azar se utilizó la torre de alimentación para distribuir las fibras sobre la placa. En las placas de fibra continua la fibra se colocó de manera que queden lo más orientadas posibles, mediante la utilización de una peinilla para cabello.
- Una vez lograda una buena distribución de la fibra, se procede a colocar la placa superior y pasar este sánduche al molde metálico para comenzar el proceso de moldeo en la prensa calefactora.

Las placas obtenidas se evalúan mediante los ensayos mecánicos de tracción y de flexión, especificados en el apartado 3.4.4. Los resultados obtenidos en estos ensayos permitirán realizar gráficas, con las cuales se pretende determinar dos composiciones diferentes del material que mejor gama de propiedades mecánicas tengan.

3.4.3. TERCERA ETAPA: PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO

En esta etapa de la investigación se evaluaron los efectos que tienen los parámetros del procesamiento del moldeo por compresión sobre las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Las composiciones seleccionadas en la etapa anterior son 35% con fibra de 30 mm (composición 1), y 30% con fibra de 20 mm (composición 2). Con esta selección se obtuvieron las mejores propiedades en función de la composición y longitud de fibras, resultados que se detallan en el apartado 4.2.1.

Como primer paso, se fijó la temperatura de precalentamiento (T_1) y de moldeo (T_2) en 180°C, ya que esta ha demostrado ser una temperatura que no degrada a

la fibra y que permite una correcta fusión de la matriz. Además, esta temperatura es la recomendada por la bibliografía [Jarayaman, 2001], como se mencionó anteriormente.

3.4.3.1. Fase de moldeo

De las pruebas realizadas en la etapa de composición del material, se ha visto que los parámetros usados en la fase de precalentamiento garantizan que todo el PP se funda. Por este motivo se decidió comenzar variando los parámetros de procesamiento en la fase de moldeo, y mantener en un comienzo el tiempo (t_1) de 10 minutos y 0 MPa de presión (P_1) en la fase de precalentamiento. Para la fase de enfriamiento se mantuvo una temperatura inicial del agua (T_3) de 0°C y 0 MPa de presión (P_3). La variación de parámetros que se siguió se ilustra en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Pruebas de estudio para la fase de moldeo.

| Prueba | Composición | Tiempo t_2 (min.) | Presión P_2 (MPa) | Fuerza (lbf) |
|---------------|--------------------|---|---|-------------------------|
| <i>P001</i> | 1 | 2 | 0.884 | 3000 |
| <i>P002</i> | 1 | 2 | 1.473 | 5000 |
| <i>P003</i> | 1 | 2 | 2.062 | 7000 |
| <i>P004</i> | 1 | 4 | 0.884 | 3000 |
| <i>P005</i> | 1 | 4 | 1.473 | 5000 |
| <i>P006</i> | 1 | 4 | 2.062 | 7000 |
| <i>P007</i> | 1 | 6 | 0.884 | 3000 |
| <i>P008</i> | 1 | 6 | 1.473 | 5000 |
| <i>P009</i> | 1 | 6 | 2.062 | 7000 |
| <i>P010</i> | 2 | 2 | 0.884 | 3000 |
| <i>P011</i> | 2 | 2 | 1.473 | 5000 |
| <i>P012</i> | 2 | 2 | 2.062 | 7000 |
| <i>P013</i> | 2 | 4 | 0.884 | 3000 |
| <i>P014</i> | 2 | 4 | 1.473 | 5000 |

| | | | | |
|------|---|---|-------|------|
| P015 | 2 | 6 | 2.062 | 7000 |
| P016 | 2 | 6 | 0.884 | 3000 |
| P017 | 2 | 6 | 1.473 | 5000 |
| P018 | 2 | 6 | 2.062 | 7000 |

Para un mejor entendimiento del proceso, en la Figura 3.20, se presenta el diagrama de las pruebas realizadas, mostrando el cambio de cada variable dentro de esta fase de moldeo.

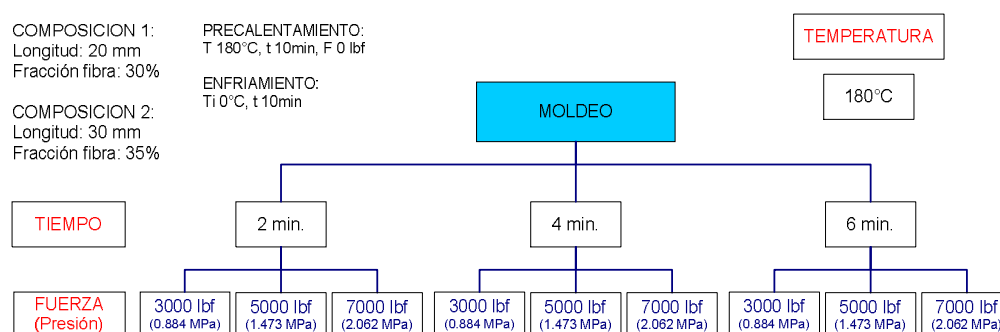


Figura 3.20. Diagrama de pruebas realizadas en la fase de moldeo.

Así como se hizo en la etapa de composición del compuesto, se evaluaron las placas mediante ensayos de tracción y flexión, y mediante estos resultados se seleccionaron los parámetros de moldeo que mejor combinación de propiedades mecánicas presentaron para los materiales compuestos. Los parámetros de tiempo y presión aquí seleccionados y utilizados en la siguiente parte de esta etapa, en donde se pretende optimizar los parámetros del precalentamiento, son de $t_2 = 2$ min y de $P_2 = 1.47$ MPa para ambas composiciones, resultado que se detalla en el apartado 4.3.1.

3.4.3.2. Fase de precalentamiento

La optimización de los parámetros en la fase de precalentamiento se realizó variando la presión y el tiempo involucrado, como se muestra en la Tabla 3.13. La temperatura T_1 se mantuvo constante en 180°C. Las condiciones de moldeo se

mantuvieron constantes, utilizando las condiciones anteriormente mejoradas. Para la fase de enfriamiento se mantuvo constante la temperatura inicial del agua (T_3) en 0°C y 0 MPa de presión (P_3).

Tabla 3.13. Pruebas para establecer los parámetros de la fase de precalentamiento.

| Prueba | Composición | Tiempo t_1 (min) | Presión P_1 (MPa) | Fuerza (lbf) |
|--------|-------------|-----------------------|------------------------|-----------------|
| P019 | 1 | 5 | 0 | 0 |
| P020 | 1 | 5 | 0.884 | 3000 |
| P021 | 1 | 5 | 1.473 | 5000 |
| P022 | 1 | 10 | 0 | 0 |
| P023 | 1 | 10 | 0.884 | 3000 |
| P024 | 1 | 10 | 1.473 | 5000 |
| P028 | 2 | 5 | 0 | 0 |
| P029 | 2 | 5 | 0.884 | 3000 |
| P030 | 2 | 5 | 1.473 | 5000 |
| P031 | 2 | 10 | 0 | 0 |
| P032 | 2 | 10 | 0.884 | 3000 |
| P033 | 2 | 10 | 1.473 | 5000 |

En la Figura 3.21 se ilustra el diagrama en el cual constan las variables que intervienen y los resultados de los parámetros determinados de la fase anterior y utilizados en esta fase.

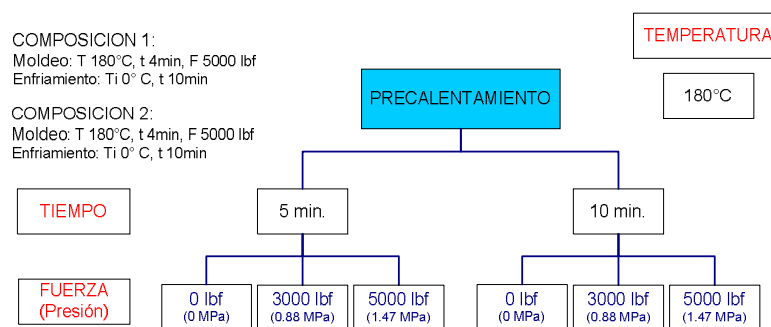


Figura 3.21. Diagrama de pruebas realizadas en la fase de precalentamiento.

De igual manera que en la fase anterior, los ensayos de tracción y flexión se utilizaron para determinar las mejores condiciones de precalentamiento. Estas condiciones se utilizan en la siguiente fase de enfriamiento.

3.4.3.3. Fase de enfriamiento

Para mejorar la fase de enfriamiento, se varió únicamente la presión P_3 , puesto que la temperatura del agua T_3 se estableció a 0°C y el tiempo t_3 necesario para que el molde se enfríe es de 10 min. Utilizando los parámetros antes determinados para las fases de moldeo ($T_2 = 180^\circ\text{C}$, $P_2 = 1.473\text{ MPa}$, $t_2 = 4\text{ min}$) y precalentamiento (composición 1: $P_1 = 1.473\text{ MPa}$ y $t_1 = 5\text{ min}$; composición 2: $P_1 = 0.882\text{ MPa}$ y $t_1 = 10\text{ min}$) se realizaron las pruebas mostradas en la Tabla 3.14. Adicionalmente, la Figura 3.22 es una ilustración de las variables y constantes utilizadas para este estudio.

Tabla 3.14. Pruebas realizadas para el estudio de los parámetros del enfriamiento.

| Pruebas | Composición | Tiempo t_3 (min) | Presión P_3 (MPa) | Fuerza (lbf) |
|---------|-------------|-----------------------|------------------------|-----------------|
| P034 | 1 | 10 | 0 | 0 |
| P035 | 1 | 10 | 0.736 | 2500 |
| P036 | 1 | 10 | 1.473 | 5000 |
| P037 | 2 | 10 | 0 | 0 |
| P038 | 2 | 10 | 0.736 | 2500 |
| P039 | 2 | 10 | 1.473 | 5000 |

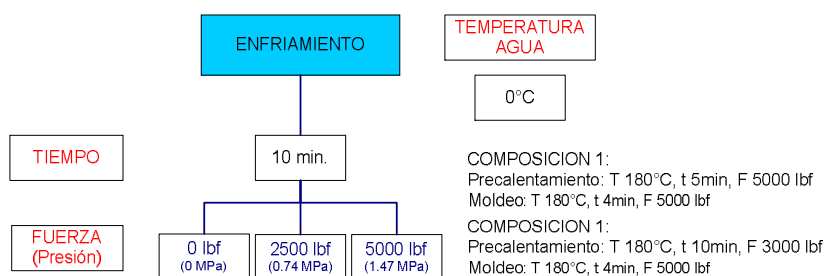


Figura 3.22. Diagrama de pruebas realizadas en la fase de enfriamiento.

Mediante los resultados obtenidos de los ensayos de tracción y flexión se determinaron las condiciones de enfriamiento que permiten la mejor combinación de propiedades mecánicas de los compuestos en las dos composiciones estudiadas (30 mm con 35% en fibra, y 20 mm con 30% en fibra).

3.4.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES OBTENIDOS

Todas las muestras obtenidas de PP y de material compuesto se caracterizaron mediante ensayos de tracción y flexión. Sin embargo, para los compuestos finales que se obtuvieron utilizando las condiciones óptimas de procesamiento, se realizó una caracterización más amplia, en la que se incluyen ensayos de dureza, y de las propiedades físicas de densidad y absorción de agua. En cuanto a las propiedades de tensión y flexión de los compuestos finales, se amplió el número de muestras por cada compuesto con el fin de obtener resultados más precisos.

3.4.4.1. Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción fueron realizados en acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D-638 [97], utilizando las probetas de tracción tipo IV descritas en su apartado 7, y como se pueden observar en la Figura 3.23. Según norma, las probetas tipo IV deben poseer un ancho (W) de 6 mm. Sin embargo con el troquel utilizado, descrito en el apartado 3.3.2.3.1 de este trabajo, las probetas de tracción salían con un ancho menor, de 5.6 mm. Una de las causas puede ser el desgaste del troquel debido a su uso frecuente en los distintos trabajos y proyectos llevados a cabo en el CIAP.

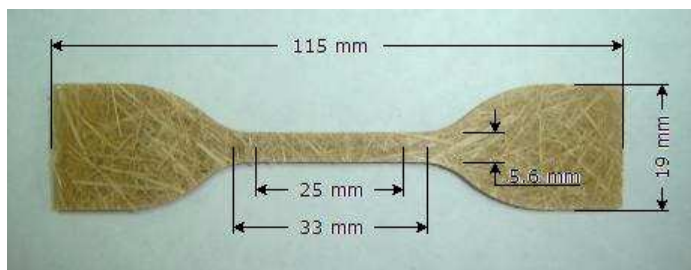


Figura 3.23. Probeta tipo VI para ensayos de tracción.

Los ensayos se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos, marca Instron modelo 1011. Dentro del software de control de la máquina se definió un nuevo método de ensayo de tracción, en el cual se programó que se calculen y muestren los valores de esfuerzo y deformación a la carga máxima registrada durante el ensayo. Asimismo, se estableció que el cálculo del módulo se realice entre el 25 y el 75% de esta carga máxima. La velocidad de estiramiento de la probeta fue de 5 mm/min, con una separación entre mordazas de 65 mm, según se especifica en la norma.

El registro del esfuerzo máximo de tracción, y el cálculo del módulo en el rango del 25 al 75% de la carga máxima obedecen, a que en estos materiales compuestos es común que el diseño estructural se lo realice utilizando datos registrados al menos a la mitad del esfuerzo máximo. Además, en estos materiales se ha demostrado que el módulo en este rango no difiere significativamente del módulo obtenido de la pendiente inicial de las curvas esfuerzo vs. deformación unitaria, detalle que se estudia en el apartado 4.4.2 de este trabajo.

Por cada prueba se realizó un mínimo de 7 ensayos o muestras y un máximo de 15 con el fin de poder eliminar al menos 2 muestras y de esta manera garantizar que la desviación estándar no exceda el 10% del valor medio de 5 muestras, las cuales se registran. El criterio de eliminación de datos se basó en un método estadístico conocido como “Grubbs Test for Outlying Observations”, en el cual se utiliza la ecuación (3.4) para evaluar el error de eliminación.

$$T = \frac{|\bar{x}_n - x_i|}{\sigma_n} \quad (3.4)$$

donde:

T: error implicado en la eliminación

\bar{x}_n : valor medio de las muestras

x_i : valor de la muestra i

σ_n : desviación estándar de las muestras

Un ejemplo del proceso se ilustra a continuación. Con los datos que se obtienen de los ensayos, se determina el valor del error de eliminación (T) mediante el empleo de la ecuación 3.4. Los datos y valores de T se exponen en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Datos de 7 muestras que se analiza para la eliminación según T .

| Muestra | Dato | T |
|-----------------|-------------|----------|
| 1 | 77.63 | 0.02 |
| 2 | 80.56 | 0.25 |
| 3 | 85.37 | 0.70 |
| 4 | 73.92 | 0.36 |
| 5 | 87.00 | 0.85 |
| 6 | 55.74 | 2.05 |
| 7 | 84.61 | 0.63 |
| <i>Media</i> | 77.833 | |
| <i>E. Desv.</i> | 10.783 | |

Como el criterio es eliminar el dato con el cual se obtiene el T más alto, en el ejemplo, el primero en eliminar es el correspondiente a la muestra 6. Quedando únicamente los datos de la Tabla 3.16., con los cuales se vuelve a calcular T :

Tabla 3.16. Datos para segunda eliminación según resultado de T .

| Muestra | Dato | T |
|-----------------|-------------|----------|
| 1 | 77.63 | 0.77 |
| 2 | 80.56 | 0.19 |
| 3 | 85.37 | 0.76 |
| 4 | 73.92 | 1.50 |
| 5 | 87.00 | 1.08 |
| 7 | 84.61 | 0.61 |
| <i>Media</i> | 81.515 | |
| <i>E. Desv.</i> | 5.064 | |

El siguiente valor a eliminar es el de la muestra 4. Quedando de esta manera un total de 5 muestras que son las que se registran.

3.4.4.2. Ensayo de flexión

Para el ensayo de flexión a 3 puntos se sustituyen las mordazas por un puente de flexión sobre el cual deben situarse las probetas a ensayar. El puente consta de dos apoyos en su parte inferior (fija), los cuales permiten ajustar su distancia (span) y soportar a la probeta para su ensayo. En su parte superior o móvil, se aloja el punzón cilíndrico el cual flexiona a la probeta a una velocidad determinada. Este equipo y el procedimiento seguido se han ajustado a las exigencias de la norma ASTM D-5943 [1996]

Por la diversidad de los espesores obtenidos en las diferentes pruebas, se decidió que las dimensiones de las probetas se definan en función del espesor medio de cada una. Estas dimensiones se detallan a continuación, y adicionalmente se pueden observar en la Figura 3.24.

Espesor, $h = \bar{h}$
 Largo, $l = (20 \pm 1) \bar{h}$
 Ancho, $b = 10.0 \pm 0.5 \text{ mm}$
 Span, $L = (16 \pm 1) \bar{h}$



Figura 3.24. Dimensiones de las probetas para ensayo de flexión.

La distancia entre los soportes de la probeta se ha normalizado convenientemente en función del espesor la misma, con el fin de que la acción del esfuerzo cortante resulta prácticamente despreciable. Por esta razón el esfuerzo a flexión equivale al esfuerzo normal máximo ($h/2$) de la probeta debido al momento flector que se da en el ensayo. El troquel empleado permite obtener probetas con una longitud de 100 mm; a partir de esta se recorta al largo necesario (l). Según el método descrito en la norma, el cálculo del esfuerzo a flexión se hace de acuerdo la ecuación (3.5).

$$Sflex = 6 \frac{M_{\max}}{bh^2} \quad (3.5)$$

Donde:

Sflex : esfuerzo a flexión debido al momento flector, en MPa

M_{\max} : momento flector máximo, en N.mm

b: ancho de la probeta, en mm

h: espesor de la probeta, en mm

Sabiendo que el momento flector máximo, para las condiciones del ensayo, se da en el punto medio de la probeta, el momento flector máximo se determina mediante la ecuación (3.6).

$$M_{\max} = \frac{1}{4} FL \quad (3.6)$$

donde:

F: carga o fuerza máxima aplicada, en N

L: separación entre apoyos (span), en mm

Sustituyendo la ecuación (3.6) en la (3.5), se obtiene la ecuación (3.7) que permite determinar el esfuerzo a flexión máximo que se da en las superficies de la probeta. Es decir, en la parte más alejada al eje neutro, debido al momento flector.

$$Sflex = \frac{3}{2} \frac{FL}{bh^2} \quad (3.7)$$

Antes de iniciar los ensayos es imprescindible medir todas las dimensiones de las probetas e introducirlas como datos para los cálculos del programa. La velocidad de ensayo fue de 1 mm/min para las pruebas de la fase de composición, pero por el tiempo que tomaba el completar el ensayo (~ 10 min.), se decidió para las demás pruebas utilizar una velocidad de 2 mm/min. El fin de la prueba se estableció para cuando las probetas alcancen el 5% de deformación, en vista que los materiales no llegaban al punto de rotura. Una vez finalizada la prueba, el programa suministra, además de la curva esfuerzo – deformación, el valor del

esfuerzo máximo alcanzado durante el ensayo, y realiza los cálculos necesarios para obtener el valor del módulo de flexión.

Así como en el ensayo de tracción, en el de flexión también se realizó por cada prueba un mínimo de 7 muestras y un máximo de 15, con el fin de poder eliminar al menos 2 para que la desviación estándar no exceda el 10% del valor medio de 5 muestras. El criterio de eliminación es el detallado en el apartado 3.4.4.1.

3.4.4.3. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se realiza para obtener una medida de la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro. Como se dijo anteriormente, el durómetro utilizado fue el Shore D, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D-2240. Se tomaron 7 datos y se obtuvo un promedio, en escala Shore D de los compuestos finales y de la matriz de PP, con el fin de realizar una comparación.

3.4.4.4. Densidad

Las muestras utilizadas para determinar la densidad de los materiales compuestos finales y de la matriz de PP fueron las mismas probetas empleadas en el de flexión. Para cada material, se utilizaron cinco muestras de 20 x 10 mm² de área. El método empleado fue el denominado “empuje del sólido”, según se detalla en la norma ASTM D-792 [1991]. Se utilizó el conjunto de determinación de densidades Mettler Toledo, tal como se dijo anteriormente.

La densidad de la muestra se determina a partir de medir su peso en aire A y de su peso al estar suspendida en el seno de un líquido de densidad controlada (B). La diferencia entre estos pesos se conoce como empuje ($P = A - B$) y es equivalente al peso del líquido desplazado, fuerza de Arquímedes. El valor de la densidad de cada material, se obtiene con la ecuación (3.8).

$$\rho = \frac{A}{P} \rho_o \quad (3.8)$$

donde:

ρ = densidad buscada de la muestra, en g/cm^3

A = peso de la muestra en el aire, en g

P = empuje de la muestra suspendida en el líquido auxiliar, en g

ρ_0 = densidad conocida del líquido auxiliar, en g/cm^3

Debido a que las muestras, tanto de PP como del material compuesto, tenían menor densidad que el agua destilada (flotaban), se decidió utilizar alcohol isopropílico a 22.5°C como líquido auxiliar de densidad conocida ($\rho = 0.787 \text{ g/cm}^3$ calculada experimentalmente).

3.4.4.5. Absorción de agua

Para el ensayo de absorción de agua de los compuestos finales y de la matriz de PP, se utilizó el aparato de Kubelka y el procedimiento descrito en la norma INEN 556. Las muestras se obtuvieron a partir de las probetas del ensayo a flexión. Se prepararon 3 muestras con un área de $20 \times 10 \text{ mm}^2$ para cada material. La absorción de agua se determinó para periodos de inmersión de las probetas de 15 y de 60 minutos.

La absorción de agua de las muestras, referido en masa, se calcula de acuerdo a la ecuación (3.9).

$$Q_m = \frac{V}{M} \quad (3.9)$$

donde:

Q_m = absorción de agua de las muestras, en g

V = volumen de agua absorbido, en cm^3

M = masa de las muestras, en g

Debido a que este método no tuvo la precisión esperada, los resultados se detallan en el apartado 4.4.3.3, se decidió emplear el método descrito en el artículo publicado por Li et al. [2004]. En este trabajo, las muestras son secadas a 100°C en un horno durante 4 horas, para luego ser pesadas. Posterior a esto, se sumergen en agua destilada durante periodos de 15 y 60 minutos a temperatura

ambiente (18°C). Se retira el exceso de agua de su superficie y se registra nuevamente su peso. Este procedimiento se repite para 3 muestras de cada material compuesto final. El porcentaje de absorción de agua se calcula mediante la ecuación (3.10).

$$M\% = \frac{M_1 - M_0}{M_1} 100 \quad (3.10)$$

donde:

$M\%$ = cambio en masa de la muestra debido a la absorción de agua, en %

M_0 = masa de la muestra seca, en g

M_1 = masa de la muestra después de haber sido sumergida por 24 h, en g

Adicionalmente, para comparar los resultados obtenidos entre métodos, la absorción de agua de la muestra, referido en masa, para el método de X Li, se calcula mediante la ecuación (3.11)

$$Qm = \frac{1}{\rho_{H_2O}} \frac{M_1 - M_0}{M_0} \quad (3.11)$$

donde:

ρ_{H_2O} = densidad del agua destilada a 18°C (0.99862 g/cm³), en g/cm³

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos del trabajo experimental detallado en el Capítulo 3. Se exponen los resultados concernientes a las tres etapas del proyecto: procesabilidad de la matriz PP, formulación del compuesto y mejoramiento de los parámetros del proceso de transformación. La discusión se centra en describir el comportamiento mecánico de los materiales estudiados: PP y abacá. Se comparan los efectos de las distintas formulaciones y de las combinaciones entre los distintos parámetros de procesamiento. Para facilitar la conexión entre los resultados y el procedimiento experimental, este capítulo está ordenado de manera similar al capítulo precedente.

4.1. PROCESABILIDAD DE LA MATRIZ

En este apartado se describen los resultados de las pruebas realizadas durante el estudio del procesamiento de la matriz PP mediante moldeo por compresión. En primera instancia se describen los resultados del uso de los moldes. Luego se continúa con los resultados en cuanto al efecto del tiempo de procesamiento de la matriz de PP sobre su índice de fluidez. Adicionalmente, se estudia el porcentaje de cristalinidad y la respuesta mecánica a la tracción, obtenidos al variar los parámetros del enfriamiento. Para finalizar, se presentan los resultados visuales obtenidos al variar los parámetros de las demás fases del moldeo por compresión.

4.1.1. SELECCIÓN Y ELABORACIÓN DEL MOLDE

Al utilizar los moldes disponibles en el CIAP se presentaron algunos inconvenientes. Quizá la principal razón es que estos moldes no permiten una aplicación directa de la presión sobre el material a conformar. Además, al tratarse de moldes tipo plancha y por ende no tener paredes que mantengan a la matriz

de PP en su interior, ocasionaban que gran parte de esta se desborde y se pierda como rebaba. Esto hubiese causado aún más dificultades al momento de elaborar el material compuesto.

Estos moldes son generalmente utilizados para la conformación de cauchos, pero al tener el PP una viscosidad menor a estos, fluía libremente por entre las aberturas que deja el molde. Para evitar esto, se fabricó un molde tipo macho-hembra, el cual permitió que el material a conformar se quede entre sus paredes y que la fuerza aplicada se distribuya al material y no en los filos o paredes del molde. Las especificaciones de este molde se ilustran en el anexo 4.

La utilización del nuevo molde permitió aplicar fuerzas menores durante el proceso de conformado. Específicamente, se aplicaron alrededor de 1000 lbf, lo cual representa unos 0.295 MPa de presión aplicados sobre el material, considerando que el área del molde es $115.1 \times 131.2 \text{ mm}^2$. El desperdicio que se obtuvo fue mínimo en comparación con el que se obtenía con la utilización de los moldes tipo plancha.

La Tabla 4.1 muestra una comparación del desperdicio, en porcentaje de la masa inicial colocada, que se obtuvo al utilizar el molde tipo planchas y el molde fabricado tipo macho-hembra, a diferentes presiones. Adicionalmente, en las Figuras 4.1 (a) y (b) se comparan de manera visual las rebabas obtenidas con los dos tipos de molde.

Tabla 4.1. Porcentaje en masa que se pierde como rebabas al utilizar los diferentes moldes.

| Fuerza aplicada [lbf] | <i>Molde tipo placas (%)</i> | <i>Molde macho- hembra (%)</i> |
|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 3000 | 18.28 | 13.48 |
| 4000 | 22.64 | 16.12 |
| 5000 | 25.28 | 19.32 |



Figura 4.1. Rebabas de PP que se obtienen utilizando: (a) moldes tipo plancha, (b) molde tipo macho - hembra.

Si bien, en cuanto a presiones y desperdicio, el uso del nuevo molde fue muy favorable, también ocasionó un problema de burbujas en las placas. El molde al haber sido construido bimetálico (hembra de acero y macho de aluminio) provocaba que el PP derretido presente diferente tensión superficial al contacto con estas dos diferentes superficies. La superficie de las placas de PP que estaba en contacto con el lado de acero del molde (hembra) presentó una gran cantidad de pequeñas burbujas, las cuales le daban una apariencia de harina dispuesta sobre esta superficie de las placas, como se puede ver en la Figura 4.2. Por otra parte, el lado de la placa que estaba en contacto con el macho del molde (aluminio), no mostró burbujas. La solución encontrada para este problema fue el introducir una lámina de papel aluminio en la superficie inferior del molde. Con esto se logró cambiar la tensión superficial que se producía en el PP derretido en esta parte del molde y de esta manera reducir o eliminar la presencia de estas burbujas.



Figura 4.2. Presencia de pequeñas burbujas en las placas de PP.

Una vez superados estos inconvenientes se procedió con la determinación de los parámetros de procesamiento involucrados en el moldeo por compresión de la matriz. Estos parámetros permitirán obtener las placas de PP siguiendo los criterios establecidos en el apartado 3.4.1 “Primera Etapa: Procesabilidad de la Matriz”. Cabe recordar que estas placas de PP son la materia prima para la fabricación de los materiales compuestos con la fibra de abacá tipo sánduche.

4.1.2. ÍNDICE DE FLUIDEZ VS. TIEMPO DE PROCESAMIENTO

De los resultados, mostrados en la Figura 4.3, se determinó el porcentaje de variación que se induce en el índice de fluidez (MFI) del PP al someterlo a tiempos prolongados de calentamiento, lo cual es una referencia para determinar el tiempo máximo permisible de procesamiento del PP sometido a esta temperatura.

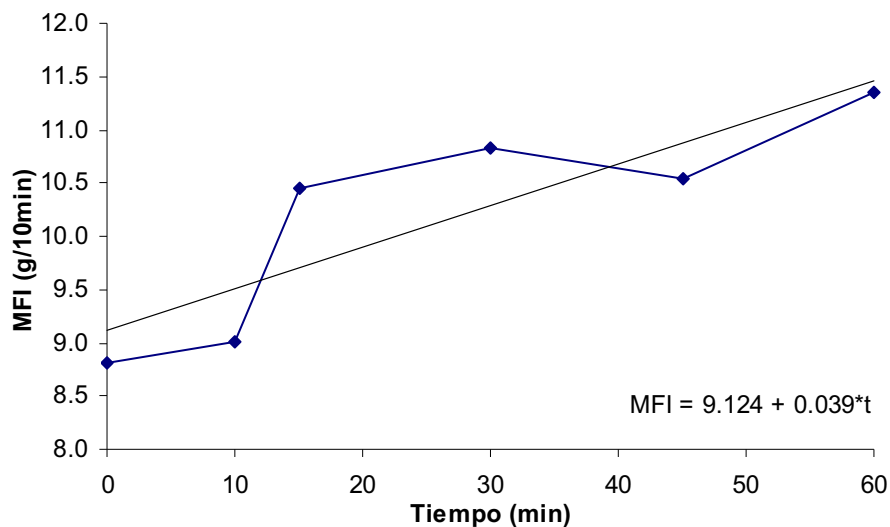


Figura 4.3. MFI del PP H-301 Braskem versus tiempo de procesamiento a 180°C.

Aunque en teoría el índice de fluidez de los materiales termoplásticos no debe aumentar al someterlos a un calentamiento, en la figura se puede apreciar que existe una tendencia del aumento en el mismo. El aumento se lo puede considerar lineal y sigue la ecuación (4.1).

$$MFI = 9.124 + 0.039 \times t \quad (4.1)$$

donde MFI es el índice de fluidez, en g/10 min, y t representa el tiempo en el cual el PP está sometido a 180°C, en min.

Por medio de la ecuación (4.1) se puede determinar el MFI del polipropileno en función del tiempo de calentamiento a 180°C. En la Tabla 4.2 se ilustran los cambios de este MFI en porcentajes.

Tabla 4.2. Porcentaje de variación del MFI según tiempo de procesamiento a 180°C del PP-H301.

| Tiempo (min.) | % Variación |
|----------------------|--------------------|
| 10 | 4.36 |
| 15 | 6.41 |
| 20 | 8.54 |
| 25 | 10.69 |
| 30 | 12.82 |
| 35 | 14.96 |
| 40 | 17.10 |
| 45 | 19.23 |
| 50 | 21.37 |

De la tabla anterior se puede deducir que si no se quiere tener un cambio en el MFI original del polipropileno mayor al 15% es necesario que el tiempo máximo de procesamiento no sobrepase los 35 minutos. Para este tiempo máximo se debe considerar todos los tiempos en los cuales el PP está sometido al calor. El primero, el de la fabricación de las placas que sirven como materia prima del material compuesto y el segundo que es el tiempo durante el cual se le vuelve a someter al calor para conformar el material compuesto final.

4.1.3. PARÁMETROS DE ENFRIAMIENTO

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante el estudio de la estructura inducida en el material al variar el método de enfriamiento y la temperatura inicial del agua para este proceso. Según la velocidad de

enfriamiento, puede disminuirse (enfriamiento rápido) o incrementarse (enfriamiento lento) el porcentaje de cristalinidad de un polímero semicristalino como el PP. Su efecto sobre las propiedades mecánicas ha sido revisado por Fujiyama [1991], destacando que el módulo elástico y la dureza aumentan linealmente con la cristalinidad.

4.1.3.1. Porcentaje de cristalinidad

El cambio en el porcentaje de cristalinidad del PP se estudió mediante el ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC), tal como se explica en el apartado 3.3.2.3.3. Se determinó la entalpía de fusión experimental (ΔH_m) y la temperatura de fusión (T_m) de cada muestra, a partir de los termogramas de fusión presentados en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6. La entalpía o calor de fusión se determina calculando el área del pico endotérmico de fusión de la muestra, y la temperatura de fusión es la temperatura máxima registrada en el mismo pico endotérmico.

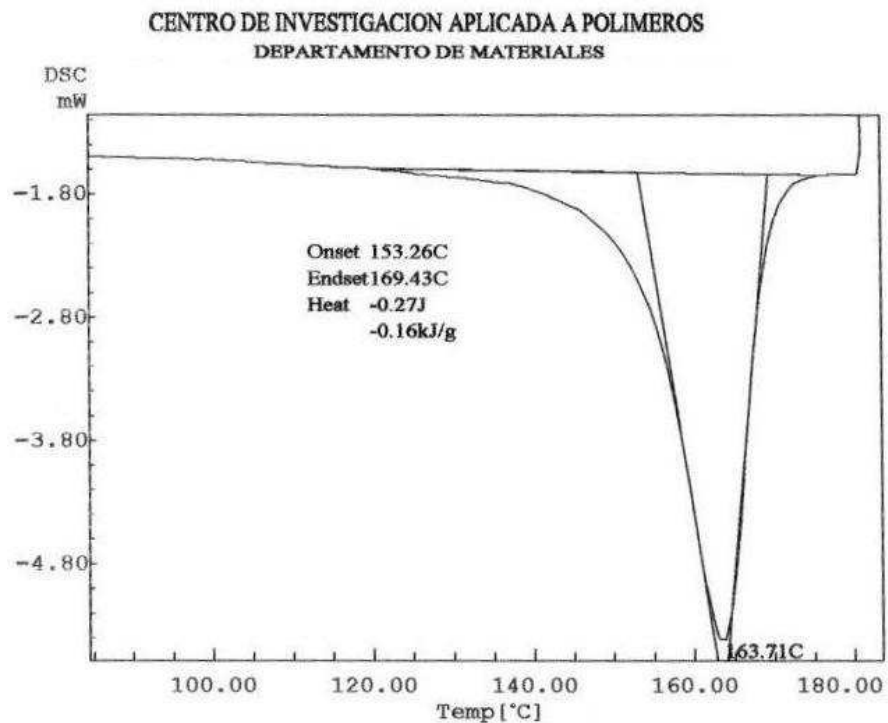


Figura 4.4. Termograma de fusión para una placa de polipropileno enfriada sin el control del baño térmico.

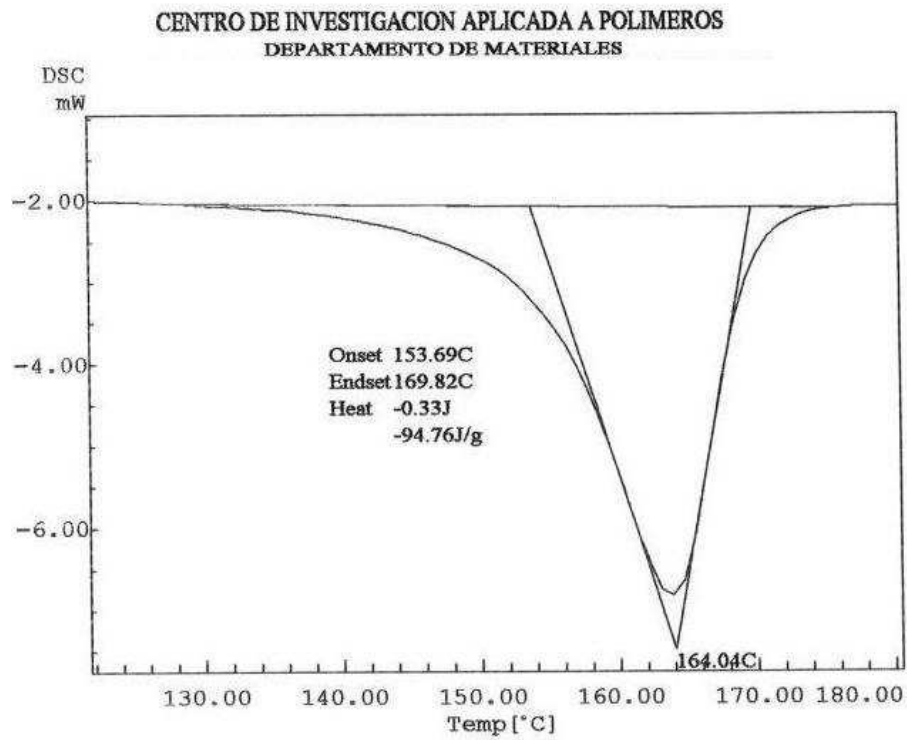


Figura 4.5. Termograma de fusión para una placa de polipropileno enfriada utilizando el baño térmico con una temperatura inicial del agua de 0°C.

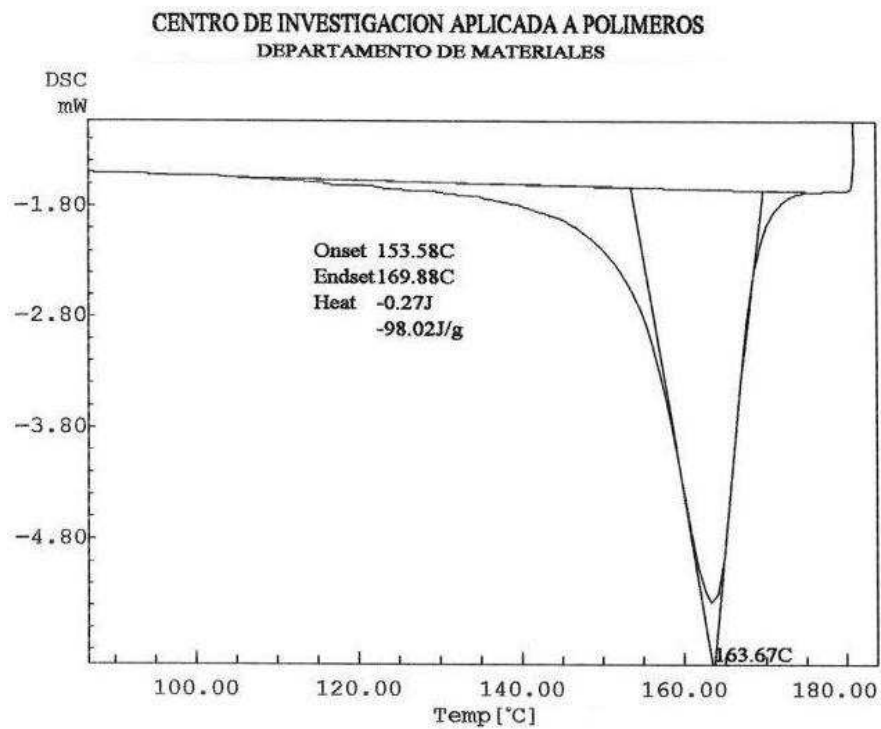


Figura 4.6. Termograma de fusión para una placa de polipropileno enfriada utilizando el baño térmico con una temperatura inicial del agua de 15°C.

El cálculo del porcentaje de cristalinidad (W_c) se lo hace mediante la ecuación (3.2) y a través del conocimiento de la entalpía de fusión del PP 100% cristalino ($\Delta H_m^0 = 207 \text{ J/g}$ [Wunderlich, 1990]). Los resultados se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Entalpía, temperaturas de fusión experimentales y el porcentaje de cristalinidad de las muestras a diferentes enfriamientos.

| Pruebas | ΔH_m (J/g) | T_m (°C) | W_c (%) |
|---------------------------|--------------------|------------|-----------|
| <i>PP-ENF-S/CONTROL</i> | 160 | 163.71 | 77.29 |
| <i>PP-ENF-0°/CONTROL</i> | 94.76 | 164.04 | 45.78 |
| <i>PP-ENF-15°/CONTROL</i> | 98.02 | 163.67 | 47.35 |

De los datos expuestos, se puede ver claramente que el enfriamiento sin control otorga un mayor porcentaje de cristalinidad a la estructura del PP, de 77.29%, mientras que el menor porcentaje se da con el enfriamiento controlado con temperatura inicial del agua de 0°C. Resultados que indican que al utilizar el baño térmico el enfriamiento es mucho más rápido, evitando así que las moléculas de PP tengan tiempo de ordenarse y cristalizar.

Adicionalmente se observa que el cambio en la temperatura inicial del agua de enfriamiento con el baño térmico no afecta considerablemente el porcentaje de cristalinidad del PP. Este fenómeno se podría atribuir a la poca variación que existirá en el gradiente de temperatura entre 180°C (temperatura del molde) y 0 ó 15°C (temperatura inicial del agua), lo cual no afectaría en mucho el flujo del calor y por ende el enfriamiento. Estos resultados permiten tener una cierta holgura en cuanto a la exactitud de la temperatura inicial del agua ya que, como se ha visto, no se presentan cambios importantes en la estructura del PP al utilizar el baño térmico como sistema para el enfriamiento.

En este punto cabe agregar que los ensayos de DSC permitieron además determinar la temperatura de cristalización (T_c) del PP, la cual corresponde a la temperatura en el punto máximo del pico de la curva exotérmica de cristalización del PP, mostrada en la Figura 4.7. En la curva se señala la temperatura de cristalización ($T_c = 122.92^\circ\text{C}$) y la temperatura a la que la matriz de PP se encuentra completamente solidificada ($T = 117^\circ\text{C}$).

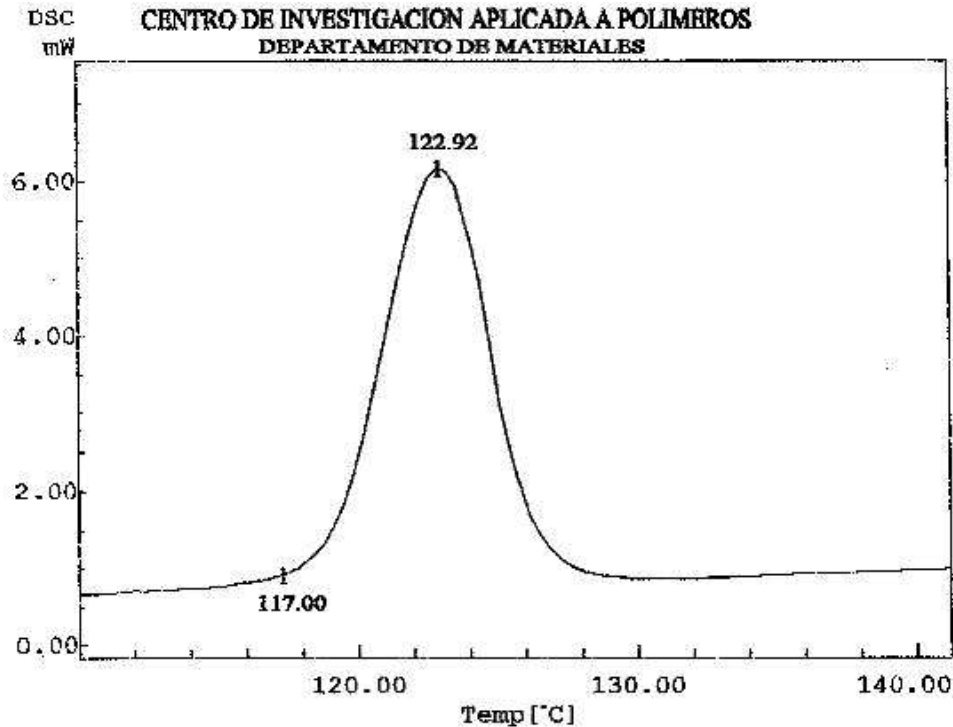


Figura 4.7. Curva exotérmica de cristalización de las muestras de PP y temperatura de cristalización.

Este resultado nos indica que si el molde, y en especial la matriz de PP que se encuentra en su interior, alcanzan temperaturas inferiores a los 117°C, esta última se solidificará por completo, lo que implicaría que el tiempo para el enfriamiento en realidad no debería ser de 10 minutos como se había venido utilizando, sino más bien sería mucho menor. Por las especificaciones del molde y la complejidad de las relaciones entre las variables involucradas en el sistema de enfriamiento, no es conveniente hacer una aproximación teórica del tiempo necesario para que el material alcance los 117°C. Sin embargo, de la observación de la solidificación de las rebabas del PP, se puede intuir que el tiempo necesario para alcanzar los 117°C estaría alrededor de los 3 minutos, que es el tiempo en que estas se solidifican.

Si bien, por lo dicho anteriormente, para cumplir con el enfriamiento del material bastaría con únicamente 3 minutos, se mantuvo los 10 minutos para que el molde alcance temperaturas cercanas a 25°C, las cuales permiten una manipulación sin problemas.

4.1.3.2. Ensayo de tracción del PP obtenido con diferentes enfriamientos

Para complementar el estudio del efecto del enfriamiento en la estructura y propiedades del PP se realizaron ensayos mecánicos a tracción de placas enfriadas a diferentes condiciones. La Figura 4.8, muestra un ejemplo de las curvas esfuerzo - deformación unitaria que se obtienen para el PP enfriado a diferentes condiciones. Se observa un comportamiento similar en todas las curvas, denotando que no existe una variación importante inducida por el método de enfriamiento, principalmente si se emplea el sistema cerrado del baño térmico.

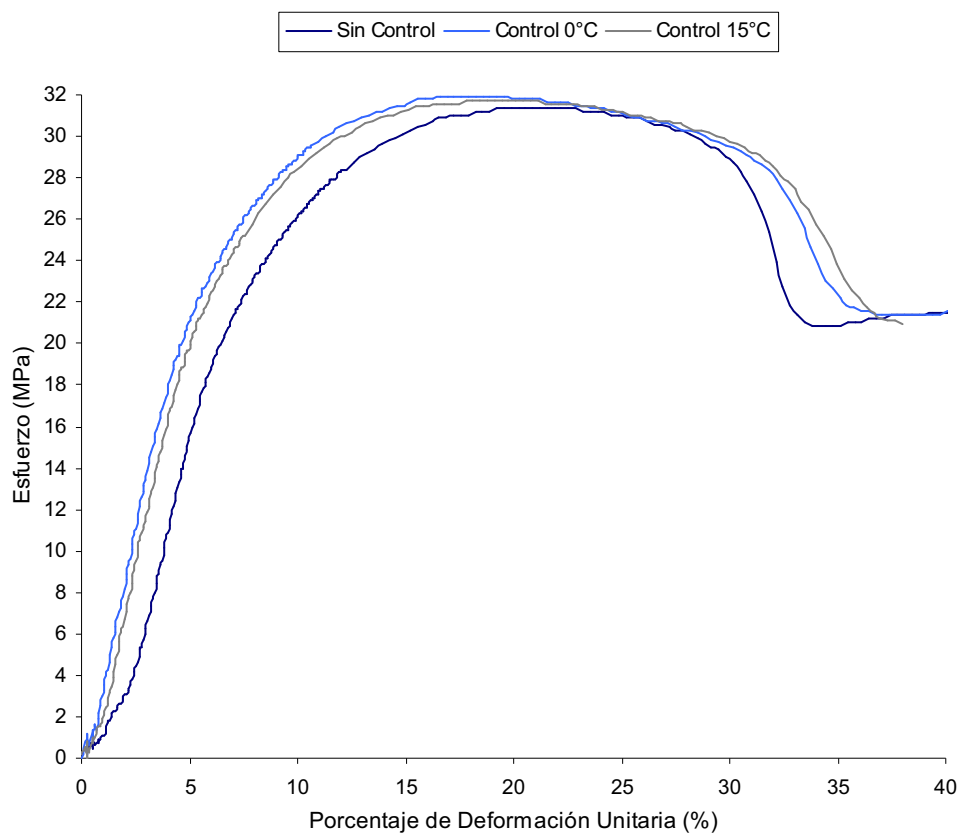


Figura 4.8. Curvas esfuerzo-deformación para la matriz PP con diferentes condiciones de enfriamiento.

Adicionalmente, los valores medios y las desviaciones estándar del porcentaje de deformación unitaria (ϵ), esfuerzo máximo ($S_{m\acute{a}x}$) y módulo a tracción (E) se muestran en la Tabla 4.4 y se ilustran en las Figuras 4.9 a la 4.11, correspondientemente.

Tabla 4.4. Propiedades a tracción de la matriz de PP enfiada a diferentes condiciones.

| Enfriamiento | ϵ (%) | $Smáx$ (MPa) | E (MPa) |
|----------------|------------------|------------------|--------------------|
| Sin control | 17.31 ± 1.00 | 31.78 ± 0.39 | 511.92 ± 30.47 |
| Control a 0°C | 17.51 ± 0.64 | 31.84 ± 0.13 | 551.72 ± 5.08 |
| Control a 15°C | 16.45 ± 1.44 | 30.92 ± 0.74 | 507.94 ± 15.98 |

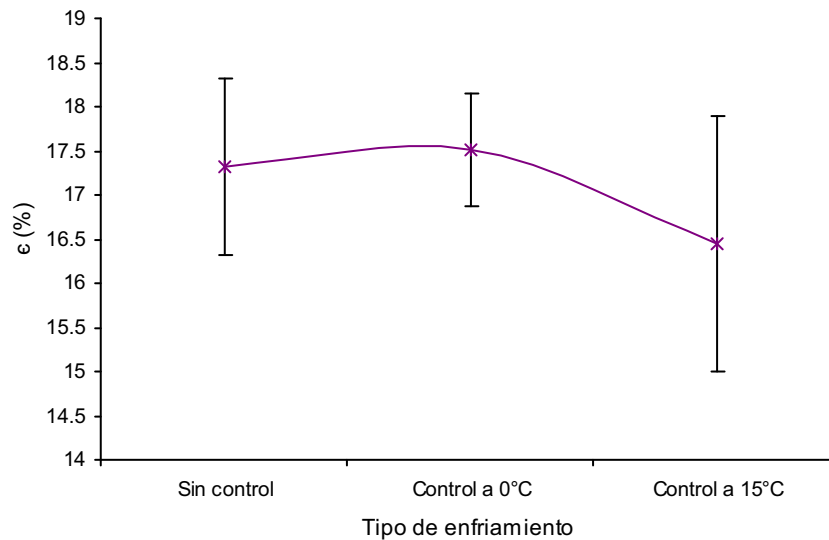


Figura 4.9. Porcentaje de deformación unitaria de la matriz de PP obtenido con diferentes parámetros de enfriamiento.

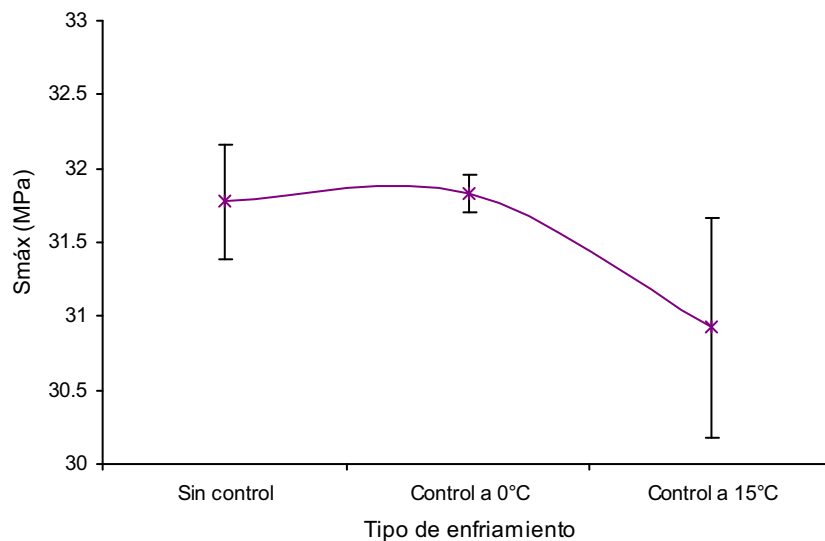


Figura 4.10. Esfuerzo máximo a tracción de la matriz de PP obtenido con diferentes parámetros de enfriamiento.

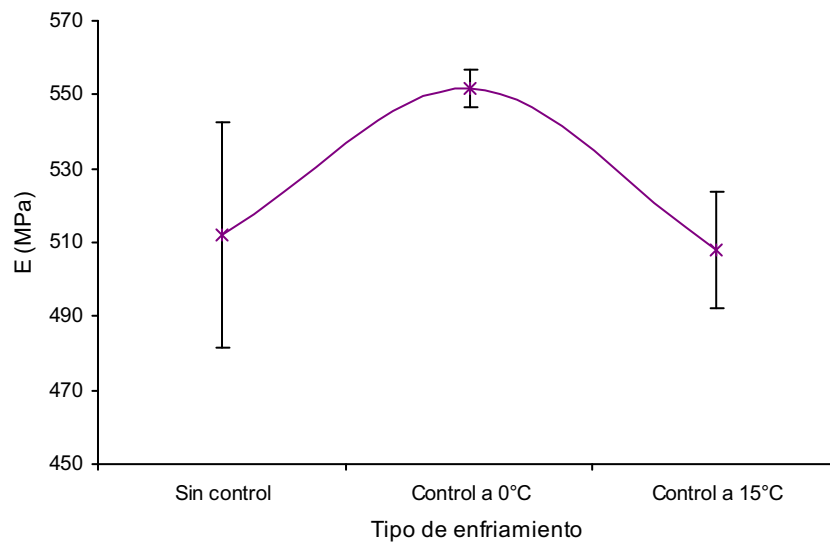


Figura 4.11. Módulo a tracción de la matriz de PP obtenido con diferentes parámetros de enfriamiento.

En la Figura 4.9 se observa la variación del porcentaje de deformación unitaria en función del método de enfriamiento. La deformación promedio del PP presenta una ligera disminución al ser enfriado con control y temperatura inicial del agua de 15°C, el máximo valor se da con un enfriamiento controlado a 0°C, mientras que la deformación de la matriz enfriada sin control presenta un valor intermedio entre estos dos. Sin embargo, en una apreciación más general y considerando las desviaciones estándar se puede ver que la deformación unitaria se mantiene prácticamente constante al variar el método de enfriamiento. Es más, la diferencia entre los valores medios de las deformaciones máxima y mínima obtenidas es de apenas el 6.5%, ratificando su similitud. Con estos resultados parecería ser que la diferencia entre los métodos aquí empleados para el enfriamiento de la matriz no repercute considerablemente en la deformación de la misma. Es decir, no afectan su ductilidad (materiales dúctiles son aquellos que presentan grandes deformaciones sin sufrir rotura).

La Figura 4.10, correspondiente a la variación del esfuerzo máximo, muestra una curva similar a la presentada en la deformación unitaria. El máximo valor promedio encontrado (31.84 ± 0.13 MPa) se da en la matriz enfriada con control a 0°C, aunque es muy poco marcado ya que simplemente difiere en un 3% del valor mínimo (30.92 ± 0.13 MPa), presentado con un enfriamiento controlado a 15°C.

En la Figura 4.11, el máximo valor promedio en el módulo a tracción se da con un enfriamiento controlado a 0°C (511.92 ± 30.47 MPa), mientras que con el enfriamiento sin control se obtiene el mínimo valor (507.94 ± 15.98 MPa). Al igual que con la deformación, si se considera las desviaciones estándar de las variables medidas, se puede decir que la diferencia entre los métodos de enfriamiento no altera considerablemente ni el esfuerzo máximo ni el módulo a tracción de las muestras examinadas.

De acuerdo a estos resultados y a los obtenidos en cuanto al porcentaje de cristalinidad, se decidió utilizar un enfriamiento controlado a una temperatura inicial del agua de 0°C. El baño térmico presenta la ventaja de mantener un flujo constante de agua a diferencia del agua de llave y la temperatura inicial del agua de 0°C permite que el molde, no el material, se enfríe a temperaturas que permitan su manipulación en un tiempo menor a los 10 minutos. A continuación se listan los parámetros para el enfriamiento de las placas de matriz PP:

- Método: Controlado por medio del baño térmico
- Flujo del agua: Constante a 14.6 ml/s
- Temperatura inicial del agua: $0 \pm 2^\circ\text{C}$
- Tiempo de enfriamiento: 10 minutos
- Presión: 0 MPa

4.1.4. PRECALENTAMIENTO Y MOLDEO DE LA MATRIZ MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN

4.1.4.1. Cantidad de material

Para definir la cantidad en gramos de PP que se coloca en el molde se realizaron las pruebas especificadas en la Tabla 3.6. De los resultados obtenidos se encontró que con cantidades menores a 13 g de PP se obtienen placas con superficies irregulares e incompletas, de espesores menores a 1 mm; mientras que con masas superiores a estos 13 g se obtienen placas completas de espesores que van de 2 mm a 3 mm. De acuerdo con esto se fijó utilizar placas de 15 g de PP.

4.1.4.2. Temperaturas mínimas de precalentamiento y moldeo

Para determinar las mínimas temperaturas que se debe aplicar en las etapas de precalentamiento y de moldeo, se realizaron las pruebas mencionadas en la Tabla 3.7. Se comenzó a trabajar con temperaturas altas de 200°C, prueba PP-07, hasta llegar a una temperatura de 150°C, prueba PP-22, inferior al punto de fusión teórico para PP homopolímero (162 -168°C [Morhain, 2001]). Como se esperaba, con temperaturas altas de 180°C a 200°C, la fusión del PP dentro del molde era completa; mientras que con temperaturas inferiores a los 170°C las placas comenzaban a presentar rasgos de falta de fusión, tal como se ilustra en la Figura 4.12. Inclusive con temperaturas de 150°C se observó que los pellets salían enteros.

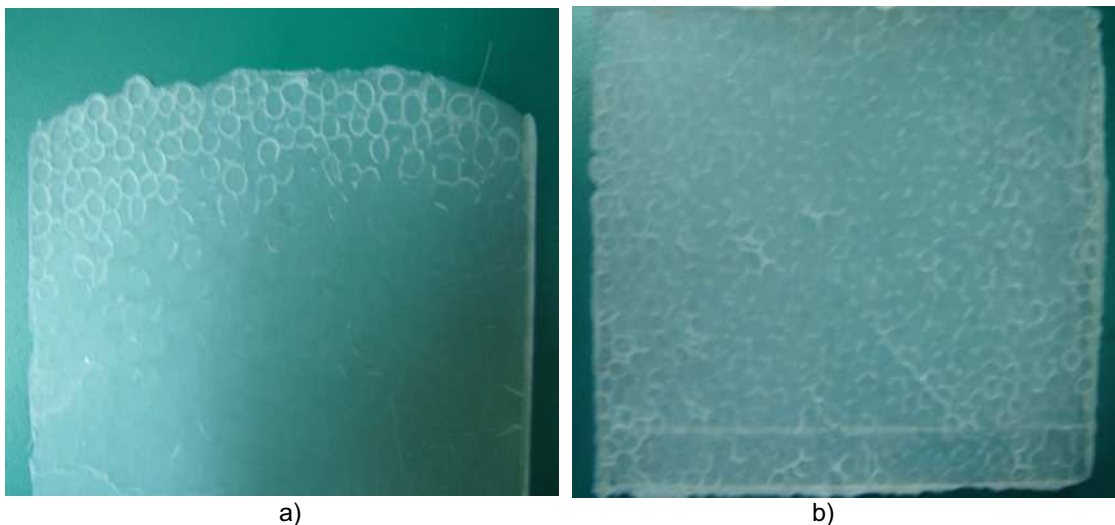


Figura 4.12. Muestra de falta de fusión en las placas de PP por uso de bajas temperaturas durante el procesamiento (a) 170°C, (b) 160°C.

Basándose en apreciaciones visuales, se decidió utilizar temperaturas de $180 \pm 5^\circ\text{C}$ tanto para la etapa de precalentamiento como para la de moldeo. Además de haberse demostrado que esta temperatura es válida para la fabricación de placas de PP, es la recomendada por la referencia bibliográfica [Jarayaman, 2001; Wambua et al., 2003]; para procesar compuesto de PP reforzados con fibra vegetal.

4.1.4.3. Presión mínima de moldeo

Una vez establecida la masa de PP necesaria para colocar en el molde y las temperaturas de precalentamiento y moldeo, el siguiente paso fue establecer la mínima presión (P_2) que se requiere en la fase de moldeo. Para ello se realizaron las pruebas detalladas en la Tabla 3.8. Se comenzó aplicando presiones relativamente altas de 0.884 MPa (3000 lbf), con lo cual se obtenían placas sin burbujas pero había un aumento en el desperdicio del material en forma de rebaba, por lo que se disminuyó la presión. Si bien, mientras más se reducía la presión, el desperdicio de material era menor, a partir de los 0.295 MPa (1000 lbf) se comenzaba a tener placas con defectos de llenado e incluso de fusión. De estos resultados se estableció que la mínima presión de moldeo (P_2) necesaria a aplicar es de 0.442 ± 0.029 MPa (1500 ± 100 lbf).

4.1.4.4. Tiempos de procesamiento mínimos

Con los parámetros de temperaturas y presiones ya establecidos, se procedió a optimizar los tiempos de procesamiento, basándose de igual manera en apreciaciones visuales. Las pruebas hechas para esto se describen en la Tabla 3.9.

Se comenzó utilizando tiempos de 10 minutos para calentamiento y 5 minutos para moldeo, prueba PP-29, hasta llegar a tiempos de 3 minutos para precalentamiento y 1 minuto para moldeo, prueba PP-43. Con tiempos de 10 y 5 minutos de precalentamiento los resultados fueron buenos para todos los tiempos de moldeo, mientras que con tiempos de 4 y 3 minutos de precalentamiento fue necesario como mínimo el utilizar 2 minutos de moldeo para obtener iguales efectos. Estos resultados permiten concluir que como mínimo es necesario mantener un tiempo de 5 minutos a 180°C para obtener una fusión completa del PP y lograr que este se distribuya homogéneamente en el molde. Una causa para que el tiempo necesario sea alto son los 3 minutos que tarda el molde en calentarse debido a su tamaño. De acuerdo a lo expuesto, tiempos de 5 minutos para precalentamiento (t_1) y 2 minutos para moldeo (t_2) fueron los escogidos para el procesamiento de la matriz de PP.

En la Tabla 4.5 se recopilan los parámetros de procesamiento definidos en esta etapa para la conformación de las placas de matriz PP que servirán como materia prima para la fabricación de los materiales compuestos. Además, en la Figura 4.13 se puede apreciar las placas obtenidas utilizando estos parámetros.

Tabla 4.5. Parámetros del moldeo por compresión utilizados para fabricar placas de matriz PP.

| | | | |
|--------------------------|---------------------------------|-------------------------|---|
| <i>Pre calentamiento</i> | $T_1 = 180 \pm 5^\circ\text{C}$ | $t_1 = 5 \text{ min.}$ | $P_1 = 0 \text{ MPa}$ |
| <i>Moldeo</i> | $T_2 = 180 \pm 5^\circ\text{C}$ | $t_2 = 2 \text{ min.}$ | $P_2 = 0.442 \text{ MPa (1500}\pm\text{100 lbf)}$ |
| <i>Enfriamiento</i> | $T_3 = 0 \pm 2^\circ\text{C}$ | $t_3 = 10 \text{ min.}$ | $P_3 = 0 \text{ MPa}$ |



Figura 4.13. Placa de PP obtenida mediante moldeo por compresión.

4.2. ETAPA DE COMPOSICIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

Las longitudes de fibra utilizadas en este trabajo fueron: 10 mm, 20 mm y 30 mm para fibra discontinua con orientación al azar, y 115 mm (ancho del molde) para fibra continua con orientación unidireccional. Todas estas longitudes de fibra se probaron en porcentajes de concentración en masa de 15%, 20%, 30% y 35%. Los parámetros de procesamiento utilizados en todas estas pruebas se describen en la Tabla 3.10. Los resultados se evaluaron mediante las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de tracción y flexión.

4.2.1. COMPUESTOS DE FIBRA CORTA – ORIENTACIÓN AL AZAR

4.2.1.1. Procedimiento para elaborar compuestos tipo sánduche

Para la obtención de mats de fibra con orientación al azar entre 2 placas de PP, se utilizó el procedimiento descrito en el artículo publicado por Jayaraman [2002], tal como se refirió en el apartado 3.4.2.1.1. Al tratarse de un proceso de formado meramente manual, la distribución de la fibra no fue completamente homogénea en todo el compuesto, como era lo deseado, quedando partes sin llenar. Este efecto iba disminuyendo al aumentar la cantidad de fibra en el compuesto, tal como se puede ver en la Figura 4.14. Se realizaron también pruebas sin el uso de la torre de alimentación y se obtuvieron resultados similares.

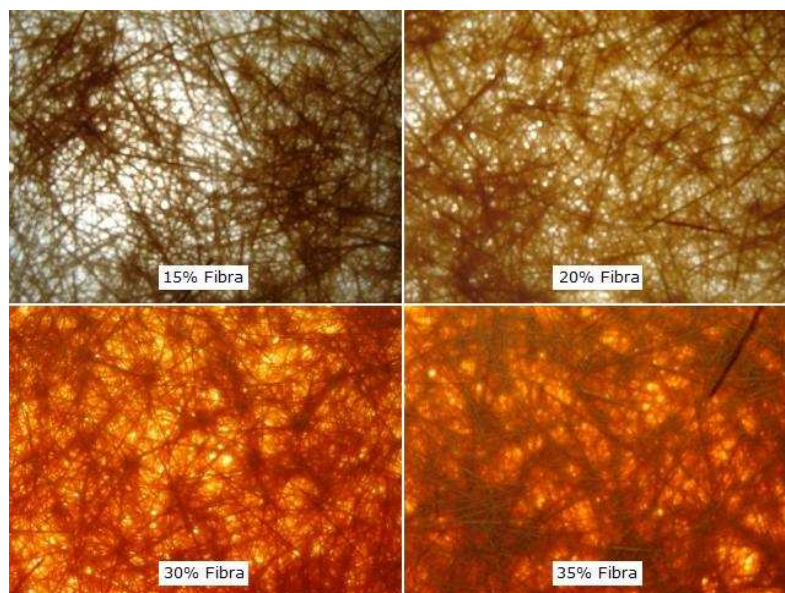


Figura 4.14. Dispersión de la fibra corta en los materiales compuestos obtenidos para diferentes fracciones másicas.

El conformado de los compuestos tipo sánduche con fracciones de 30 y 35% de fibra presentó dificultades debido al gran volumen que ocupan las fibras cortas al granel y por las dimensiones limitadas del molde. La mayor dificultad se presentó al momento de centrar la parte macho entre la parte hembra del molde, ocasionando que la presión ejercida por la prensa calefactora se pierda en las paredes laterales del molde, causando adicionalmente que el macho se deforme por estar constituido por un material menos duro (aluminio). La diferencia entre el

espesor del material antes de procesar y la profundidad del molde se observa en la Figura 4.15.

En algunas placas de compuesto con 35% de fibra se observó que en los bordes quedaba fibra suelta, tal como se ve en la Figura 4.16, siendo esto una evidencia de que existe una saturación de fibra en el compuesto y de una falta de matriz PP. Basándose en este resultado y en lo expuesto anteriormente, el estudio fue limitado a un contenido de fibra del 35%, lo cual cae dentro de las recomendaciones encontradas en varias referencias bibliográficas.

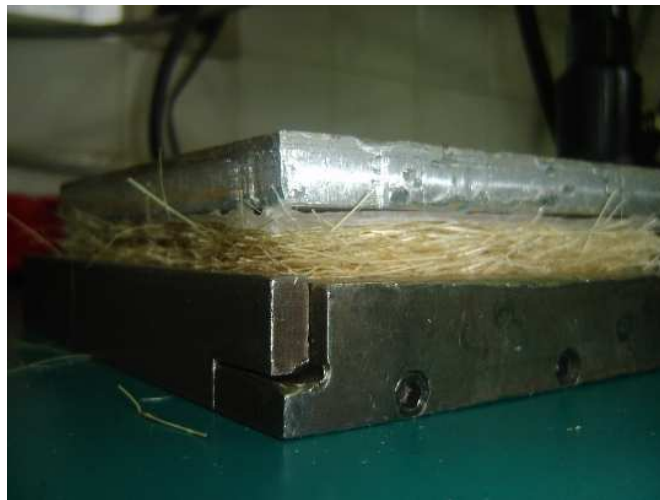


Figura 4.15. Espesor del compuesto tipo sánduche antes de procesar en relación con la profundidad del molde.



Figura 4.16. Evidencia de la saturación de refuerzo en los compuestos con 35% de fibra.

Otro problema suscitado en el moldeo de los materiales compuestos, sobretodo con los de alto contenido en fibra, fue la inclusión de aire en el material. Esto provocó la formación de burbujas (porosidades) atrapadas en la matriz del compuesto, tal como se aprecia en la Figura 4.17, y por ende propiedades mecánicas no deseables. Al retirar la presión de moldeo, la parte superior del molde (parte macho) se levanta, debido a la expansión del material, generando una succión que permite que el aire ingrese nuevamente al material, luego de haber sido retirado durante el procesamiento.

Una solución parcial a este problema fue el conformar el material con el molde al revés, es decir, con la parte hembra encima, logrando así que el peso propio del molde en alguna medida contrarreste la fuerza de expansión que ejercen las fibras al liberar la presión de moldeo. Una mejor solución a este problema fue el aplicar presión en el enfriamiento, efecto que se estudió y se detalla en la etapa de variación de los parámetros de procesamiento.

Sin embargo, descartando todos estos problemas, se ha observado que para la conformación de los compuestos PP/abacá, el método empleado en este trabajo para la distribución de la fibra, y en especial el moldeo por compresión, no degrada física ni térmicamente a la fibra. Es más, de la observación al microscopio o inclusive a simple vista, se puede decir que la fibra dentro de la matriz está intacta, como se ve en la Figura 4.17.



Figura 4.17. Presencia de burbujas en el compuesto a causa de la inclusión de aire.

4.2.1.2. Comportamiento a la tracción

De la observación al microscopio de la sección transversal y de la fractura de las probetas de tracción se puede señalar, en primera instancia, que la fibra posee únicamente un anclaje mecánico con la matriz de PP, tal como se ilustra en la Figura 4.18. Este resultado era esperado ya que, como se dijo en el Capítulo 2, el mayor problema que presentan las fibras vegetales en general y las de abacá en particular es su baja mojabilidad y pobre compatibilidad con las matrices poliméricas como el PP.

De la misma forma, se pudo observar que en las regiones más cercanas al centro del material compuesto, la cantidad de PP es menor y la de fibra mayor, tal como se puede ver en la Figura 4.18, lo que se entendería como una falta de inclusión del PP en la fibra de abacá, es decir una mala distribución a lo largo del espesor del compuesto. Este efecto se debería a la naturaleza propia del tipo de compuesto, sánduche o laminar (formado por capas de PP – fibras – PP), por lo que se podría arreglar al introducir más capas en el mismo. Es decir, mediante la formación de compuestos que tengan por lo menos 5 capas, PP – fibras – PP – fibras – PP; o mediante la aplicación de una mayor presión al momento del moldeo.

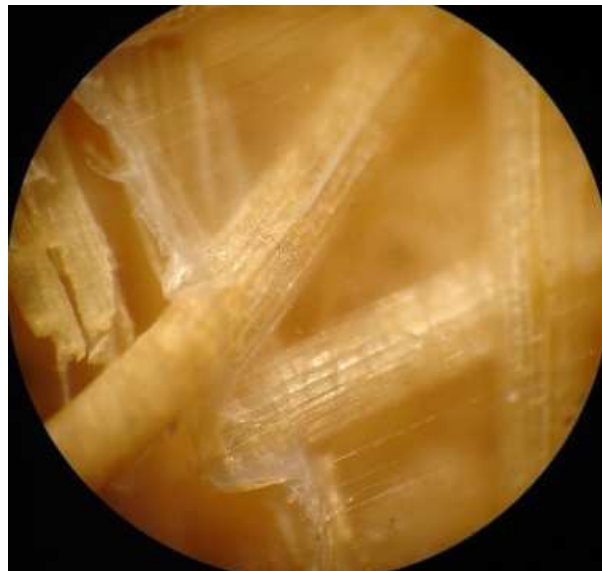


Figura 4.18. Anclaje mecánico de las fibras de abacá con la matriz de PP.



Figura 4.19. Sección transversal de la fractura que ilustra la mala inclusión del PP en la fibra de abacá.

Al tener una distribución y orientación al azar de las fibras, es lógico pensar que al menos una de estas se encuentre en una orientación perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada, provocando así que la fractura se localice a través de esta, tal como se puede ver en la Figura 4.20. Esto denota que algunas de las fibras estarían actuando como concentradores de esfuerzo.



Figura 4.20. Fractura común de las probetas con fibra orientada al azar que muestra que las fibras de orientación transversal estarían actuando como concentradores de esfuerzos.

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados de los ensayos de tracción. Se reportan los valores medios y desviaciones de cada material ensayado en lo referente al porcentaje de deformación a carga máxima (ϵ), esfuerzo máximo de tracción ($S_{m\acute{a}x}$), y m\u00f3dulo el\u00e1stico (E).

Tabla 4.6. Valores de deformaci\u00f3n, esfuerzo y m\u00f3dulo a tracci\u00f3n de los materiales formulados con diferentes composiciones.

| Fibra | | Propiedades a Tracci\u00f3n | | |
|-------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------|
| Fracci\u00f3n (%) | Longitud (mm) | ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) |
| 15 | 10 | 6.28 ± 0.24 | 23.16 ± 1.30 | 865.17 ± 78.01 |
| 20 | | 6.13 ± 0.57 | 20.52 ± 0.61 | 777.87 ± 85.79 |
| 30 | | 4.40 ± 0.12 | 20.15 ± 0.43 | 768.30 ± 93.11 |
| 35 | | 4.74 ± 0.10 | 19.11 ± 0.64 | 788.64 ± 47.06 |
| 15 | 20 | 5.87 ± 0.14 | 27.63 ± 0.35 | 636.24 ± 55.01 |
| 20 | | 4.55 ± 0.30 | 24.16 ± 0.41 | 668.19 ± 26.22 |
| 30 | | 5.29 ± 0.22 | 25.26 ± 0.72 | 863.42 ± 13.67 |
| 35 | | 4.21 ± 0.07 | 26.21 ± 0.77 | 1220.9 ± 75.98 |
| 15 | 30 | 5.62 ± 0.21 | 32.32 ± 1.93 | 835.02 ± 93.44 |
| 20 | | 5.05 ± 0.13 | 27.18 ± 1.16 | 870.23 ± 46.14 |
| 30 | | 4.12 ± 0.15 | 22.60 ± 1.63 | 891.55 ± 41.91 |
| 35 | | 3.90 ± 0.28 | 23.99 ± 2.20 | 979.10 ± 47.16 |
| Matriz | | 15.52 ± 1.52 | 31.62 ± 0.39 | 548.65 ± 6.68 |

De manera general, en la Tabla 4.6 se puede ver que el efecto causado por las fibras de refuerzo en el PP se traduce en un aumento de su rigidez, una disminuci\u00f3n de la deformaci\u00f3n a carga m\u00e1xima y un aumento considerable del m\u00f3dulo el\u00e1stico con relaci\u00f3n a la matriz PP.

En las Figuras 4.21 y 4.22 se puede apreciar claramente la disminuci\u00f3n en la deformaci\u00f3n unitaria a carga m\u00e1xima de los compuestos con relaci\u00f3n a la matriz PP. Adicionalmente, se puede ver que el aumento en la fracci\u00f3n de fibra provoca una mayor disminuci\u00f3n en el porcentaje de deformaci\u00f3n, tendencia que es m\u00e1s pronunciada para los compuestos de 30 mm de longitud en fibra.

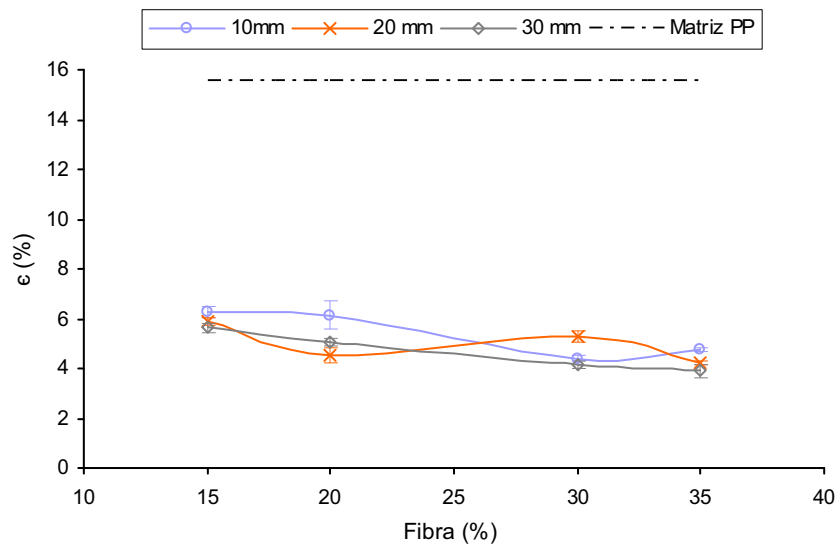


Figura 4.21. Efecto de la fracción de masa de fibra en el porcentaje de deformación unitaria a carga máxima en tracción para longitudes de 10 mm, 20 mm, y 30 mm en fibra al azar.

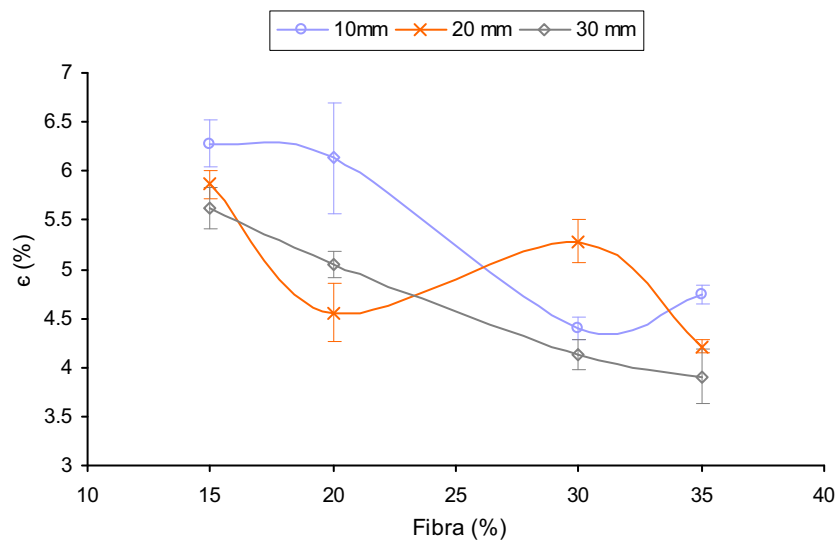


Figura 4.22. Acercamiento de la Figura 4.21 enfocándose en el porcentaje de deformación unitaria a carga máxima de los compuestos.

La mínima deformación (0.039 ± 0.0028 mm/mm) se da en los compuestos con 35% de fibra y 30 mm de longitud, mientras que la máxima deformación (0.0628 ± 0.0024 mm/mm) se da en los compuestos con 15% en fibra y 10 mm de longitud. Esto indica que la deformación unitaria de los compuestos se correlaciona principalmente con la fracción de fibra y en segunda instancia con la longitud de la fibra.

La disminución en la deformación unitaria se puede atribuir a la alta rigidez y poca ductilidad de las fibras, cuya deformación a la rotura es de alrededor de 0.0368 mm/mm, según Morejón y Narváez [2004]. Otra posible explicación a este efecto es el hecho de que a bajos contenidos de fibra, la matriz tiene mayor facilidad de movimiento, permitiendo que a bajos esfuerzos la unión fibra - matriz se rompa, dejando que la matriz se deslice por las fibras y aumente la deformación unitaria máxima del compuesto. Al aumentar la concentración de fibra, y por ende su superficie de contacto con la matriz, el anclaje es mayor y por ende la deformación del compuesto disminuye.

De la misma forma que con la deformación unitaria, en la Figura 4.23, se puede observar que el esfuerzo máximo a tracción ($S_{m\acute{a}x}$) de prácticamente todas las composiciones estudiadas es menor al de la matriz PP. En una primera instancia, esto haría pensar que la sustitución de una parte del PP por fibra corta de abacá como refuerzo no se justifica en cuanto a la resistencia a la carga máxima. Sin embargo, se cree que el anclaje mecánico, atribuido a las irregularidades de la superficie de la fibra, puede verse mejorado en la siguiente etapa experimental de optimización de los parámetros de procesamiento mediante moldeo por compresión. Es decir, se espera que la adhesión, y por ende las propiedades a tracción y en particular el esfuerzo a carga máxima de los compuestos, se incrementará según la variación de los tiempos y presiones de moldeo.

Como se dijo en el Capítulo 2, la superficie irregular y porosa de la fibra debería permitir la difusión interna del polímero en la fibra y con ello también aumentar el anclaje físico de la matriz en la fibra. Este mecanismo no debe ser menospreciado ya que representa un incremento en las propiedades mecánicas del orden del 7% respecto a la matriz [López, 2004].

Sin embargo, las expectativas no son muy altas, ya que las fibras vegetales y en particular las de abacá carecen de mojabilidad. Esto se puede observar en la Figura 4.19, en donde además de la rotura de filamentos, se observó unos agujeros en la matriz dejados por las fibras, denotando que hubo un deslizamiento entre ambas provocado por la rotura de la unión mecánica, es decir por una mala adherencia de la fibra en la matriz.

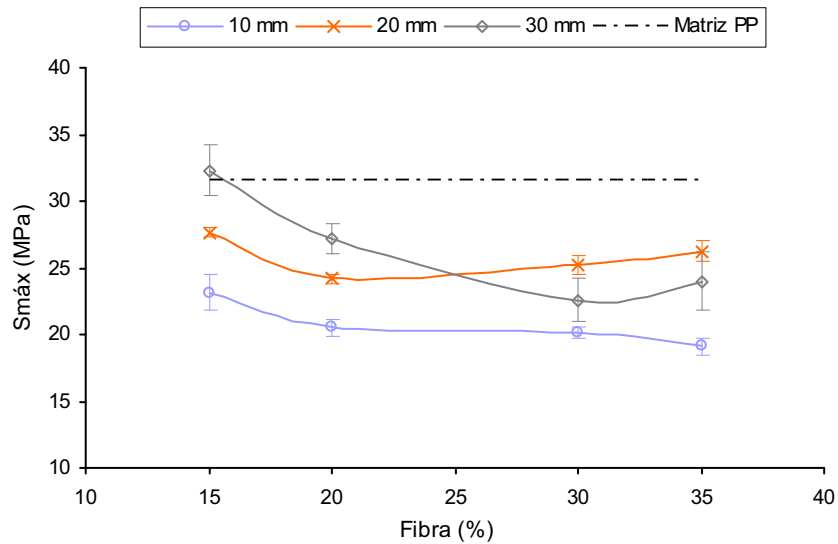


Figura 4.23. Efecto de la fracción de masa de fibra en el esfuerzo máximo a tracción para compuestos que incorporan fibras de 10 mm, 20 mm, y 30 mm distribuidas al azar.

El único punto donde se obtiene un refuerzo en el $Smáx$ (832.32 MPa) es con los compuestos con 15% en masa de fibras y una longitud de fibra de 30 mm; es decir, con el compuesto con menor cantidad de fibra. Luego de esto, el $Smáx$ muestra una disminución en su valor, seguido por un ligero incremento con la adición de fibra, tal como se muestra en la Figura 4.23. Este incremento se puede atribuir a una mejor dispersión de la fibra en la matriz que se presenta en los compuestos de mayor contenido en fibra, como se observa en la Figura 4.14, o al aumento de la superficie de anclaje fibra - matriz. Jayaraman [2002], ha reportado una caída similar en la resistencia de compuestos PP/sisal y orientación al azar, para fracciones en fibra del 10%, seguido luego de un aumento.

La Figura 4.24 muestra claramente el crecimiento importante del módulo elástico en todas las composiciones estudiadas con relación al de la matriz PP. Adicionalmente, se aprecia que esta diferencia crece con el contenido de fibra, lo cual era lo esperado al considerar que se va reduciendo el contenido de PP, cuyo módulo es bajo, 548.65 MPa, y va aumentando la cantidad de fibra cuyo módulo en cambio está alrededor de los 30 GPa. Este resultado concuerda con lo expuesto en el Capítulo 2, en donde se había comentado que el módulo depende solamente del tipo de material, cantidad, y dispersión en la matriz [Karmaker et al., 1996].

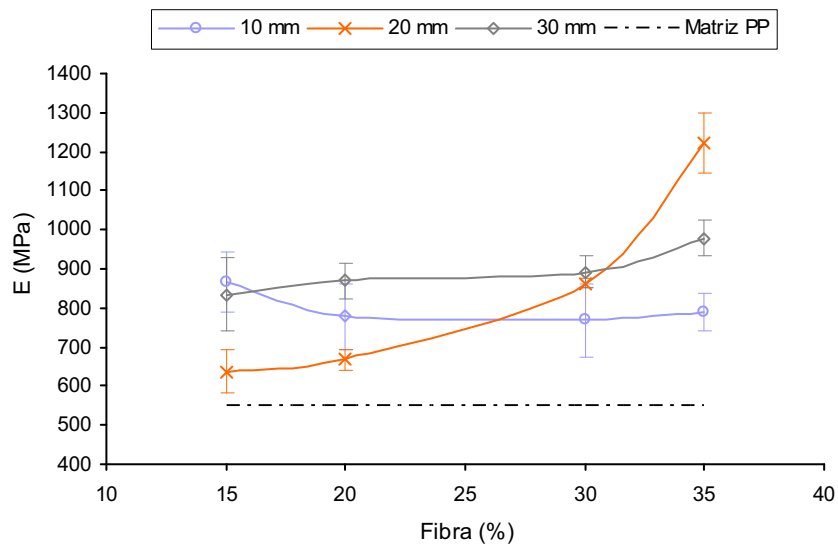


Figura 4.24. Efecto de la fracción de masa de fibra en el módulo a tracción para compuestos que incorporan fibras de 10 mm, 20 mm, y 30 mm distribuidas al azar.

La tendencia más definida de aumento del módulo se presenta en los compuestos con fibra de 20 mm de longitud. El módulo va de 636.24 MPa para 15% en fibra, hasta un máximo de 1220.93 MPa para 35% en fibra, lo cual representa un aumento del 123% con respecto a la rigidez del PP. En cuanto a los compuestos de 30 mm, existe un crecimiento que no es tan pronunciado como el caso anterior; el máximo alcanzado es de 979.10 MPa para 35% de fibra, representando el 78% de aumento de rigidez en comparación con el PP. Los compuestos con fibras de 10 mm de longitud presentan un resultado diferente a los dos anteriores ya que, según la Figura 4.24, el módulo más alto se presenta con un 15% de fibra para luego prácticamente estabilizarse en alrededor de unos 770 MPa.

De los resultados obtenidos, parecería ser que al aumentar el contenido de fibra, aumenta el módulo (E) mientras que el esfuerzo máximo a tracción ($S_{m\acute{a}x}$) disminuye, efecto que es más evidente para compuestos con fibras de 20 y 30 mm, cuyo comportamiento se ilustra en las Figuras 4.25 y 4.26. La razón de este comportamiento podría ser que la unión entre fibra y matriz no es lo suficientemente fuerte como para permitir mejoras en relación al $S_{m\acute{a}x}$, mientras que como se vio anteriormente, el E depende en primera instancia de la cantidad de la fibra que se haya incorporado.

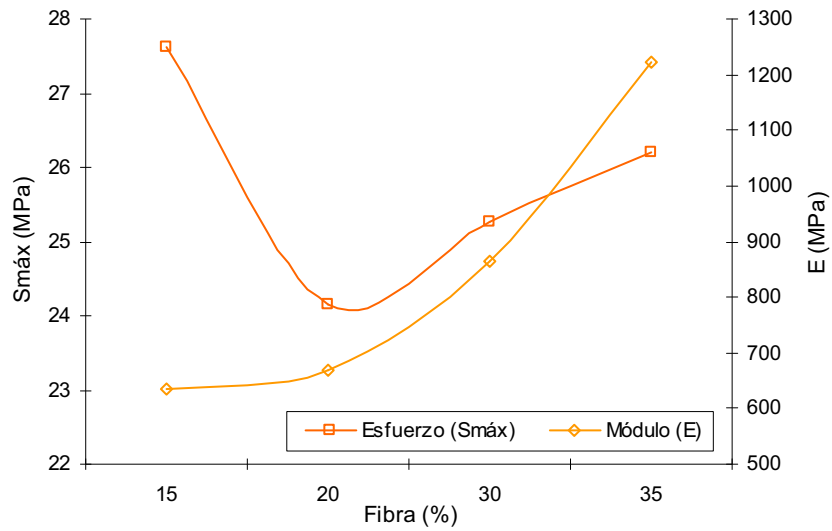


Figura 4.25. Variación del esfuerzo máximo y módulo a tracción en función de la fracción de fibra, para compuestos con fibras de 20 mm de largo.

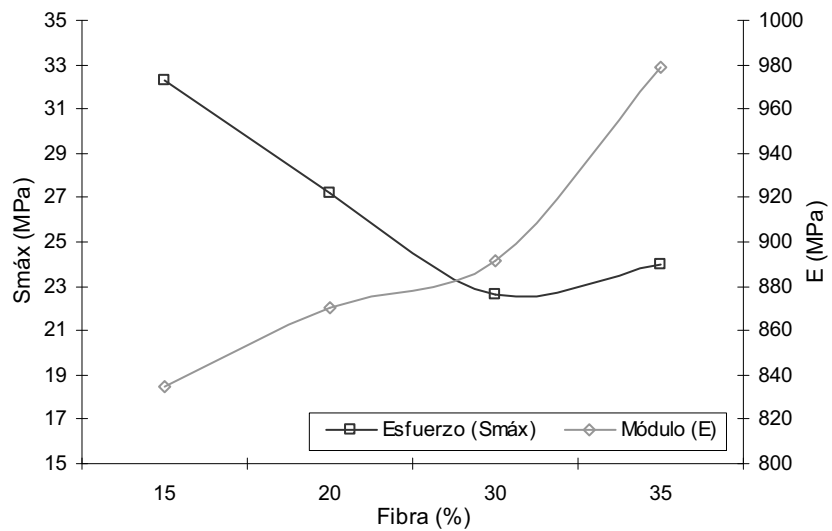


Figura 4.26. Variación del esfuerzo máximo y módulo a tracción en función de la fracción de fibra, para compuestos con fibras de 30 mm de largo.

4.2.1.3. Comportamiento a flexión

Así como se discutió anteriormente el comportamiento a la tracción, en este apartado se expone y analiza el comportamiento a flexión de los materiales compuestos con diferentes composiciones estudiadas.

De la inspección visual de las probetas ensayadas, se puede indicar que aunque el ensayo se detuvo al alcanzar el 5% de deformación, la probeta sufrió una deformación irreversible, denotando que se sobrepasó su límite elástico. Esto se puede apreciar en la Figura 4.27.



Figura 4.27. Deformación plástica en probetas de ensayo a flexión de compuestos de fibra corta.

Según indica la norma ASTM D-5943 [1996], la distancia (L) entre los soportes de la probeta debe ser normalizado convenientemente en función del espesor (\bar{h}) de la misma, es decir $L = (16 \pm 1) \bar{h}$, con el fin de que la acción del esfuerzo cortante resulte prácticamente despreciable. Por esta razón el estado de esfuerzos en flexión viene dado por el esfuerzo normal inducido por el momento flector máximo que se da en el ensayo.

En la Tabla 4.7 se recopilan los valores medios y las desviaciones estándar del esfuerzo máximo a flexión obtenido hasta un porcentaje de deformación del 5% ($S_{flex@5\%}$) y del módulo a flexión (E_f) para los compuestos de fibra corta estudiados y para la matriz de PP.

Tabla 4.7. Propiedades a flexión de los compuestos obtenidos a diferentes composiciones.

| Fibra | | Propiedades a Flexión | |
|--------------|---------------|-----------------------|----------------------|
| Fracción (%) | Longitud (mm) | $S_{flex@5\%}$ (MPa) | E_f (MPa) |
| 15 | 10 | 40.93 ± 2.22 | 1388.80 ± 72.56 |
| 20 | | 43.87 ± 0.45 | 1659.60 ± 74.86 |
| 30 | | 43.16 ± 6.27 | 1701.80 ± 141.33 |
| 35 | | 33.89 ± 2.35 | 1442.00 ± 70.18 |

| | | | |
|--------|----|------------------|----------------------|
| 15 | 20 | 44.42 ± 2.81 | 1382.60 ± 194.09 |
| 20 | | 47.46 ± 1.54 | 1695.40 ± 168.68 |
| 30 | | 40.08 ± 2.58 | 1705.20 ± 286.84 |
| 35 | | 42.13 ± 3.15 | 1518.40 ± 115.09 |
| 15 | 30 | 49.79 ± 2.85 | 1459.60 ± 87.85 |
| 20 | | 45.33 ± 2.76 | 1351.60 ± 165.52 |
| 30 | | 40.73 ± 4.28 | 1488.60 ± 117.05 |
| 35 | | 38.75 ± 2.29 | 1552.80 ± 106.83 |
| Matriz | | 37.50 ± 0.83 | 1249.60 ± 107.38 |

De los datos expuestos en la Tabla 4.7 se puede indicar que existe un aumento en ambas propiedades a flexión para prácticamente todas las composiciones. Resultado que merece ser resaltado debido a la poca afinidad que presentan las fibras y la matriz de PP.

A continuación, en las Figuras 4.28 y 4.29 se presentan los valores obtenidos en el ensayo a flexión, para las distintas composiciones de los materiales compuestos de fibra corta.

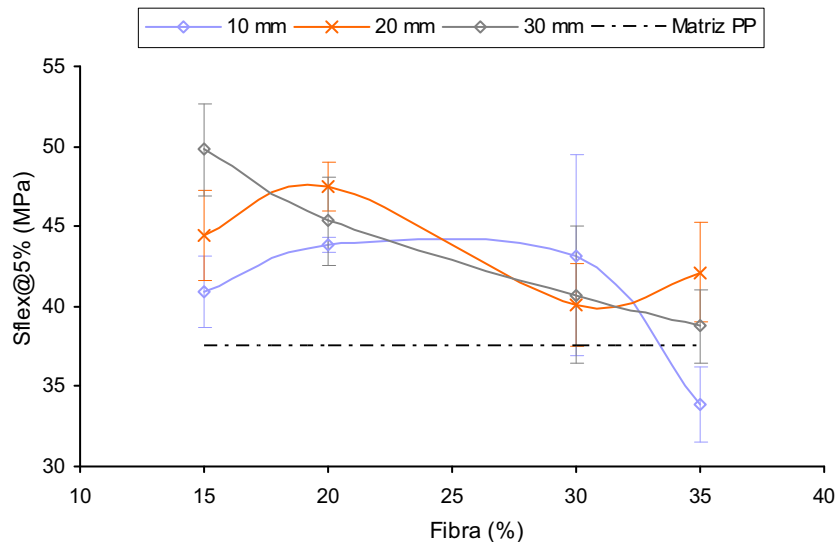


Figura 4.28. Efecto de la fracción de masa de fibra en el esfuerzo máximo a flexión, registrado hasta un porcentaje de deformación del 5%, para compuestos con fibras de 10 mm, 20 mm, y 30 mm distribuidas al azar.

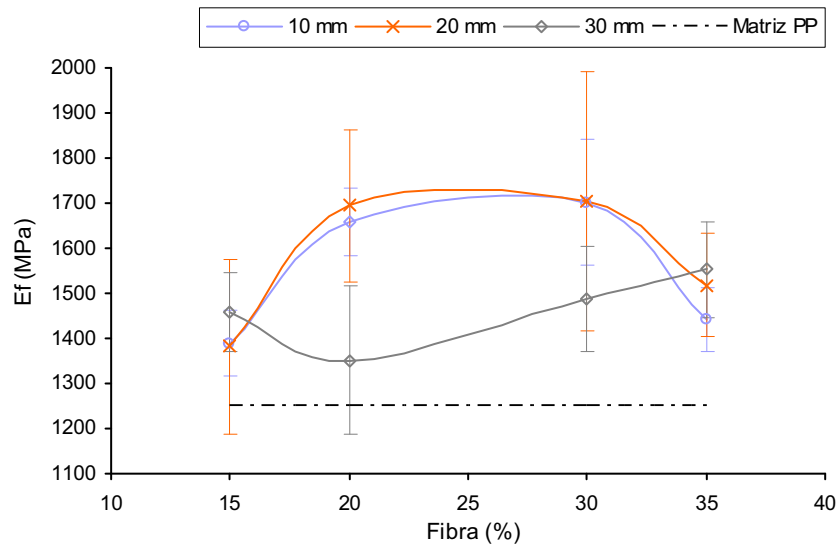


Figura 4.29. Efecto de la fracción de masa de fibra en el módulo a flexión para compuestos con fibras de 10 mm, 20 mm, y 30 mm distribuidas al azar.

A diferencia de los resultados obtenidos en cuanto al esfuerzo máximo a tracción, en el esfuerzo a flexión, Figura 4.28, se evidencia un reforzamiento de la matriz PP en prácticamente todas las composiciones. Este aumento llega a ser del 33% en el punto máximo. Sin embargo, se conserva la misma tendencia a ir disminuyendo conforme aumenta el contenido de fibra. Esto evidencia la poca afinidad fibra – matriz que existe en este tipo de compuestos, ya que se esperaría que al existir una mayor cantidad de fibra, las cargas se distribuyan de mejor manera en esta y por consiguiente la resistencia del compuesto aumente.

En cuanto al módulo a flexión, existe un reforzamiento en relación a la matriz PP para todas las composiciones. Se presentan máximos en los compuestos con 20 y 30% de fibra, tal como se puede ver en la Figura 4.29. Nótese que para compuestos con fibra de 10 y 20 mm de longitud, los módulos a flexión para todas las fracciones en fibra son prácticamente iguales.

Como se puede ver en la Figura 4.30, los módulos a flexión son mayores que los de tracción. Este efecto se atribuye a la configuración de los esfuerzos; es decir, a la diferencia en las dos condiciones de carga que provocan diferentes clases de esfuerzo en el material bajo prueba. El esfuerzo en el ensayo a tracción es uniforme a lo largo de toda la sección transversal de la probeta, mientras que el

esfuerzo a flexión varía desde cero en el eje neutro hasta un valor máximo en la superficie superior o inferior (z_{\max}) de la misma. El ensayo a flexión es altamente influenciado por las propiedades o características del material próximo a las superficies superior e inferior de las probetas, mientras que el ensayo de tensión refleja las propiedades medias a través de su espesor. En consecuencia, las mediciones del módulo a tracción y flexión difieren significativamente cuando el material es anisotrópico y no homogéneo.

En forma general, se ha visto que los compuestos de fibra corta no refuerzan la matriz de PP en lo referente al esfuerzo máximo de tracción, aunque si se ha registrado un aumento en el esfuerzo a flexión. El reforzamiento de la matriz más bien se da con un aumento en su rigidez, evidenciado por la disminución de la deformación unitaria y aumento del módulo tanto en tracción como en flexión.

Sin embargo, cabe señalar que estos resultados no son definitivos, ya que es posible que en la siguiente etapa de variación de los parámetros de procesamiento del moldeo por compresión, la humectabilidad y por ende la adhesión mecánica fibras – PP aumente obteniéndose un mejor refuerzo, por parte de las fibras, de alta resistencia y rigidez en el compuesto. Claro que el factor limitante para este aumento sería la pérdida de ductilidad del material, evidenciado por la disminución en el porcentaje de deformación unitaria.

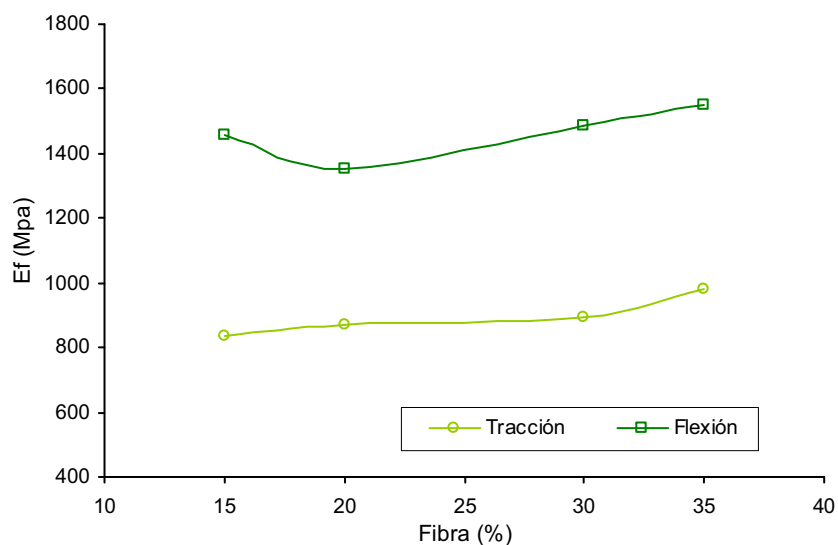


Figura 4.30. Módulos a tracción y flexión de los compuestos con fibra de 30 mm de largo.

4.2.2. COMPUESTOS DE FIBRA CONTINUA – ORIENTACIÓN AXIAL

En el mismo sentido que con los compuestos de fibra corta distribuida al azar, en este apartado se exponen y analizan los resultados obtenidos de los ensayos a tracción y flexión de los compuestos de fibra continua orientada unidireccionalmente.

Las composiciones estudiadas hacen referencia a una única longitud de fibra de 115 mm (ancho del molde), y concentraciones en masa de fibra de 15, 20, 30 y 35%. Para obtener una orientación unidireccional de las fibras continuas fue necesario cambiar el método de conformación, ya que con el utilizado en los compuestos de fibra corta se obtiene una orientación al azar. El método simplemente consistió en colocar las fibras entre las placas de PP con la ayuda de una peinilla, para desenredarlas y tratar de que queden lo más orientadas posibles. En la Figura 4.31 se muestran los compuestos obtenidos con la fibra continua y diferentes fracciones máxicas de fibra.

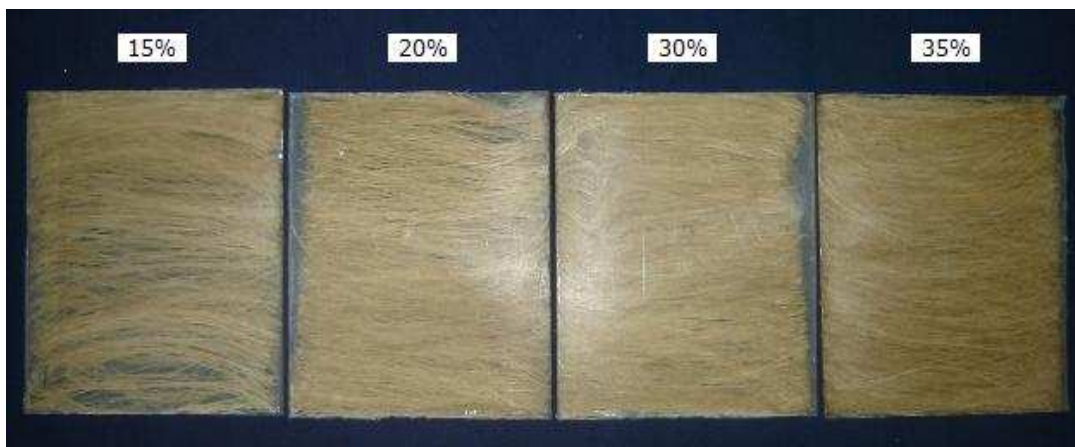


Figura 4.31. Compuestos que incorporan diferentes contenidos de fibra continua orientada unidireccionalmente.

En cuanto a la dispersión de la fibra, el resultado fue similar al obtenido con los compuestos de fibras cortas; es decir, se obtienen placas con regiones que contienen más y otras que tienen menos fibra. Este defecto en la dispersión se iba minimizando con el aumento en su contenido. A continuación, en la Figura 4.32, se muestra la distribución de las fibras en los compuestos con 35% en fibra continua, que presentó la mejor distribución.



Figura 4.32. Dispersión de las fibras en los compuestos con 35% en masa de fibra continua.

4.2.2.1. Comportamiento a la tracción

La Figura 4.33 muestra la fractura de las probetas ensayadas a tracción, evidenciando un corte en las fibras de refuerzo y no únicamente de la matriz, como fue el caso presentado en los compuestos con fibras distribuidas al azar. El corte de las fibras se debe posiblemente a la existencia de un mayor anclaje mecánico, ya que el tener una fibra orientada unidireccionalmente permite obtener una mayor superficie efectiva de contacto con la matriz, haciendo más difícil el deslizamiento de las fibras que la rotura de las mismas.



Figura 4.33. Fractura de las probetas de tracción para compuestos de fibra continua.

La Tabla 4.8 muestra los valores medios y la desviación estándar de los datos obtenidos en el ensayo a tracción. Cabe señalar que por la alta dispersión presentada en las propiedades de estos compuestos, no fue posible seguir el mismo criterio de tener un valor de la desviación menor al 10% del valor medio.

Tabla 4.8. Valores de deformación, esfuerzo y módulo a tracción de los materiales compuestos unidireccionales de fibra continua.

| Material | Fibra (%) | Propiedades a Tracción | | |
|-----------|-----------|------------------------|-------------------------|--------------------|
| | | ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) |
| Matriz PP | | 15.52 ± 1.52 | 31.62 ± 0.39 | 548.65 ± 6.68 |
| FC15 | 15 | 6.47 ± 0.65 | 60.64 ± 6.21 | 1196.4 ± 67.0 |
| FC20 | 20 | 6.59 ± 0.53 | 47.66 ± 18.62 | 1088.1 ± 253.8 |
| FC30 | 30 | 7.50 ± 0.81 | 63.40 ± 20.09 | 1425.2 ± 121.4 |
| FC35 | 35 | 9.01 ± 0.76 | 141.86 ± 18.73 | 1966.2 ± 169.8 |

De manera general, los datos expuestos muestran un reforzamiento tanto en rigidez como en resistencia máxima a tracción, evidenciando la importancia del estudio de un proceso que permita la obtención de compuestos unidireccionales de fibras continuas.

A continuación se discuten los resultados correspondientes a cada propiedad mecánica de los materiales reforzados con fibra continua, obtenidas mediante el ensayo de tracción.

Aun cuando las deformaciones unitarias a esfuerzo máximo de estos compuestos de fibra continua y orientada longitudinalmente son menores a la deformación original de la matriz de PP, en la Figura 4.34 se observa que la deformación del compuesto aumenta con relación a la concentración de masa de fibra presente en el compuesto. Resultado muy interesante puesto que al aumentar la cantidad de un material rígido de baja deformación (fibra), se esperaba que la deformación del material compuesto disminuya. Sería conveniente determinar en que fracción de masa en fibra se obtiene la máxima deformación unitaria del material y comienza a disminuir. Sin embargo, como se dijo anteriormente, tanto por el alto volumen que ocupan las fibras como por las dimensiones limitadas del molde empleado no fue posible obtener compuestos de fracciones mayores a 35%.

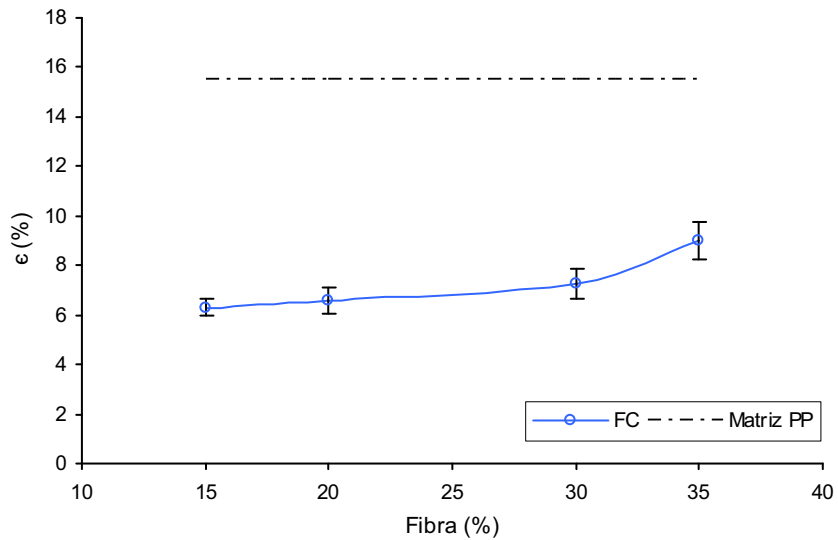


Figura 4.34. Efecto de la fracción de masa de fibra en la deformación a tracción para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.

Con relación al esfuerzo máximo, que se muestra en la Figura 4.35, se observa la misma tendencia a incrementar conforme aumenta la cantidad de fibra en el compuesto. Este crecimiento estaría limitado por la pérdida de ductilidad en el material, expresada en el valor de la deformación unitaria, el cual teóricamente debería disminuir; sin embargo como se vio, la deformación unitaria también aumenta. En este caso, el factor limitante sería el volumen ocupado por las fibras, el cual tiende a saturarse para fracciones másicas mayores.

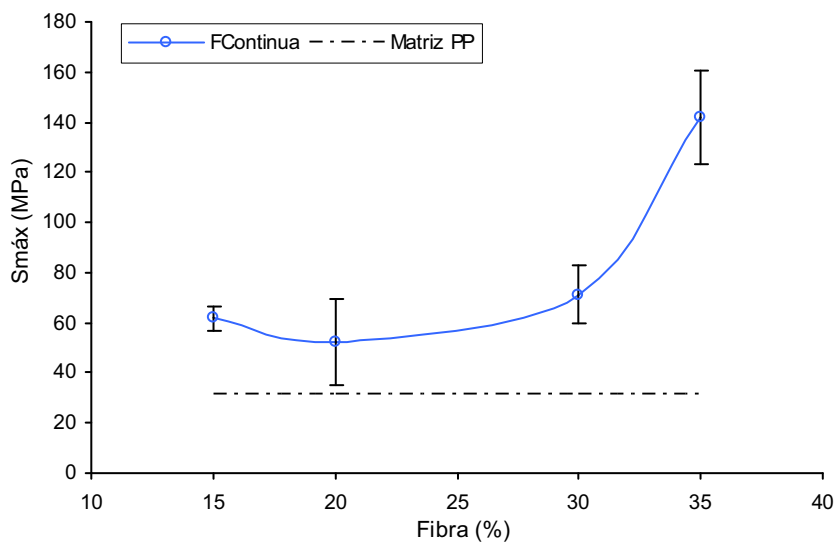


Figura 4.35. Efecto de la fracción de masa de fibra en el esfuerzo máximo a tracción para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.

El máximo valor del esfuerzo máximo a tracción se alcanza en el compuesto con cantidad de fibra 35%, resultado contrario a lo obtenido en compuestos con fibras distribuidas al azar, en donde a mayor cantidad de fibra se tiene menor esfuerzo máximo. Se registra un esfuerzo máximo del orden de los 140 MPa, lo cual representa un incremento del 349% en relación a la matriz PP.

El módulo a tracción de este material muestra un crecimiento parecido al obtenido con el esfuerzo máximo, tal como se observa en la Figura 4.36. Es más, si unimos las curvas podemos ver que al aumentar el contenido de fibra, estas dos propiedades aumentan prácticamente en las mismas proporciones, manteniéndose constantes hasta un 20% de fibra para luego crecer rápidamente. Al confrontar este resultado con el obtenido en los compuestos de fibra cortas, en donde se pudo ver que al aumentar el contenido de fibra aumenta la rigidez mientras que la resistencia máxima disminuye, podemos decir que este resulta ser más real ya que por la alta resistencia y rigidez de la fibra, se esperaba que al aumentar su cantidad, el material compuesto mejore en estos dos aspectos. El máximo valor en módulo que se obtiene es de 1966.20 MPa para un contenido de 35% en fibra, lo cual implica un incremento de 258% aproximadamente del valor del módulo de la matriz PP, denotando la alta rigidez obtenida en el material.

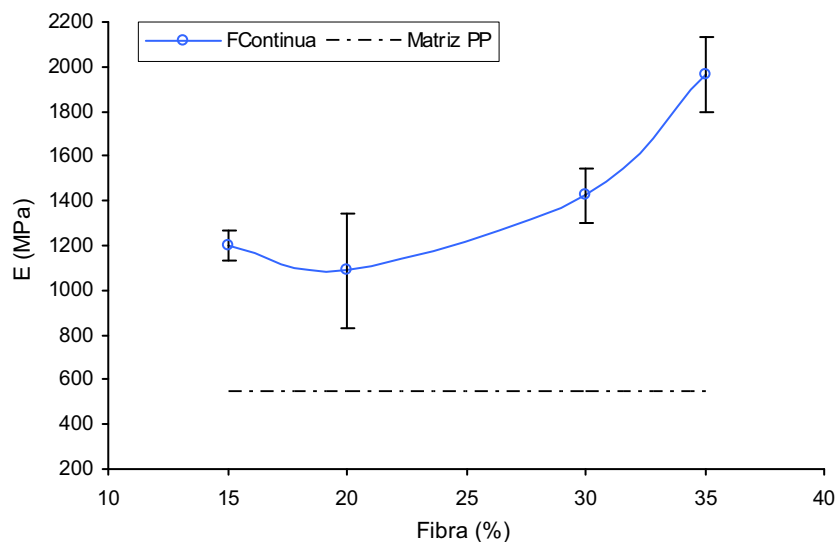


Figura 4.36. Efecto de la fracción de masa de fibra en el módulo a tracción para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.

4.2.2.2. Comportamiento a la flexión

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados obtenidos en cuanto al esfuerzo máximo a flexión obtenido hasta una deformación del 5% ($S_{flex@5\%}$). Además se muestran los resultados del módulo a flexión (E_f) tanto para los materiales de fibra continua en sus diferentes fracciones másicas, como para la matriz de PP.

Tabla 4.9. Propiedades a flexión de los compuestos unidireccionales de fibra continua para diferentes fracciones de fibra.

| Fracción (%) | Propiedades a Flexión | |
|--------------|-----------------------|----------------------|
| | $S_{flex@5\%}$ (MPa) | E_f (MPa) |
| Matriz PP | 37.50 ± 0.83 | 1249.60 ± 107.38 |
| 15 | 52.32 ± 1.34 | 1246.60 ± 33.55 |
| 20 | 56.92 ± 5.59 | 1576.40 ± 151.62 |
| 30 | 82.33 ± 2.63 | 2455.00 ± 279.86 |
| 35 | 88.40 ± 10.88 | 3265.80 ± 879.88 |

Los datos expuestos muestran un reforzamiento considerable de la matriz PP en lo que se refiere al esfuerzo y módulo a flexión. Las Figuras 4.37 y 4.38 muestran la variación de estas propiedades en función del contenido de fibra.

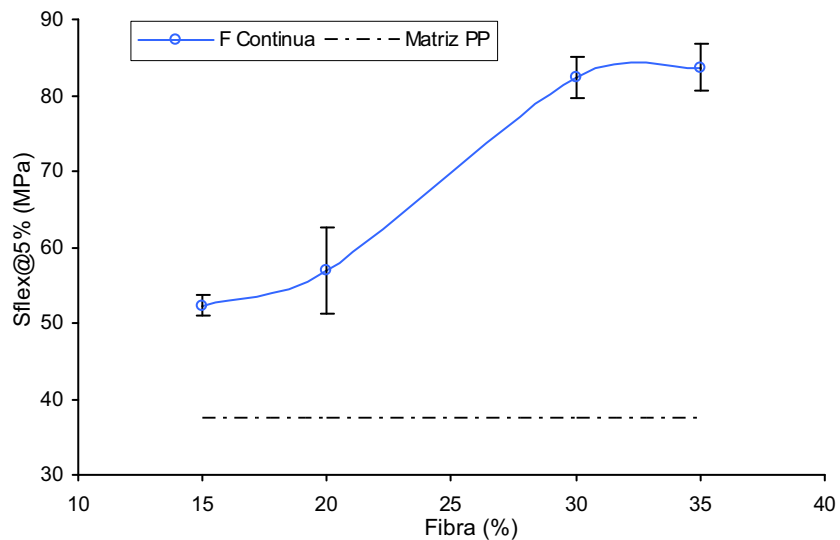


Figura 4.37. Efecto de la fracción de masa de fibra en el esfuerzo máximo a flexión, registrado hasta el 5% de la deformación, para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.

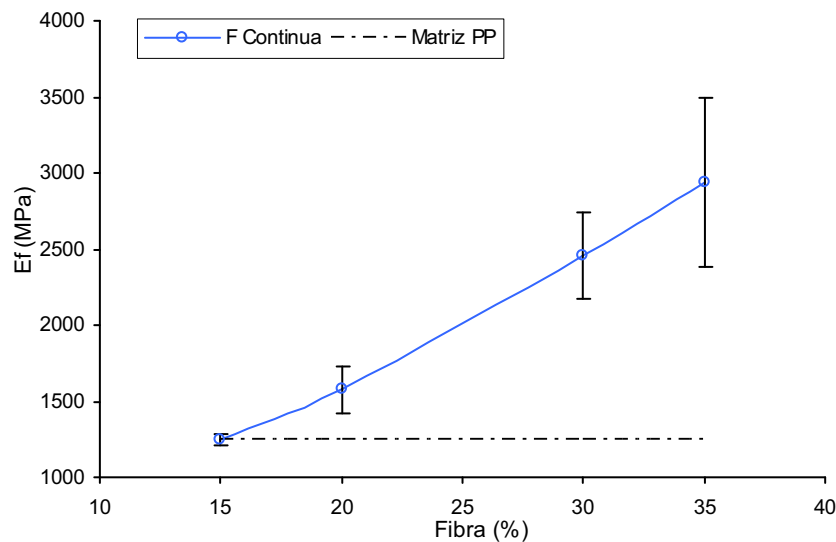


Figura 4.38. Efecto de la fracción de masa de fibra en el módulo a flexión para compuestos unidireccionales de fibra continua – orientación longitudinal.

De la Figura 4.37 se concluye que al aumentar la fracción de fibra se mejora la resistencia en flexión, observándose que esta tendencia se mantiene hasta una fracción de fibra del 30%, y sobre este valor tiende a mantenerse constante. El máximo valor obtenido es de 88.40 MPa, lo que en porcentaje representa un incremento del 135% con relación a la matriz PP, valor que resulta muy interesante si lo comparamos con los valores obtenidos en los compuestos de fibra corta, en donde el máximo refuerzo que se alcanzó fue del 33% en relación a la matriz PP. En la figura 4.38 se aprecia que el módulo a flexión se incrementa respecto al contenido de fibra. Para un 35% de fibra, se tiene un aumento del 161% respecto al módulo en flexión de la matriz PP.

En forma general se ha visto que los materiales compuestos unidireccionales con fibras continuas son dignos de estudio ya que presentan resultados interesantes en cuanto a sus propiedades mecánicas. Resultados como el mantener o ir aumentado su ductilidad con el contenido de fibra, manifestada con el aumento de la deformación unitaria a tracción, mientras que se refuerza considerablemente la resistencia máxima a tracción y flexión. Adicionalmente en estos materiales se obtiene un aumento en la rigidez manifestado con el aumento considerable del módulo tanto para tracción como para flexión.

Sin embargo, el mayor problema presentado en estos compuestos unidireccionales de fibra continua, es la gran dispersión obtenida en sus propiedades mecánicas. Efecto que básicamente se atribuye a la variación implícita que tienen las propiedades de las fibras naturales en general, y del abacá en particular, y al hecho de que al tratarse de una fibra larga, no hubo la posibilidad de realizar una especie de mezcla entre la propia fibra para reducir su dispersión en sus propiedades, como si se lo hizo con la fibra corta.

4.2.3. COMPARACIÓN ENTRE PROPIEDADES Y SELECCIÓN DE LAS COMPOSICIONES

La orientación de las fibras juega un rol importante en las propiedades de los compuestos. El efecto de la orientación puede fácilmente ser observado a partir de las figuras presentadas del esfuerzo máximo a tracción de los compuestos con fibras unidireccionales y distribuidas al azar contra el contenido de fibra. Como se esperaba, el esfuerzo en los compuestos unidireccionales es muy superior al de los compuestos con fibras orientadas al azar. La orientación al azar hace que cierta cantidad de fibra se alinee perpendicularmente a la dirección de la fuerza aplicada, haciendo que la fibra no trabaje en conjunto con la matriz para aumentar su resistencia. Es más, se creería que estas fibras actúan como concentradores de esfuerzo, perjudicando aún más el valor de la resistencia obtenida.

En los compuestos de fibra corta y orientada al azar se ve que con mayor cantidad de fibra se presentan los mejores resultados en lo referente a los módulos tanto de flexión como de tracción, mejorando así la rigidez de la matriz. Si bien estos compuestos no presentaron un refuerzo en el esfuerzo máximo de tracción, la disminución es menor al 25% y se espera que variando los parámetros del procesamiento se mejore la adhesión mecánica entre fibra y matriz, obteniendo así un refuerzo en este aspecto. En definitiva, para los compuestos de fibra corta, las mejores combinaciones en las propiedades se presentan con longitudes de 20 mm y 30 mm y fracciones en masa de 30 y 35% de fibra.

Basándose en estos resultados, se tiene 4 composiciones del material de fibra corta que mejor combinaciones presentaron en sus propiedades de tensión y

flexión, las cuales se detallan en las Tablas 4.10 y 4.11, respectivamente. En los compuestos con fibra continua se tiene una sola composición que sin duda presentó los mejores resultados, esta es 35% en fracción másica de fibra.

Tabla 4.10. Propiedades mecánicas a tracción de las composiciones con las cuales se obtuvo mejores resultados.

| Composición | Tracción | | |
|-------------|----------------|-------------------------|------------------|
| | ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) |
| Matriz PP | 15.52 ± 1.52 | 31.62 ± 0.39 | 548.65 ± 6.68 |
| FC, 35% | 9.01 ± 0.76 | 141.86 ± 18.73 | 1966.20 ± 169.76 |
| 30 mm, 35% | 3.90 ± 0.28 | 23.99 ± 2.20 | 979.10 ± 47.16 |
| 30 mm, 30% | 4.12 ± 0.15 | 22.60 ± 1.63 | 891.55 ± 41.91 |
| 20 mm, 35% | 4.21 ± 0.07 | 26.21 ± 0.77 | 1220.93 ± 75.98 |
| 20 mm, 30% | 5.29 ± 0.22 | 25.26 ± 0.72 | 863.42 ± 13.67 |

Tabla 4.11. Propiedades mecánicas a flexión de las composiciones con las cuales se obtuvo mejores resultados.

| Composición | Flexión | |
|-------------|------------------|------------------|
| | S_{flex} (MPa) | E_f (MPa) |
| Matriz PP | 37.50 ± 0.83 | 1249.60 ± 107.38 |
| FC, 35% | 83.68 ± 3.00 | 2936.25 ± 555.18 |
| 30 mm, 35% | 38.75 ± 2.29 | 1552.80 ± 106.83 |
| 30 mm, 30% | 40.73 ± 4.28 | 1488.60 ± 117.05 |
| 20 mm, 35% | 42.13 ± 3.15 | 1518.40 ± 115.09 |
| 20 mm, 30% | 40.08 ± 2.58 | 1705.20 ± 286.84 |

Para la siguiente etapa se decidió estudiar una composición por cada longitud de fibra incorporada en los compuestos. Para compuestos con fibras de 30 mm, se decidió utilizar una fracción de 35%, y para los compuestos de 20 mm una fracción en fibra del 30%.

4.3. PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO

Definidas en la etapa anterior las mejores composiciones de los materiales compuestos PP/abacá, se procedió con la etapa de procesamiento, en donde se evalúan los efectos que tienen los distintos parámetros del moldeo por

compresión (T_1 , P_1 , t_1 , T_2 , P_2 , t_2 , T_3 , P_3 y t_3) sobre las propiedades mecánicas. En esta etapa también se definen aquellos valores de los parámetros que permiten obtener mejores resultados de los ya obtenidos en cuanto a las propiedades mecánicas de las composiciones.

Por lo extenso, en esta etapa de experimentación, únicamente se trabajó con dos composiciones de los compuestos de fibra corta, para al final, utilizar los parámetros mejorados y evaluar el efecto que tienen estos sobre las demás composiciones de fibra larga y fibra corta. Las composiciones seleccionadas en la etapa anterior y con las que se trabajó en esta son: 35% con fibra de 30 mm (composición 1), y 30% con fibra de 20 mm (composición 2).

Los resultados de estas pruebas se exponen en tres partes, correspondientes a cada fase del proceso de moldeo, en donde se analizan los parámetros del procesamiento en función de las propiedades mecánicas de tracción y flexión obtenidas con cada variación de estos, para así determinar con cuales se presentan las mejores propiedades. Se comenzó determinando los parámetros y las propiedades mecánicas de la fase de moldeo, para luego continuar con la de precalentamiento y terminar con la de fase de enfriamiento.

La temperatura de precalentamiento y moldeo (T_1 y T_2) se fijó a 180°C , ya que se ha demostrado que es una temperatura que no degrada a la fibra y que permite una correcta fusión de la matriz, además de ser la bibliográficamente recomendada para los compuestos de PP homopolímero reforzados con fibra vegetal. De igual manera, para la fase de enfriamiento se ha definido de antemano el tiempo (t_3) y temperatura inicial del agua de enfriamiento (T_3), según los resultados obtenidos y especificados en el apartado 4.1.3 de este trabajo.

4.3.1. FASE DE MOLDEO

En este apartado se describen los efectos de la variación del tiempo (t_2) y la presión (P_2) de la fase de moldeo sobre las propiedades mecánicas de las composiciones seleccionadas.

Los resultados obtenidos en cuanto a las propiedades mecánicas a tracción y flexión se muestran en las Tablas 4.12 y 4.13, respectivamente. Estos valores se describen en función de la variación de P_2 y t_2 , y de la composición del material.

Tabla 4.12. Propiedades mecánicas a la tracción de los compuestos obtenidos con la variación de los tiempos y presiones de moldeo en las dos composiciones seleccionadas.

| | | Presión P_2 (MPa) | Tiempo t_2 (min) | | |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| | | | 2 | 4 | 6 |
| Composición 1 (35%, 30 mm) | ϵ (%) | 0.884 | 3.90 ± 0.28 | 4.59 ± 0.29 | 4.84 ± 0.29 |
| | | 1.473 | 5.57 ± 0.43 | 4.54 ± 0.26 | 4.26 ± 0.31 |
| | | 2.062 | 5.17 ± 0.41 | 4.23 ± 0.19 | 4.90 ± 0.37 |
| | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | 0.884 | 27.19 ± 2.32 | 26.11 ± 1.62 | 25.06 ± 1.89 |
| | | 1.473 | 24.22 ± 1.61 | 28.24 ± 2.29 | 24.52 ± 1.23 |
| | | 2.062 | 22.52 ± 2.05 | 31.07 ± 1.80 | 27.23 ± 2.52 |
| | E (MPa) | 0.884 | 979.10 ± 47.16 | 1009.00 ± 66.95 | 1036.18 ± 48.42 |
| | | 1.473 | 1096.40 ± 37.77 | 1095.80 ± 48.32 | 1108.00 ± 64.76 |
| | | 2.062 | 1074.62 ± 69.17 | 1109.40 ± 74.05 | 1111.25 ± 43.88 |
| Composición 2 (30%, 20 mm) | ϵ (%) | 0.884 | 4.56 ± 0.20 | 4.86 ± 0.34 | 4.56 ± 0.25 |
| | | 1.473 | 5.47 ± 0.34 | 4.89 ± 0.17 | 4.40 ± 0.18 |
| | | 2.062 | 5.25 ± 0.31 | 4.47 ± 0.43 | 4.37 ± 0.29 |
| | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | 0.884 | 24.89 ± 0.92 | 26.63 ± 2.20 | 24.90 ± 0.93 |
| | | 1.473 | 28.39 ± 1.04 | 28.60 ± 1.04 | 25.03 ± 0.55 |
| | | 2.062 | 27.31 ± 1.18 | 25.49 ± 1.47 | 22.89 ± 1.51 |
| | E (MPa) | 0.884 | 897.56 ± 19.02 | 1016.16 ± 73.05 | 893.60 ± 28.24 |
| | | 1.473 | 962.76 ± 69.39 | 1125.20 ± 43.94 | 980.90 ± 26.33 |
| | | 2.062 | 1005.86 ± 55.49 | 930.68 ± 45.05 | 838.40 ± 35.25 |

Tabla 4.13. Propiedades mecánicas a flexión de los compuestos obtenidos con la variación de los tiempos y presiones de moldeo en las dos composiciones seleccionadas.

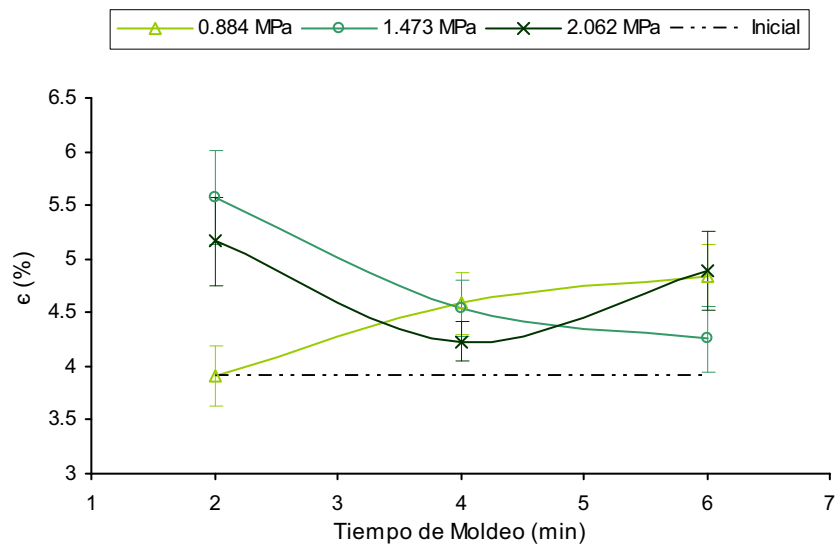
| | | Presión P_2 (MPa) | Tiempo t_2 (min) | | |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| | | | 2 | 4 | 6 |
| Composición 1 (35%, 30 mm) | $S_{flex@5\%}$ (MPa) | 0.884 | 38.75 ± 2.29 | 47.60 ± 4.29 | 45.02 ± 4.21 |
| | | 1.473 | 44.12 ± 2.50 | 54.05 ± 1.38 | 47.26 ± 4.01 |
| | | 2.062 | 50.63 ± 2.55 | 55.21 ± 3.18 | 43.26 ± 2.38 |
| | E_f (MPa) | 0.884 | 1552.80 ± 106.83 | 1675.00 ± 155.62 | 1927.50 ± 231.13 |
| | | 1.473 | 1846.20 ± 93.75 | 2132.00 ± 213.91 | 2087.80 ± 144.40 |
| | | 2.062 | 1870.40 ± 123.78 | 2185.00 ± 118.81 | 2063.40 ± 145.03 |
| Composición 2 (30%, 20 mm) | $S_{flex@5\%}$ (MPa) | 0.884 | 45.36 ± 2.18 | 42.64 ± 1.86 | 40.48 ± 1.98 |
| | | 1.473 | 45.18 ± 3.69 | 47.14 ± 1.13 | 45.56 ± 1.69 |
| | | 2.062 | 47.88 ± 1.59 | 42.03 ± 2.27 | 45.67 ± 4.60 |
| | E_f (MPa) | 0.884 | 1829.80 ± 132.30 | 1591.00 ± 117.58 | 1375.60 ± 64.59 |
| | | 1.473 | 1497.20 ± 37.94 | 1619.00 ± 38.71 | 1697.50 ± 148.56 |
| | | 2.062 | 1600.50 ± 136.31 | 1543.00 ± 70.55 | 1829.60 ± 140.17 |

Basándose en estos resultados, se puede señalar que el tiempo de moldeo (t_2) de 4 minutos, independiente de la presión aplicada y de la composición, es el recomendable para el moldeo de estos compuestos PP/abacá, puesto que con este se confiere la mejor combinación de propiedades mecánicas al mismo y la variación de propiedades respecto a 6 minutos no es significativa. Además, este tiempo está en el orden de los tiempos de moldeo empleados en otros trabajos similares.

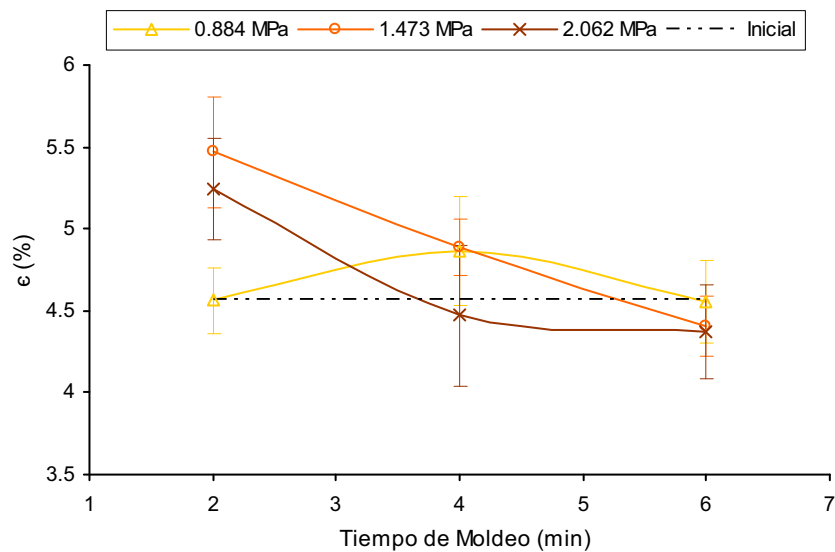
Por otro lado, la selección de la presión de moldeo (P_2) adecuada se haría en función de la composición del material. Para la composición 1, los mejores resultados se obtienen con una P_2 de 2.062 MPa, mientras que para la composición 2, la P_2 de 1.473 MPa presenta los mejores resultados en las propiedades mecánicas. Comportamiento bastante lógico, considerando que para una mayor cantidad y longitud de la fibra (composición 1), la presión necesaria para que el PP fundido humecte y logre introducirse por completo entre las fibras, y por ende mejorar las propiedades, es mayor. Para la composición 2, al tratarse de una cantidad y longitud menor de fibra, basta aplicar una menor presión de moldeo para mejorar sus propiedades.

4.3.1.1. Propiedades a tracción

Un t_2 de 4 minutos permitió obtener valores en la deformación unitaria a carga máxima a la tracción de alrededor de 0.0454 mm/mm para la composición 1 y de 0.0489 mm/mm para la composición 2. Si bien estas deformaciones son muy inferiores al valor de la matriz PP (0.1552 mm/mm), ellas representan una mejora del 18% (composición 1: 35%, 30 mm) y del 7% (composición 2: 30%, 20 mm) en relación al valor inicial obtenido para cada una en la etapa de composición del material donde se utilizó un tiempo t_2 de 2 minutos y una presión P_2 de 0.884 MPa. Este valor inicial se presenta en las Figuras 4.39 (a) y (b), con línea entrecortada.



(a)



(b)

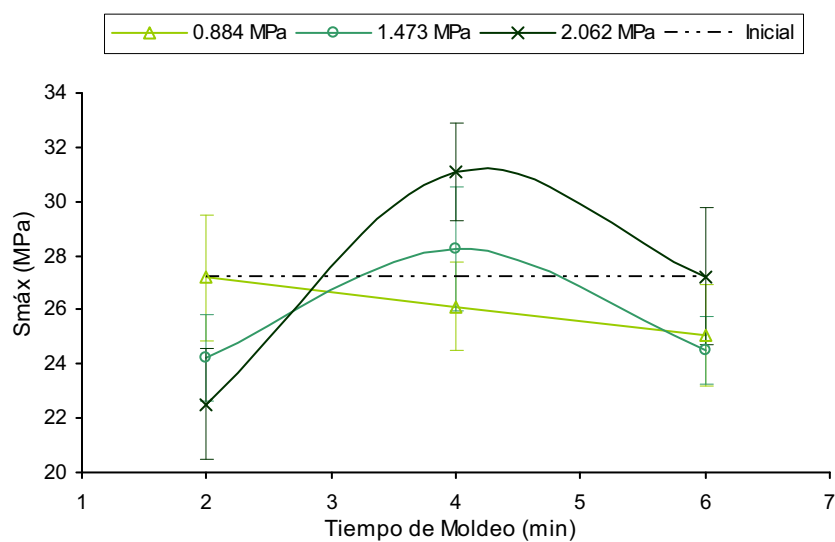
Figura 4.39. Porcentaje de deformación unitaria a carga máxima de tracción, en función del cambio en el tiempo y presión de moldeo: (a) Composición 1 (35%, 30 mm), (b) Composición 2 (30%, 20 mm).

Con t_2 por debajo de los 4 minutos, la deformación aumenta, y por encima la deformación disminuye. Según esto, sería mejor emplear un tiempo de moldeo menor a los 4 minutos con el fin de obtener una mayor deformación unitaria en el material, es decir una mejor ductilidad en el mismo. Sin embargo, como se ve en las Figuras 4.40 (a) y (b) correspondientes al esfuerzo a carga de tracción máxima y en las Figuras 4.41 (a) y (b) correspondientes a los módulos de tracción, al

aumentar la deformación estas propiedades se ven afectadas, debido posiblemente a una menor unión mecánica fibra - matriz.

Parecería ser que una alta deformación es un indicador de una baja unión mecánica de la matriz con la fibra, lo cual ratificaría lo dicho en la etapa de composición, en donde se observó el mismo efecto. Se cree que al no existir un fuerte anclaje, a bajos esfuerzos esta unión mecánica fibra - matriz se rompe, dejando que la matriz se deslice por las fibras y aumente la deformación unitaria, pero a su vez disminuye las propiedades mecánicas, sobretodo a tracción. Los valores más altos del esfuerzo a carga de tracción máxima ($Smáx$) y el módulo a tracción (E) se obtienen con el t_2 de 4 minutos; sin embargo, el máximo entre estos depende del valor de P_2 .

En la Figura 4.40 (a) para el esfuerzo y Figura 4.40 (b) para el módulo, correspondientes a la composición 1 (35%, 30 mm), se observa que los máximos valores están alrededor de 31.07 MPa para $Smáx$ y 1109.04 MPa para E . El $Smáx$ crece conforme el aumento de P_2 , llegando a su valor más alto con 2.062 MPa, la máxima presión aplicada. El E presenta un comportamiento parecido, con la diferencia de que el máximo se alcanza y estabiliza a partir de los 1.473 MPa de P_2 . Esto haría pensar que para obtener una mayor resistencia en el material, sería necesario aumentar aún más esta P_2 .



(a)

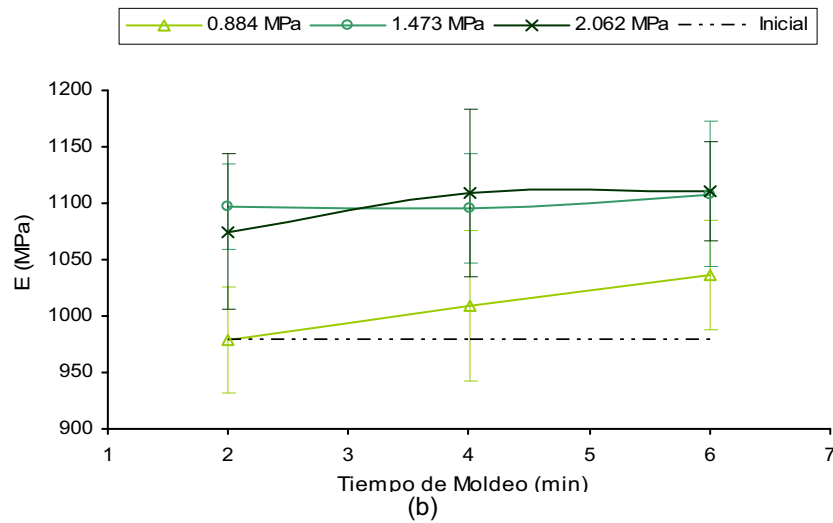
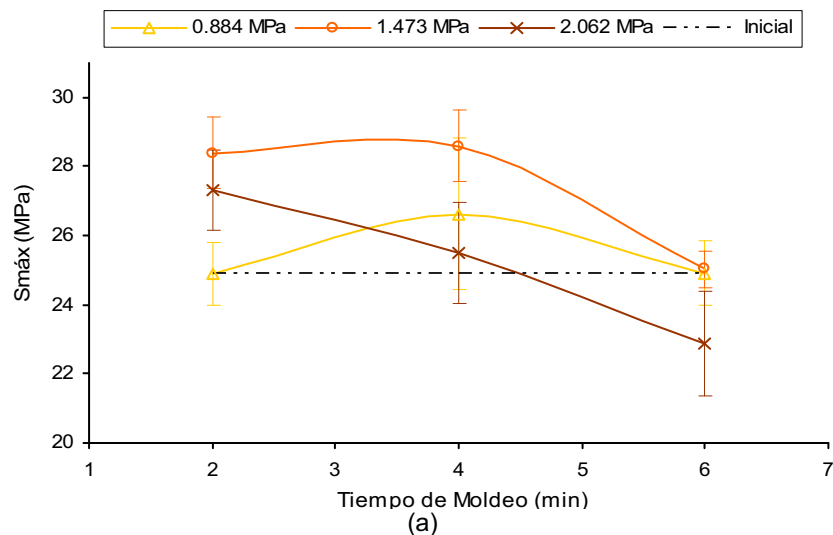


Figura 4.40. Propiedades mecánicas a la tracción para la composición 1 (35%, 30 mm), en función del cambio del tiempo y presión de moldeo: (a) Esfuerzo máximo, (b) Módulo.

En la composición 2, Figura 4.41 (a) para el esfuerzo y Figura 4.41 (b) para el módulo, se alcanzó los valores máximos, 28.6 MPa en $S_{m\acute{a}x}$ y 1125.2 MPa en E , con un solo valor de P_2 (1.473 MPa), para luego presentar una importante disminución en las propiedades conforme el aumento de esta. Esto indicaría que más bien existe un límite para el aumento de las propiedades en función de la P_2 , el cual para la composición 2 parecería ser 1.473 MPa y para la composición 1 sería de 2.062 MPa o ligeramente mayor. Adicionalmente, si se consideran factores económicos, el aumentar la presión de moldeo no es conveniente, por las altas prestaciones que se necesitarían en las prensas o equipos a emplear.



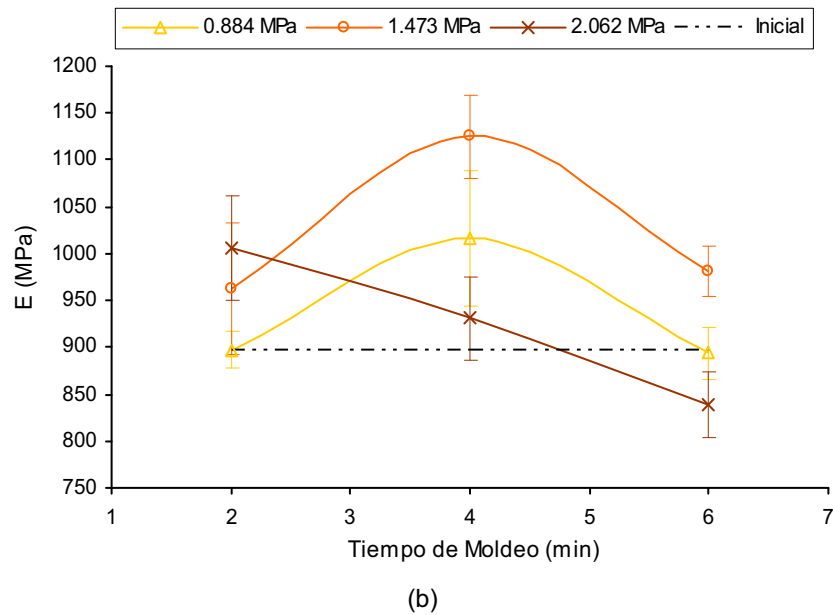


Figura 4.41. Propiedades mecánicas a la tracción para la composición 1 (30%, 20 mm), en función del cambio del tiempo y presión de moldeo: (a) Esfuerzo máximo, (b) Módulo.

Comparando estos valores de $Smáx$ con el de la matriz PP (31.62 MPa), se observa que aun con la mejora en las condiciones de moldeo, no se obtiene un refuerzo en la matriz de PP. Entre las causas que no permitirían que el compuesto mejore su resistencia en relación a la matriz se encuentran la presencia de porosidades (por la inclusión de aire) y la orientación transversal de algunas fibras, que estarían actuando como concentradores de esfuerzo. Si bien estos son los factores más trascendentes, no son los únicos que estarían interviniendo e interactuando con las propiedades del compuesto. Otros posibles factores son el cambio en la conductividad térmica, el cambio en el MFI del polímero, etc.

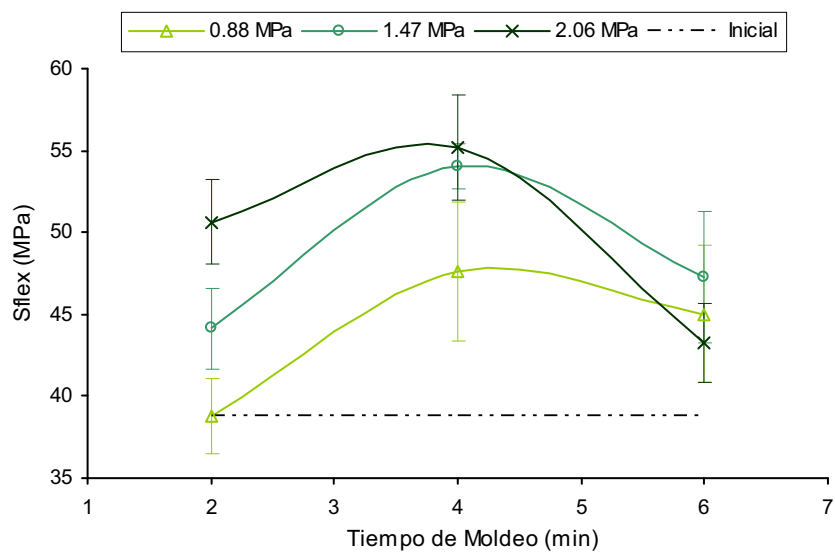
Sin embargo, esta variación en las condiciones de la fase de moldeo han permitido mejorar un 24%, para la composición 1, y un 15%, para la composición 2, el valor del $Smáx$ con relación a los obtenidos en la etapa de composición, mostrados en las figuras con línea entrecortada. De igual manera, existe un incremento del E en relación a los valores iniciales, incremento del 13% para la composición 1 y de 25% para la composición 2.

Este aumento de las propiedades mecánicas a la tracción se pueden atribuir a una serie de consecuencias provocadas por el cambio en las condiciones de moldeo, como son: la mejor inclusión del PP en la fibra de abacá, la buena redistribución y re-orientación de las fibra debido a una pérdida de viscosidad del PP, la disminución de las porosidades presentadas en el compuestos, y sobretodo la mejor mojabilidad del PP en la fibra. Esta mejor mojabilidad se debe al aumento del tiempo de moldeo y la presión que empuja al PP menos viscoso a que se introduzca entre las fibras y mejore así su anclaje mecánico.

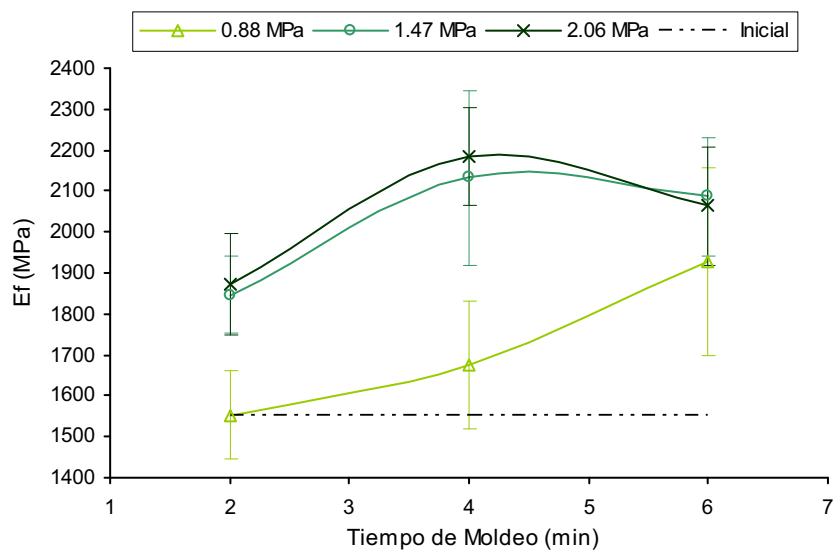
4.3.1.2. Propiedades a flexión

En cuanto a las propiedades a flexión de la composición 1, Figura 4.42 (a) y (b), se observa que los máximos valores alcanzados de S_{flex} y E_f (55.21 MPa, 2185 MPa, respectivamente) se presentan con t_2 de 4 minutos. Al igual que con las propiedades a tracción de la composición 1, los valores de S_{flex} y E_f presentan un crecimiento con P_2 hasta 1.473 MPa, para luego prácticamente estabilizarse. Es decir, los valores presentados cuando P_2 es de 1.473 MPa o de 2.062 MPa son bastante similares. Por este motivo, para la composición 1 bastaría únicamente emplear una P_2 igual a 1.473 MPa, y no 2.062 MPa, como se había determinado en función a los valores presentados de las propiedades a tracción.

En la composición 2, no es posible definir unas condiciones de t_2 y P_2 específicas que mejoren considerablemente las propiedades a flexión, puesto que se obtienen valores parecidos de S_{flex} y E_f con varias combinaciones de t_2 y P_2 , tal como se puede observar en la Figura 4.43 (a) para S_{flex} y (b) para E_f . Sin embargo, las condiciones de moldeo t_2 de 4 minutos y P_2 de 1.473 MPa son la opción recomendada para el procesamiento de la composición 2. Como anteriormente se detalló, estas otorgaron la mejor combinación de propiedades a la tracción, y si bien no confieren los máximos valores obtenidos en las propiedades a flexión, sus valores no son muy inferiores, más aun si se consideran junto con su dispersión (desviación estándar).

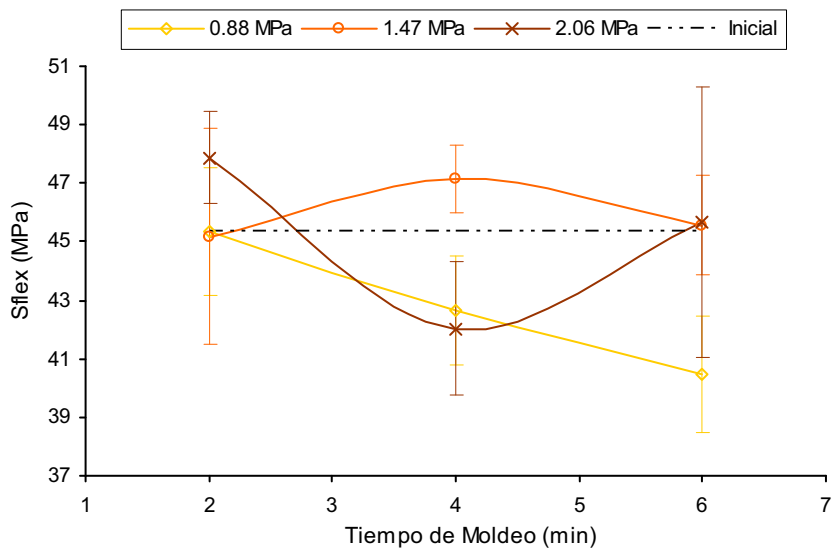


(a)

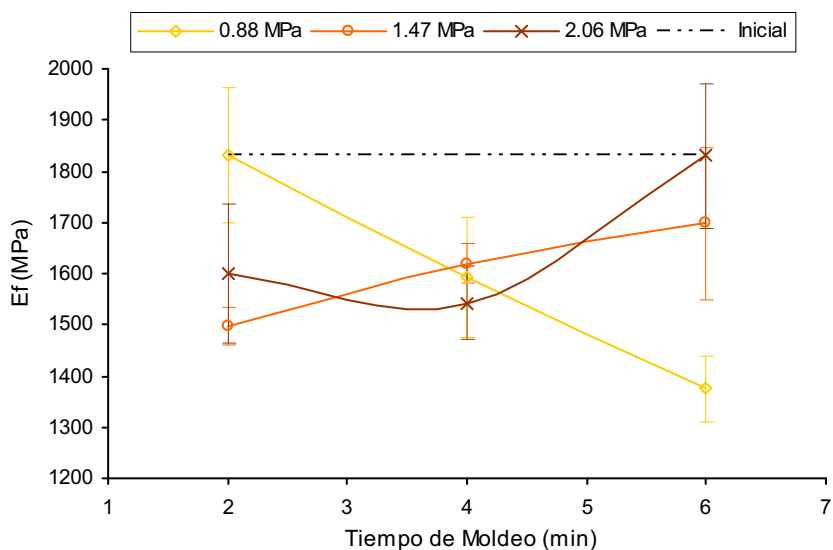


(b)

Figura 4.42. Efecto del tiempo y presión del moldeo sobre las propiedades a flexión de la composición 1: (a) Esfuerzo máximo a flexión, (b) Módulo a flexión.



(a)



(b)

Figura 4.43. Efecto del tiempo y presión del moldeo sobre las propiedades a flexión de la composición 2: (a) Esfuerzo máximo a flexión, (b) Módulo a flexión.

Al comparar los valores de las propiedades a flexión obtenidos a las condiciones de moldeo seleccionadas con los obtenidos en la etapa de composición de material (líneas entrecortadas de las figuras) se observa que para la composición 1 existe un incremento del 39% en el *Sflex* y del 37% en el *Ef*. Asimismo, para la composición 2 el incremento es del 4% para *Sflex* y existe un disminución del 11% en el valor del *Ef*.

Este aumento considerable en las propiedades a flexión, sobretodo de la composición 1, obedece a una mejor inclusión del PP en la fibra de abacá, denotado por una mayor presencia de fibras en su superficie. En la segunda etapa: composición del material, se había señalado que el compuesto presentaba una falta de inclusión del PP en la fibra de abacá, puesto que existía una mayor cantidad de fibra en su centro transversal y poca en su superficie. Mediante el aumento del tiempo y sobretodo de la presión de moldeo, se logró mejorar esta distribución de la fibra a lo largo de la sección transversal, y como las propiedades a flexión dependen básicamente de las propiedades superficiales del material, se ha logrado este aumento considerable en las propiedades a flexión del compuesto

Después de analizar los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas de la composición 2 en esta fase de moldeo, se decidió probar con una variación de la presión de moldeo diferente, pues fue de gran interés determinar qué sucede con el compuesto al someterlo a presiones de moldeo entre 1.18 y 1.77 MPa. Los resultados obtenidos se ilustran en la Tabla 4.14 y las Figuras 4.44 y 4.45, correspondientes a las propiedades de tracción y flexión.

Tabla 4.14. Resultados a tracción y flexión para compuestos de composición 2 (30%, 20 mm) moldeados con presiones entre 1.18 a 1.77 MPa y un tiempo de moldeo de 4 minutos.

| Condiciones | | | Tracción | | | Flexión | |
|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------|------------------|---------------|
| t_2 (min) | P_2 (MPa) | Fuerza (lbf) | ϵ (%) | $Smáx$ (MPa) | E (MPa) | $Sflex$ (MPa) | Ef (MPa) |
| 4 | 1.179 | 4000 | 5.75 ± | 30.05 ± | 1031.80 ± | 41.80 ± | 1457.25 ± |
| | | | 0.35 | 0.79 | 21.14 | 2.95 | 196.26 |
| 4 | 1.768 | 6000 | 4.86 ± | 24.38 ± | 923.56 ± | 36.10 ± | 1431.20 ± |
| | | | 0.45 | 0.71 | 40.60 | 0.84 | 44.85 |

Se observa claramente que tanto para el caso del E como para las propiedades a flexión, los valores máximos obtenidos siguen correspondiendo a una presión de moldeo de 1.473 MPa. En el caso del $Smáx$, se muestra un mayor valor al tener una presión de 1.179 MPa; sin embargo, la diferencia con el valor a 1.473 MPa es menor a la desviación. Por consiguiente, se ratifica que la mejor presión de moldeo para la composición 2 es de 1.473 MPa al igual que en la composición 1.

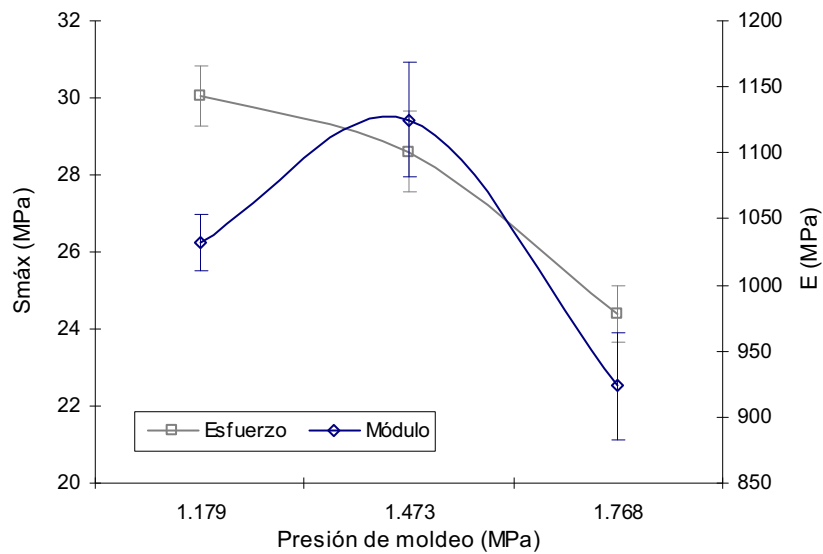


Figura 4.44. Esfuerzo y módulo a tracción de la composición 2 (30%, 20 mm) en función de la presión de moldeo y un tiempo de moldeo de 4 minutos.

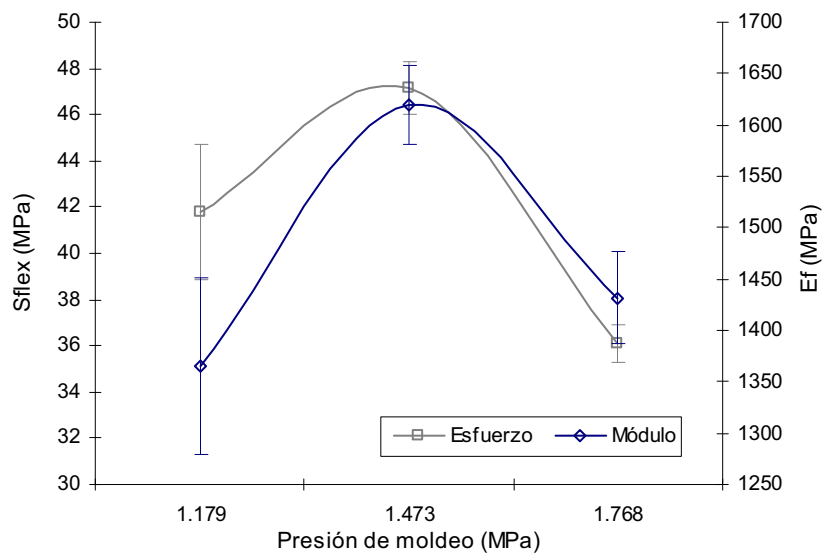


Figura 4.45. Esfuerzo y módulo a flexión de la composición 2 (30%, 20 mm) en función de la presión de moldeo y un tiempo de moldeo de 4 minutos.

A continuación, en la Tabla 4.15, se señalan los parámetros seleccionados para la fase de moldeo, parámetros que han otorgado la mejor combinación de propiedades mecánicas a los materiales compuestos PP/abacá. Adicionalmente, en la Tabla 4.16 se muestran las propiedades mecánicas obtenidas con el empleo de estas condiciones mejoradas de procesamiento.

Tabla 4.15. Condiciones de tiempo y presión mejoradas para la fase de moldeo en las composiciones estudiadas.

| Parámetro | Composición 1 (35%, 30 mm) | Composición 2 (30%, 20 mm) |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Temperatura (T_2) | 180 ± 5°C | 180 ± 5°C |
| Presión (P_2) (Fuerza, lbf) | 1.473 ± 0.03 MPa (5000 ± 100 lbf) | 1.473 ± 0.03 MPa (5000 ± 100 lbf) |
| Tiempo (t_2) | 4 minutos | 4 minutos |

Tabla 4.16. Propiedades mecánicas del compuesto a las condiciones mejoradas de moldeo.

| Composiciones | Tracción | | | Flexión | |
|---------------|----------------|-------------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) | S_{flex} (MPa) | E_f (MPa) |
| Composición 1 | 4.54 ± 0.2 | 28.24 ± 2.29 | 1095.80 ± 48.3 | 54.05 ± 1.38 | 2132.00 ± 213.91 |
| Composición 2 | 4.89 ± 0.17 | 28.60 ± 1.04 | 1125.20 ± 43.94 | 47.14 ± 1.13 | 1619.00 ± 38.71 |

Aun cuando los valores máximos de las propiedades mecánicas son muy similares entre ambas composiciones y, es más, se han obtenido con los mismos parámetros de moldeo, no se puede decir que su comportamiento es similar y que no importa la composición del material. Como se pudo observar en las figuras correspondientes, la diferencia en la composición del material ha otorgado diferentes respuestas y tendencia al cambio del tiempo y de la presión, cambios tanto a tracción como en flexión. Sin embargo, sí parecería ser que los parámetros de procesamiento pueden ser estandarizados, al menos para esta fase de moldeo, ya que los mejores resultados se presentaron para ambas composiciones con los mismos parámetros

En resumen, un mayor tiempo y presión de moldeo han permitido eliminar de mejor manera el aire que queda atrapado entre las placas de PP y la fibra (material tipo sánduche), y reducir la viscosidad del PP para lograr una mejor mojabilidad de la matriz en la fibra. Con esto se logra una serie de mejoras en el compuesto como la disminución de porosidades, aumento del anclaje mecánico, mejor inclusión del PP en la fibra de abacá, etc., tal como se ha dicho anteriormente.

4.3.2. FASE DE PRECALENTAMIENTO

Continuando con el estudio del procesamiento mediante moldeo por compresión, en este apartado se describen los resultados obtenidos al variar la presión (P_1) y el tiempo (t_1) de precalentamiento, manteniendo constante la temperatura de procesamiento en 180°C, según se especificó anteriormente. Los parámetros del moldeo se han fijado a los valores de la Tabla 4.15, mientras que los de enfriamiento se mantienen a 0 MPa, 10 min. y 0°C de temperatura inicial del agua.

El precalentamiento es el periodo en donde la carga alcanza la temperatura deseada de moldeo que facilita el flujo o impregnación de la matriz en la fibra durante su procesamiento, sin que exista una degradación de los componentes. El aumento de la presión de precalentamiento garantiza un mejor contacto de las placas calefactoras en las superficies del molde (disminución de la resistencia térmica), por este motivo se cree que el flujo de calor se ve aumentado y por ende la matriz polimérica se funde más rápido o lo que es lo mismo, necesita menor tiempo de precalentamiento (t_1). En consecuencia, lo que se busca al aumentar la presión de precalentamiento (P_1) es reducir el tiempo de precalentamiento (t_1), sin que las propiedades finales del compuesto se vean afectadas.

Para determinar estas condiciones de precalentamiento, se realizaron ensayos de tracción y de flexión para cada prueba. Los resultados correspondientes a las pruebas de tracción, se muestran en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17. Porcentaje de deformación, esfuerzo máximo y módulo a tracción, obtenidos por la variación de los tiempos y presiones de precalentamiento, para ambas composiciones.

| | | Presión P_1 (MPa) | Tiempo t_1 (min) | |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|-----------------|
| | | | 5 | 10 |
| Composición 1 (35%, 30 mm) | ϵ (%) | 0 | 4.45 ± 0.07 | 4.54 ± 0.26 |
| | | 0.884 | 4.56 ± 0.17 | 4.57 ± 0.40 |
| | | 1.473 | 5.12 ± 0.08 | 4.34 ± 0.25 |
| | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | 0 | 28.26 ± 1.20 | 28.24 ± 2.29 |
| | | 0.884 | 28.39 ± 1.17 | 29.55 ± 1.26 |
| | | 1.473 | 30.44 ± 1.52 | 32.00 ± 2.21 |
| | E (MPa) | 0 | 988.98 ± 49.86 | 1095.80 ± 48.32 |
| | | 0.884 | 1052.60 ± 22.13 | 977.90 ± 85.49 |
| | | 1.473 | 1184.80 ± 43.79 | 1183.00 ± 25.06 |

| | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|-------|----------------|-----------------|
| Composición 2 (30%, 20 mm) | ϵ (%) | 0 | 6.02 ± 0.36 | 4.89 ± 0.17 |
| | | 0.884 | 5.32 ± 0.30 | 5.75 ± 0.20 |
| | | 1.473 | 5.05 ± 0.34 | 4.93 ± 0.29 |
| | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | 0 | 29.03 ± 0.50 | 28.60 ± 1.04 |
| | | 0.884 | 27.14 ± 1.86 | 31.93 ± 0.71 |
| | | 1.473 | 29.75 ± 0.92 | 29.28 ± 2.64 |
| | E (MPa) | 0 | 905.68 ± 25.68 | 1125.20 ± 43.94 |
| | | 0.884 | 893.58 ± 75.82 | 1039.74 ± 28.11 |
| | | 1.473 | 955.66 ± 21.60 | 1148.80 ± 49.85 |

Los resultados correspondientes a las pruebas de flexión se muestran en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Esfuerzo y módulo a flexión de los compuestos, obtenidos por la variación de los tiempos y presiones de precalentamiento, para ambas composiciones.

| | | Presión P_1 (MPa) | Tiempo t_1 (min) | |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|------------------|
| | | | 5 | 10 |
| Composición 1 (35%, 30 mm) | $S_{flex@5\%}$ (MPa) | 0 | 42.96 ± 4.17 | 54.05 ± 1.38 |
| | | 0.884 | 42.66 ± 2.21 | 49.91 ± 1.97 |
| | | 1.473 | 49.72 ± 0.83 | 56.75 ± 2.15 |
| | E_f (MPa) | 0 | 1619.20 ± 104.48 | 2132.00 ± 213.91 |
| | | 0.884 | 1645.80 ± 71.84 | 1864.20 ± 154.55 |
| | | 1.473 | 1467.00 ± 78.62 | 1889.40 ± 217.87 |
| Composición 2 (30%, 20 mm) | $S_{flex@5\%}$ (MPa) | 0 | 49.94 ± 2.13 | 47.14 ± 1.13 |
| | | 0.884 | 45.07 ± 3.03 | 46.03 ± 2.11 |
| | | 1.473 | 48.96 ± 1.46 | 51.72 ± 1.58 |
| | E_f (MPa) | 0 | 1600.00 ± 79.50 | 1619.00 ± 38.71 |
| | | 0.884 | 1707.80 ± 41.05 | 1864.00 ± 9.06 |
| | | 1.473 | 1969.80 ± 89.09 | 1744.20 ± 155.33 |

De manera general, se observa que el aumento de la presión de precalentamiento (P_1) permite reducir el tiempo de precalentamiento (t_1), sin que exista una disminución o pérdida en las propiedades mecánicas de los compuestos. Es más, se observa un incremento en los valores de las propiedades a tracción, al aumentar P_1 de 0 MPa a 1.473 MPa aun cuando el t_1 se disminuye a la mitad de lo que se ha venido utilizando previamente en las fases anteriores. Mismo caso para las propiedades a flexión, principalmente de la composición 2.

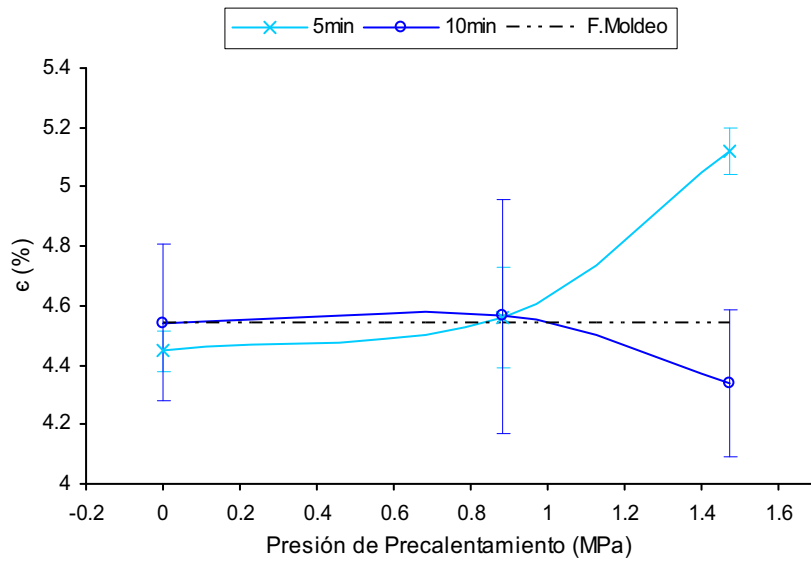
En base a los resultados obtenidos, un t_1 de 5 minutos y una P_1 de 1.473 MPa se recomiendan para el precalentamiento del material en su composición 1. A estas

condiciones, las propiedades a la tracción del compuesto se mantienen e inclusive son superiores a las alcanzadas previamente en la fase de moldeo con un t_1 de 10 minutos. Sin embargo, estas condiciones afectan las propiedades a flexión, llegando a disminuir la mejoría que se obtuvo luego de la fase de moldeo. Aun así, se recomienda este tiempo de 5 minutos principalmente porque representa una reducción considerable del tiempo de procesamiento y por ende un ahorro de la energía y costo involucrado en el proceso.

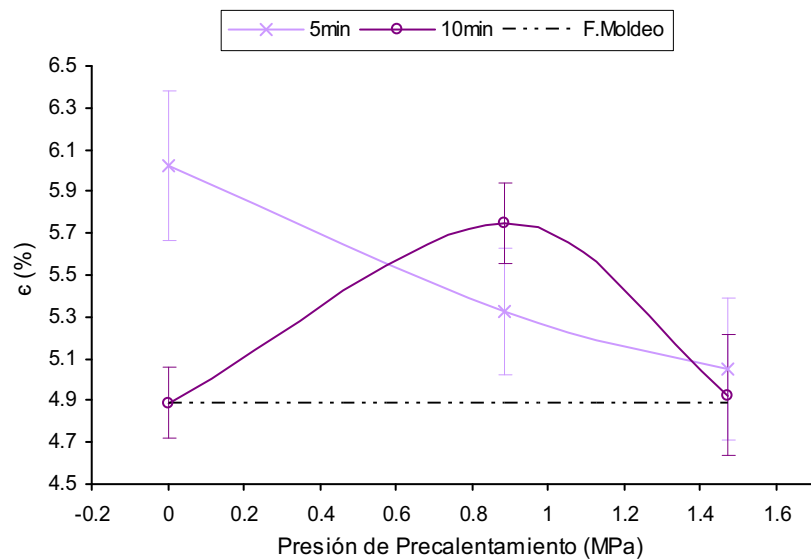
En cuanto a la composición 2, se recomienda mantener el t_1 en 10 minutos, puesto que si se reduce a 5 minutos, se provoca una disminución del módulo a tracción en alrededor del 20% del valor alcanzado en la fase de moldeo. Esta disminución posiblemente se deba a una mala distribución de las fibras en el compuesto, provocado por una falta de fusión de la matriz PP, y que sin importar que tanto se aumente la presión de enfriamiento no se ve mejorada. Por otro lado, para la composición 2 se recomienda una P_1 de 0.884 MPa, ya que en general permite mejorar las propiedades a tracción y a flexión del compuesto. En particular, esta presión permite aumentar la resistencia a la tracción, alcanzando un valor por encima de la resistencia de la matriz PP (31.62 MPa); es decir, un posible reforzamiento en la matriz.

4.3.2.1. Propiedades a tracción

Las condiciones de precalentamiento establecidas permiten mejorar la deformación unitaria a esfuerzo máximo del compuesto, tal como se muestra en las Figuras 4.46 (a) y (b). Para la composición 1, se tiene un valor de alrededor de 0.0512 mm/mm, mientras que para la composición 2 de 0.0575 mm/mm. Estos valores representan un aumento del 13% y 17.6% en relación a los valores obtenidos con la mejora de las condiciones en la fase de moldeo para cada composición, respectivamente. Estos valores se ilustran en las figuras con línea entrecortada.



(a)



(b)

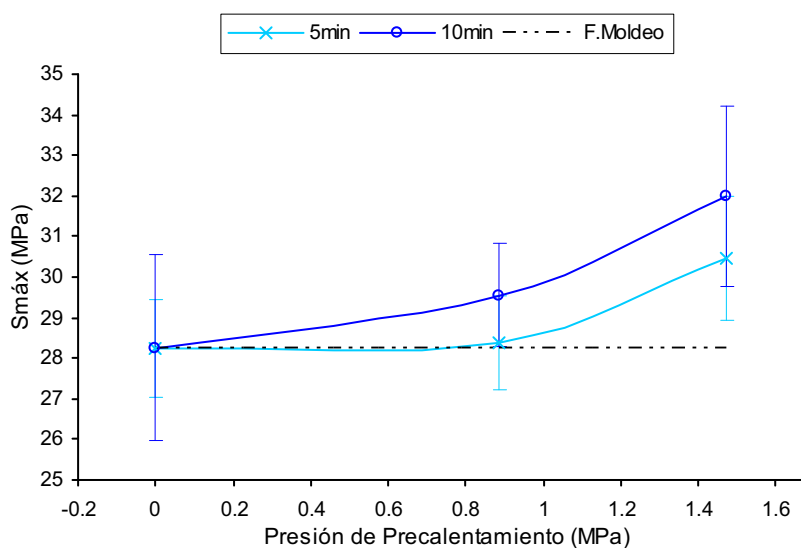
Figura 4.46. Porcentaje de deformación del compuesto, en función del cambio de tiempo y presión de precalentamiento: (a) Composición 1 (35%, 30 mm), (b) Composición 2 (30%, 20 mm).

Aun cuando las condiciones de precalentamiento seleccionadas mejoraron la ductilidad del material, las demás propiedades a la tracción no se ven disminuidas. Es más, con excepción del módulo en la composición 2, se registran valores mayores en comparación con los obtenidos en la fase de moldeo.

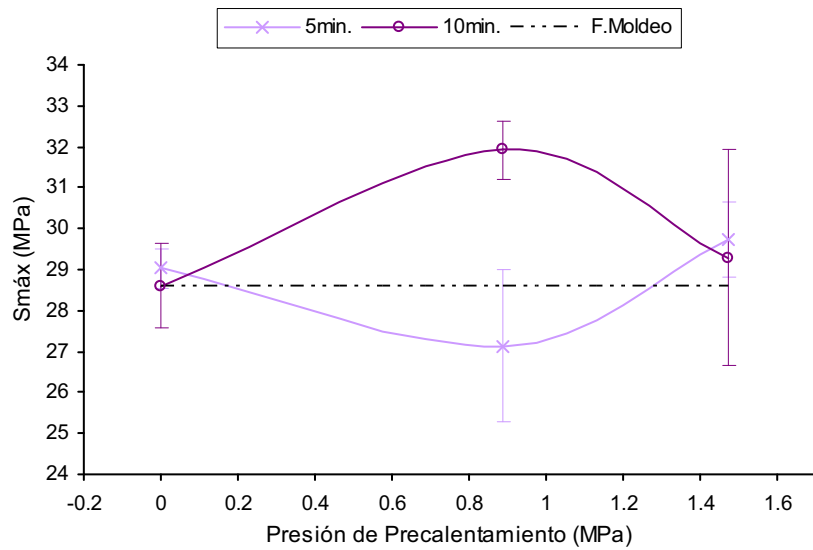
A estas condiciones de precalentamiento (composición 1: $P_1 = 1.473$ MPa, $t_1 = 5$ min.; composición 2: $P_1 = 0.884$ MPa, $t_1 = 10$ min.) se obtienen valores promedios de $Smáx$ de 30.44 MPa para la composición 1, y de 31.93 MPa para la composición 2, tal como se observa en las Figuras 4.47 (a) y (b), respectivamente. Se puede observar una semejanza de estos valores con el de la resistencia de la matriz PP (31.62 MPa), indicando que aunque no se obtiene un reforzamiento evidente en el compuesto, al menos la fibra ya no está reduciendo la resistencia de la matriz.

En cuanto al módulo a tracción, se tiene un valor de 1184.8 MPa en la composición 1, Figura 4.48 (a), y de 1039.7 MPa en la composición 2, Figura 4.48 (b). Para la composición 1 esto implicaría un aumento del 8%, mientras que para la composición 2 una disminución del 7.6% en relación al obtenido en la fase de moldeo.

Para la composición 2 no se elige un t_1 de 5 minutos puesto que esto conllevaría a una disminución del 20% en el valor del módulo a tracción, tal como se dijo anteriormente. Esta disminución se puede observar claramente en la Figura 4.48 (b). Por la importancia de un reforzamiento en la rigidez del material se ha decidido mantener un t_1 de 10 minutos, aun cuando esto implique un ciclo más largo de procesamiento.

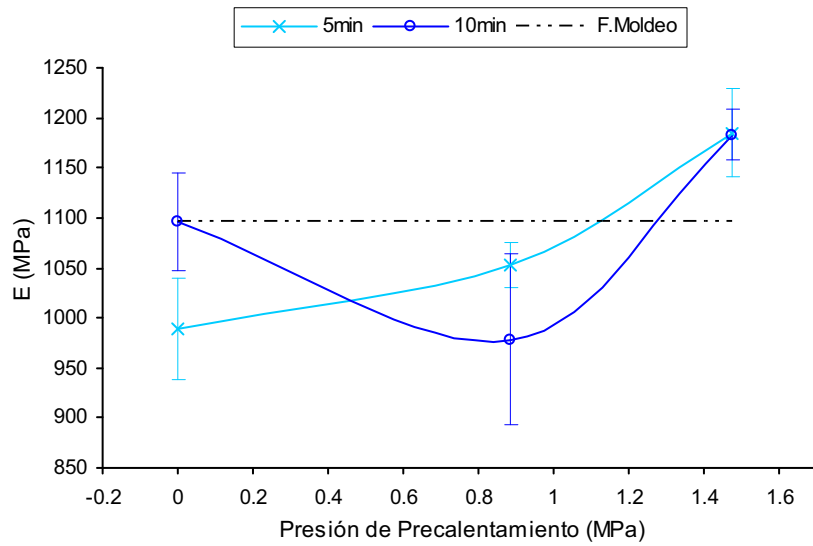


(a)



(b)

Figura 4.47. Esfuerzo máximo a tracción del compuesto en función del cambio de tiempo y presión de precalentamiento: (a) Composición 1 (35%, 30 mm), (b) Composición 2 (30%, 20 mm).



(a)

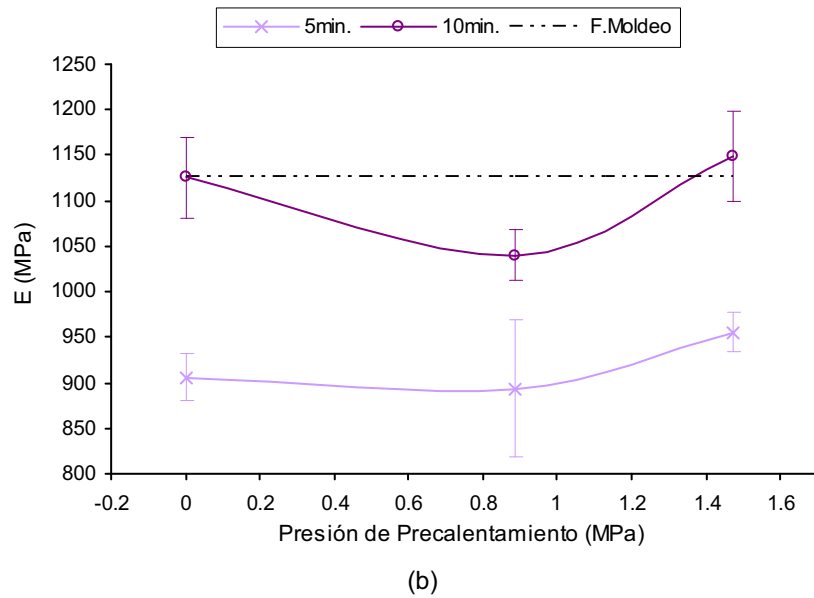
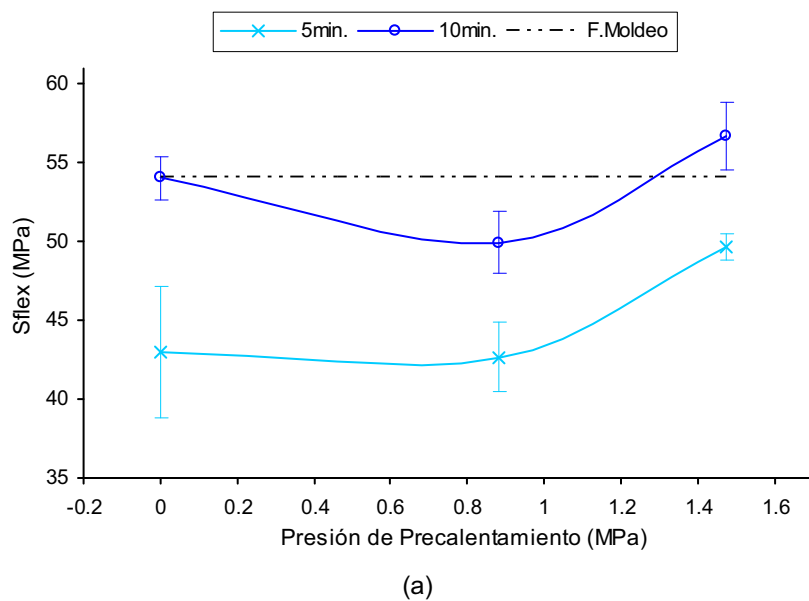


Figura 4.48. Módulo a tração do composto em função do tempo e pressão de preaquecimento: (a) Composição 1 (35%, 30 mm), (b) Composição 2 (30%, 20 mm).

4.3.2.2. Propriedades a flexión

En las Figuras 4.49 (a) y (b), se ilustran las propiedades a flexión de la composición 1 (35%, 30 mm), obtenidas al variar el tiempo (t_1) y la presión (P_1) de preaquecimento.



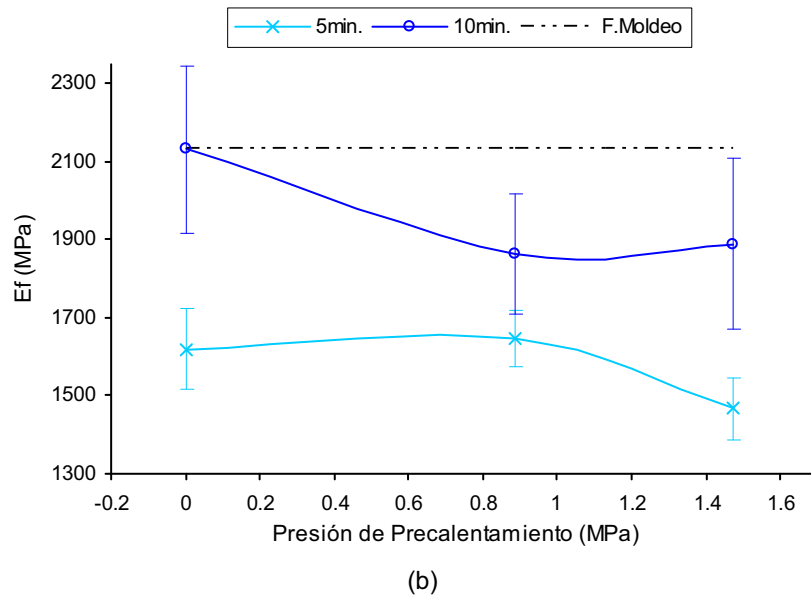
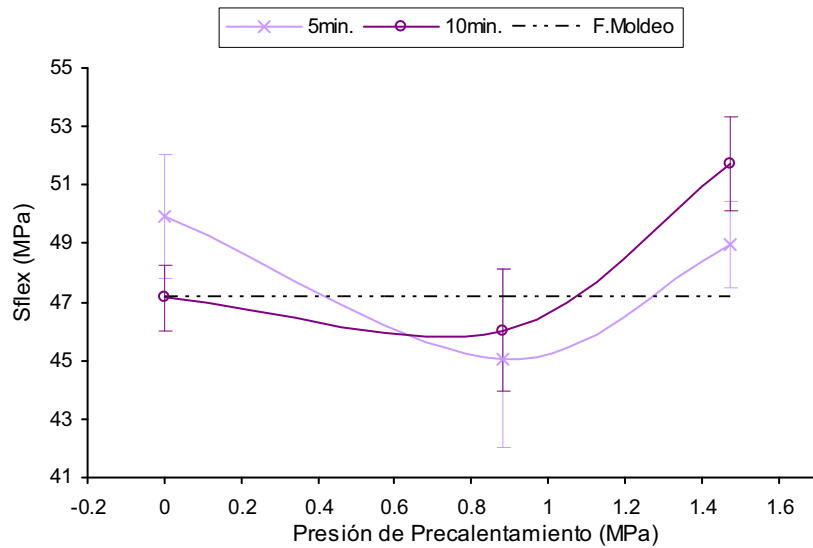


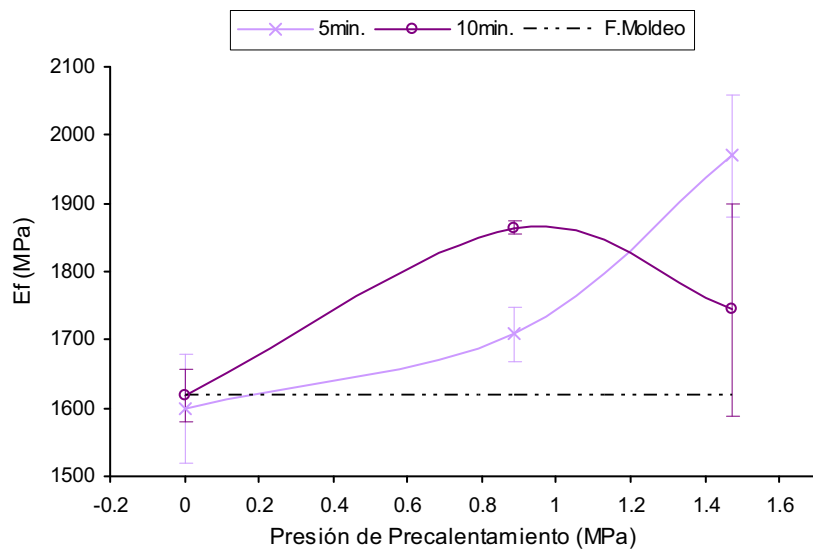
Figura 4.49. Esfuerzo a flexión de la composición 1 en función del cambio de tiempo y presión de pre calentamiento: (a) Esfuerzo máximo a flexión, (b) Módulo a flexión.

Con un t_1 de 5 minutos y P_1 de 1.473 MPa, condiciones recomendadas para el pre calentamiento de la composición 1, se presenta una disminución considerable en las propiedades de flexión con relación a los valores obtenidos luego de la fase de moldeo (línea entrecortada de las figuras), lo que conllevaría a reconsiderar estos parámetros. Sin embargo, según se observó en las figuras citadas, con un t_1 de 10 minutos también se tiene, aunque en menor grado, una disminución en las propiedades a flexión, sobretodo del módulo a flexión. Debido a esto y a las ventajas que representa una disminución del ciclo de procesamiento, se decide mantener el t_1 de 5 minutos.

En las Figuras 4.50 (a) y (b) se presentan los valores de esfuerzo y módulos a flexión para la composición 2, obtenidos mediante la variación del tiempo y presión de pre calentamiento.



(a)



(b)

Figura 4.50. Módulo a flexión de la composición 2 en función del cambio de tiempo y presión de precalentamiento: (a) Esfuerzo máximo a flexión, (b) Módulo a flexión.

Por las mejoras presentadas en los resultados de las propiedades a flexión para la composición 2, sería conveniente reducir el t_1 a 5 minutos y aumentar P_1 a 1.473 MPa. Sin embargo, se decidió no utilizar estas condiciones, ya que un t_1 de 5 minutos reduce considerablemente las propiedades a tracción, en especial el módulo. Adicionalmente, con las condiciones recomendadas anteriormente, P_1 de 0.884 MPa por un t_1 10 minutos, se mantiene el valor del S_{flex} y aumenta el E_f en un 15% con relación al valor promedio obtenido luego de la fase de moldeo

(líneas entrecortadas), cumpliéndose de esta manera los objetivos previstos para esta fase de precalentamiento.

La variación de las condiciones de precalentamiento provocan un ligero incremento en las propiedades a flexión del material, en comparación con el aumento obtenido luego de mejorar las condiciones de moldeo. Posiblemente se deba a que estas propiedades a flexión son una consecuencia de las propiedades de la superficie de las probetas, efecto que más bien se ve mejorado al aumentar la presión de moldeo, como se mencionó anteriormente.

A continuación, en la Tabla 4.19, se indican los parámetros recomendados para la fase de precalentamiento, parámetros que han otorgado la mejor combinación de propiedades mecánicas a los materiales compuestos PP/abacá. En la Tabla 4.20, se ilustran las propiedades mecánicas alcanzadas mediante la mejora de las condiciones de enfriamiento (tiempo y presión).

Tabla 4.19. Condiciones óptimas de tiempo, y presión para la fase de precalentamiento o en las composiciones estudiadas.

| Parámetro | Composición 1 | Composición 2 |
|-------------------------------|--|--|
| Temperatura (T_1) | $180 \pm 5^\circ\text{C}$ | $180 \pm 5^\circ\text{C}$ |
| Presión (P_1) (Fuerza) | $1.473 \pm 0.03 \text{ MPa}$ ($5000 \pm 100 \text{ lbf}$) | $0.884 \pm 0.03 \text{ MPa}$ ($3000 \pm 100 \text{ lbf}$) |
| Tiempo (t_1) | 5 minutos | 10 minutos |

Tabla 4.20. Propiedades mecánicas del compuesto a las condiciones mejoradas de precalentamiento.

| Condiciones | Tracción | | | Flexión | |
|---------------|-----------------|------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| | ϵ (%) | $S_{\text{máx}}$ (MPa) | E (MPa) | S_{flex} (MPa) | E_f (MPa) |
| Composición 1 | 5.12 ± 0.08 | 30.44 ± 1.52 | 1184.80 ± 43.79 | 49.72 ± 0.83 | 1467.00 ± 78.62 |
| Composición 2 | 5.75 ± 0.20 | 31.93 ± 0.71 | 1039.74 ± 28.11 | 46.03 ± 2.11 | 1864.00 ± 9.06 |

Para la composición 1, se ha logrado reducir el tiempo de precalentamiento a 5 minutos, manteniendo las propiedades mecánicas del material. Es más, se ha mejorado las propiedades a tracción, aun cuando esto implica el aumentar la presión de precalentamiento a un valor igual al de la presión de moldeo (1.473 MPa).

Para la composición 2, los parámetros seleccionados de precalentamiento son P_1 de 0.884 MPa, durante un t_1 de 10 minutos. Por la importancia de un reforzamiento en la rigidez del material, se decidió mantener un t_1 de 10 minutos, aun cuando esto significa un ciclo largo de procesamiento. Sin embargo, si se desea más bien reducir el tiempo del procesamiento, sin que importe la rigidez del material, es recomendable utilizar un t_1 de 5 minutos a una P_1 de 1.473 MPa, similar a los parámetros de la composición 1.

Cabe recordar y tomar en cuenta que en el tiempo de precalentamiento está involucrado un tiempo de entre 3 y 4 minutos, en el cual, el molde metálico se precalienta a la temperatura deseada (180°C). Este estimado se basa en la medición del tiempo en el cual las temperaturas de las planchas calefactoras se estabilizan.

4.3.3. FASE DE ENFRIAMIENTO

Según los resultados que se obtuvieron en la primera etapa: procesabilidad de la matriz, apartado 4.1, se decidió fijar el tiempo de enfriamiento (t_3) en 10 minutos, y la temperatura inicial del agua (T_3) a $0 \pm 2^\circ\text{C}$. Por esto, en esta fase solamente se ha estudiado el efecto que tiene la aplicación y el aumento de la presión (P_3). Para las condiciones de las demás fases del moldeo por compresión se emplearon los parámetros mejorados anteriormente. La Tabla 3.14 muestra los parámetros utilizados para cada prueba.

Los resultados obtenidos en cuanto a las propiedades a tracción de las pruebas realizadas se detallan en la Tabla 4.21. Mientras que, en la Tabla 4.22 se detallan los resultados obtenidos en cuanto a los ensayos de flexión.

Tabla 4.21. Porcentaje de deformación, esfuerzo máximo y módulo a tracción de los compuestos obtenidos por la variación de la presión de enfriamiento en las dos composiciones estudiadas.

| Composición | Presión P_3 (MPa) | Propiedades a Tracción | | |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| | | ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) |
| Composición 1 (35%, 30 mm) | 0 | 5.12 ± 0.08 | 30.44 ± 1.52 | 1184.80 ± 43.79 |
| | 0.736 | 5.61 ± 0.34 | 40.12 ± 2.63 | 1295.60 ± 48.87 |
| | 1.473 | 5.27 ± 0.31 | 37.31 ± 1.81 | 1173.40 ± 69.81 |

| | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------|--------------|-----------------|
| Composición 2 (30%, 20 mm) | 0 | 5.75 ± 0.20 | 31.93 ± 0.71 | 1039.74 ± 28.11 |
| | 0.736 | 4.88 ± 0.19 | 32.51 ± 1.48 | 1153.60 ± 69.58 |
| | 1.473 | 5.84 ± 0.22 | 35.51 ± 0.74 | 1057.20 ± 59.18 |

Tabla 4.22. Esfuerzo y módulo a flexión de los compuestos obtenidos por la variación de la presión de enfriamiento en las dos composiciones estudiadas.

| Composición | Presión P_3 (MPa) | Propiedades a Flexión | |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------|
| | | $S_{flex@5\%}$ (MPa) | E_f (MPa) |
| Composición 1 (35%, 30 mm) | 0 | 49.72 ± 0.83 | 1467.00 ± 78.62 |
| | 0.736 | 50.23 ± 1.40 | 1897.20 ± 49.34 |
| | 1.473 | 58.23 ± 2.80 | 1874.20 ± 79.47 |
| Composición 2 (30%, 20 mm) | 0 | 46.03 ± 2.11 | 1864.00 ± 9.06 |
| | 0.736 | 46.03 ± 2.11 | 1728.40 ± 142.65 |
| | 1.473 | 47.45 ± 1.00 | 1991.40 ± 103.94 |

Se evidencia que el aumento de la presión en la fase de enfriamiento (P_3), provoca una mejora considerable en las propiedades mecánicas del compuesto, sobretodo en lo que refiere a las propiedades a tracción.

Considerando que el anclaje mecánico surge de la constricción (apretujamiento) de la matriz sobre las fibras cuando el termoplástico se enfría luego de su procesamiento, se cree que el aplicar y mantener una presión de enfriamiento ayuda a generar un anclaje más efectivo, y por ende a mejorar las propiedades del material. Adicionalmente, esta mejora se debe a que una P_3 mayor logra eliminar la mayor presencia de porosidades (concentradores de esfuerzo) que se generaban por la inclusión de aire luego de retirada la presión de moldeo (P_2). En las Figuras 4.51 (a) y (b) se muestran imágenes al microscopio del material.

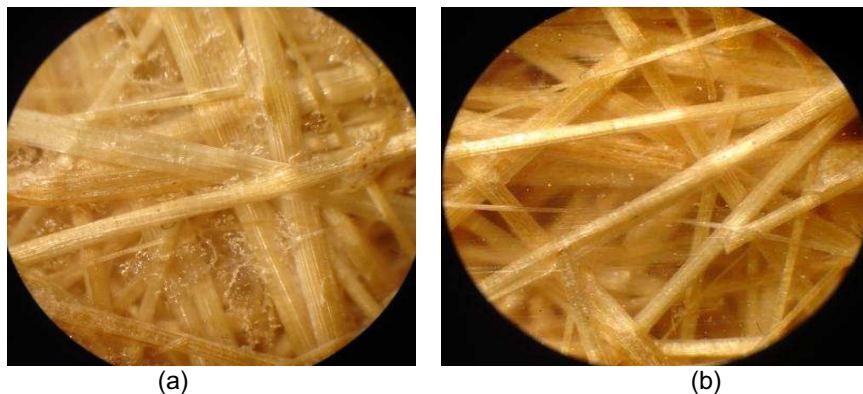


Figura 4.51. Observación al microscopio de las placas obtenidas: (a) sin, (b) con presión en la fase de enfriamiento.

4.3.3.1. Propiedades a tracción

La Figura 4.52 muestra un aumento en la deformación al esfuerzo máximo de la composición 1. Se alcanza un pico de 0.0561 mm/mm con una P_3 de 0.736 MPa para luego permanecer prácticamente constante. Resultado contrario a lo que se observa en la composición 2, en donde a partir de un valor inicial, la deformación decrece en un 17.83% para P_3 de 0.736 MPa y luego aumenta hasta un valor máximo de 0.0584 mm/mm con una P_3 de 1.473 MPa. La similitud en los valores obtenidos para ambas composiciones denota que la máxima deformación del compuesto estaría en el orden de los 0.057 mm/mm, resultado que se confirma con los máximos obtenidos en las fases anteriores.

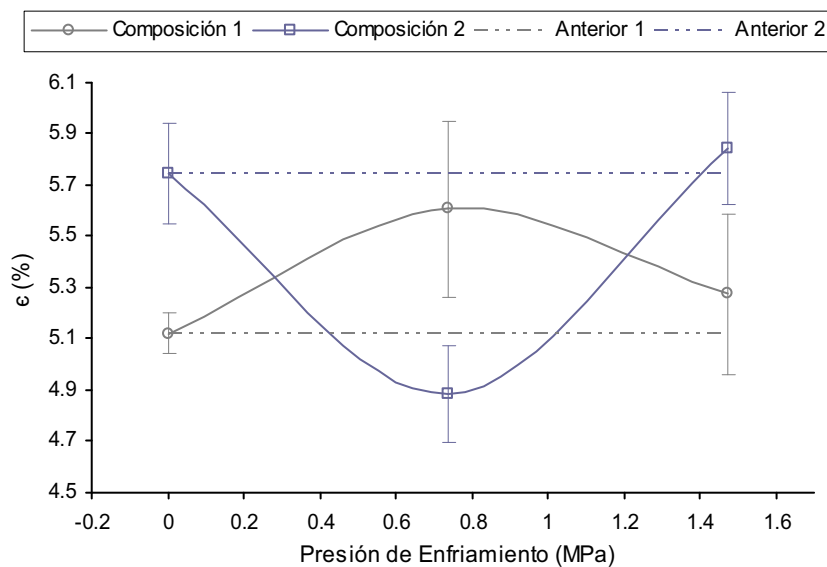


Figura 4.52. Porcentaje de deformación unitaria a carga máxima de tracción en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones.

Si bien estos valores de deformación son deseables, ya que confieren cierto grado de ductilidad en el material, es conveniente confrontarlos con los valores obtenidos en cuanto al refuerzo máximo a tracción en el material y a la rigidez del mismo expresada por su módulo. En la Figura 4.53 se muestran los valores del esfuerzo máximo a tracción obtenidos al cambiar la P_3 , en ambas composiciones, mientras que en la Figura 4.54 se presentan los valores del módulo a tracción.

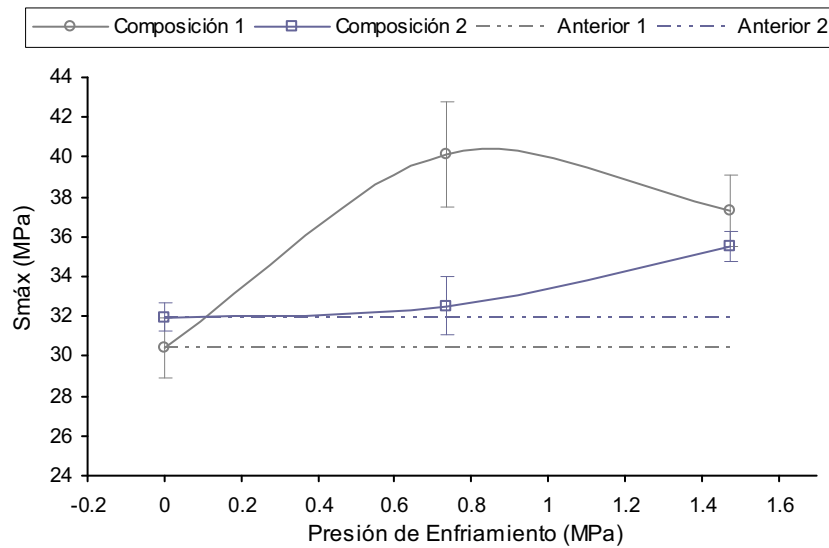


Figura 4.53. Esfuerzo máximo de tracción en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones.

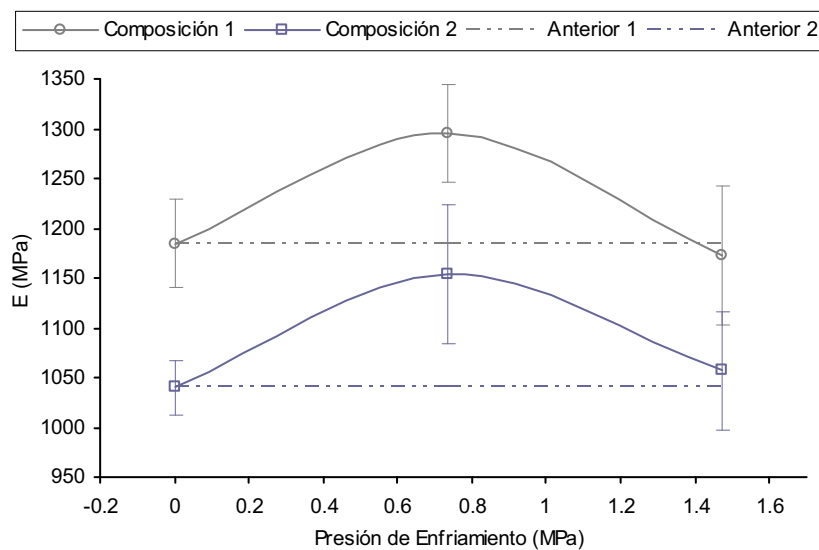


Figura 4.54. Módulo a tracción en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones.

El máximo esfuerzo en la composición 1 (40.12 MPa) se obtiene al aplicar una P_3 de 0.736 MPa; en la composición 2, el esfuerzo a tracción aumenta conforme aumenta la presión de enfriamiento (P_3) hasta un máximo de 35.51 MPa con una P_3 de 1.473 MPa. Estos valores representan un incremento del 41.8% y 11.2%, respectivamente, en relación a los valores obtenidos luego de mejorar las condiciones de precalentamiento y moldeo (líneas entrecortadas de las figuras).

De igual manera, en la Figura 4.54, se observa un incremento significativo en cuanto a los módulos a tracción, llegándose a valores máximos de 1295.6 MPa, para la composición 1, y de 1153.6 MPa, para la composición 2, con una P_3 en ambos casos de 0.736 MPa.

Según los resultados exhibidos, se recomienda aplicar una presión P_3 de 0.746 MPa durante el enfriamiento de la composición 1, y una P_3 de 1.473 MPa para la composición 2.

4.3.3.2. Propiedades a flexión

En cuanto a las propiedades a flexión, en la Figura 4.55 se muestra el esfuerzo máximo de flexión, que para la composición 1 toma un valor máximo de 58.23 MPa y para la composición 2 de 55.91 MPa, obtenidos en ambos casos con una P_3 de 1.473 MPa.

El módulo a flexión, Figura 4.56, no muestra una mejora con el aumento de la presión de enfriamiento, es más se observa que para la composición 2, el valor disminuye. Posiblemente, debido a que las características de las superficies (propiedades de flexión) de las placas no mejoraron desde la etapa de moldeo en la que se obtuvo una mejor inclusión del PP en la fibra de abacá y por ende una buena distribución de las fibras a lo largo del espesor del compuesto

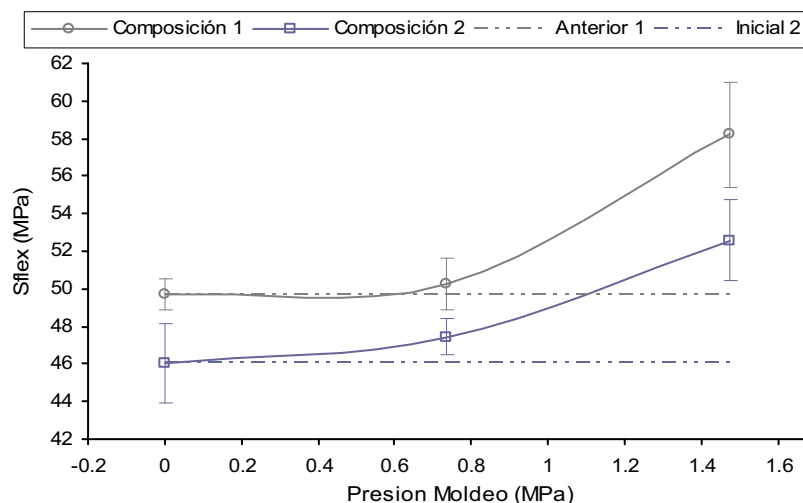


Figura 4.55. Esfuerzo a flexión en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones.

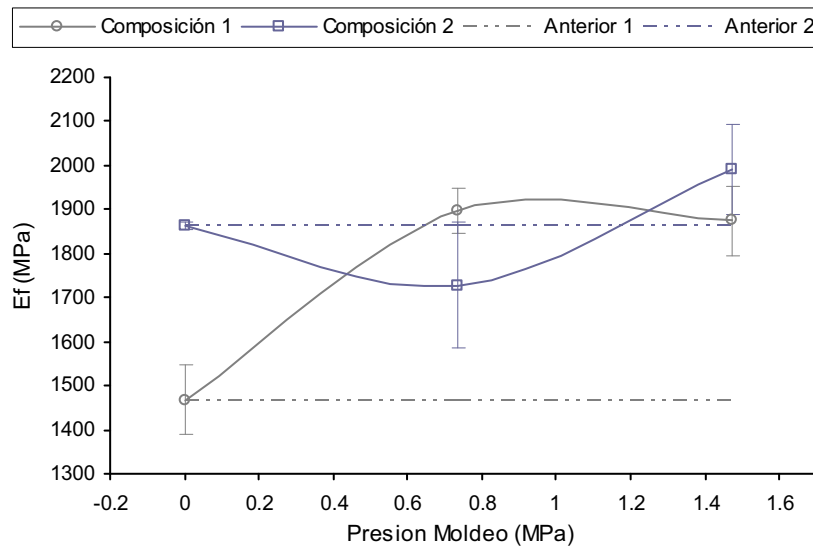


Figura 4.56. Módulo a flexión en función de la presión de enfriamiento para ambas composiciones.

Basándose en los resultados de las propiedades a flexión, se confirma que las presiones de enfriamiento recomendadas (0.736 MPa para la composición 1, y 1.473 MPa para la composición 2) otorgan la mejor combinación de propiedades mecánicas en el material compuesto PP/abacá.

La Tabla 4.23 muestra los parámetros mejorados para todas las fases del moldeo por compresión, en función de las dos composiciones estudiadas (composición 1: 35%, 30 mm; composición 2: 30%, 20 mm).

Tabla 4.23. Condiciones mejoradas del moldeo por compresión para el conformado de materiales compuesto PP/abacá, en las dos composiciones estudiadas.

| Fase / Parámetro | Precalentamiento | | Moldeo | | Enfriamiento | |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Comp. 1 | Comp. 2 | Comp. 1 | Comp. 2 | Comp. 1 | Comp. 2 |
| Temperatura (°C) | 180 ± 5 | 180 ± 5 | 180 ± 5 | 180 ± 5 | 0 ± 2 | 0 ± 2 |
| Presión (MPa) ± 0.03 (100 lbf) | 1.473 (5000 lbf) | 0.882 (3000 lbf) | 1.473 (5000 lbf) | 1.473 (5000 lbf) | 0.736 (2500 lbf) | 1.473 (5000 lbf) |
| Tiempo (min.) | 5 | 10 | 4 | 4 | 10* | 10* |

* Tiempo necesario para que el molde alcance temperaturas que permitan su manipuleo. Se estima que el tiempo verdadero de solidificación del material es de alrededor de los 3 minutos.

En la Tabla 4.24 se ilustran las propiedades mecánicas obtenidas luego de la mejora en las condiciones de procesamiento, en comparación con sus valores previos, obtenidos en la segunda etapa: composición del material compuesto.

Tabla 4.24. Propiedades mecánicas finales del compuesto a las condiciones mejoradas del procesamiento, comparadas con sus correspondientes de la etapa de composición del material.

| | Etapa | Propiedades a la Tracción | | | Propiedades a la Flexión | |
|---------|----------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | | ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) | S_{flex} (MPa) | E_f (MPa) |
| Comp. 1 | Tercera | 5.61 ± 0.34 | 40.12 ± 2.63 | 1295.60 ± 48.87 | 50.23 ± 1.40 | 1897.20 ± 49.34 |
| | Segunda | 3.90 ± 0.28 | 23.99 ± 2.20 | 979.10 ± 47.16 | 38.75 ± 2.29 | 1552.80 ± 106.83 |
| | Variación | 43.8% | 67.2% | 32.3% | 29.6% | 22.2% |
| Comp. 2 | Tercera | 5.84 ± 0.22 | 35.51 ± 0.74 | 1057.20 ± 59.18 | 47.45 ± 1.00 | 1991.40 ± 103.94 |
| | Segunda | 5.29 ± 0.22 | 25.26 ± 0.72 | 863.42 ± 13.67 | 40.08 ± 2.58 | 1705.20 ± 286.84 |
| | Variación | 10.4% | 40.6% | 22.4% | 18.4% | 16.8% |
| | Matriz PP | 15.52 ± 1.52 | 31.62 ± 0.39 | 548.65 ± 6.68 | 37.50 ± 0.83 | 1249.60 ± 107.38 |

Etapa Segunda: Propiedades mecánicas luego de mejorada la composición del material

Etapa Tercera: Propiedades mecánicas luego de mejorado los parámetros de procesamiento

Una mejor inclusión del PP en la fibra de abacá, la buena re-distribución y re-orientación de las fibras debido a una pérdida de viscosidad del PP, la disminución de las porosidades presentadas en los compuestos, y sobretodo la mejora en la humectabilidad del PP en la fibra, han permitido incrementar considerablemente las propiedades mecánicas a tracción de los materiales PP/abacá. Este incremento permite alcanzar valores superiores a los presentados por la matriz PP, obteniendo así un reforzamiento en la matriz.

De igual manera, la variación de los parámetros de procesamiento por moldeo por compresión permite mejorar las propiedades a flexión. El mayor incremento se obtuvo en la fase de moldeo, en donde al aumentar la presión, se logró mejorar la distribución de los componentes (fibra y matriz) a lo largo de la sección transversal de la placa, obteniendo así mayor cantidad de fibra en la superficie del compuesto y por ende mejorar las propiedades a flexión del compuesto. En definitiva, el cambio en los parámetros de procesamiento y una mejor selección de los mismos en base a los resultados presentados en cada fase, ha permitido mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos PP/abacá, en las dos composiciones estudiadas.

4.4. CARACTERIZACIÓN FINAL DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Como parte final, los parámetros de procesamiento mejorados en función de las propiedades mecánicas obtenidas se utilizaron para la fabricación de compuestos con fibra modificada, fibra continua y otras composiciones de fibra discontinua y orientada al azar. Se realizó un estudio del comportamiento de los distintos compuestos mediante la curva esfuerzo vs. deformación obtenida del ensayo a tracción. Además se determinaron propiedades físicas tales como dureza, densidad y absorción de agua. Finalmente se realizó una última comparación entre las distintas composiciones del material PP/abacá obtenidas, y se compararon con los resultados de otros trabajos similares.

4.4.1. RESULTADOS DE LOS COMPUESTOS DE DIFERENTE COMPOSICIÓN

Con las condiciones de procesamiento mejoradas para la composición 1 (35% y 30 mm) y composición 2 (30%, 20 mm), se amplió el número de probetas para los ensayos de tracción y de flexión, tal como se especificó en el apartado 3.4.4, para así obtener un valor más certero de la desviación estandar. Los resultados a tracción para estas composiciones se ilustran en la Tabla 4.25, y en la Tabla 4.26 se describen los resultados a flexión.

Tabla 4.25. Propiedades a la tracción de las composiciones 1 y 2, con una muestra de tamaño 10 (el valor entre paréntesis representa el valor previo al aumento de las muestras).

| Probeta | Composición 1 | | | Composición 2 | | |
|---------|----------------|--------------|-----------|----------------|--------------|-----------|
| | ϵ (%) | $Smáx$ (MPa) | E (MPa) | ϵ (%) | $Smáx$ (MPa) | E (MPa) |
| 1 | 5.60 | 41.32 | 1299 | 6.00 | 35.51 | 1104 |
| 2 | 4.76 | 38.24 | 1354 | 5.20 | 34.29 | 1010 |
| 3 | 5.07 | 40.52 | 1223 | 5.60 | 36.06 | 1035 |
| 4 | 5.60 | 36.92 | 1281 | 5.49 | 35.13 | 1196 |
| 5 | 4.80 | 38.06 | 1321 | 6.00 | 35.55 | 1002 |
| 6 | 4.80 | 33.44 | 1287 | 6.00 | 36.16 | 1135 |
| 7 | 4.80 | 32.79 | 1251 | 5.60 | 30.61 | 1103 |

| | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 8 | 5.20 | 39.13 | 1229 | 5.60 | 39.28 | 1244 |
| 9 | 5.20 | 38.51 | 1294 | 5.20 | 31.37 | 1186 |
| 10 | 4.49 | 34.11 | 1239 | 4.80 | 38.76 | 1103 |
| Media | 5.03 (5.61) | 37.30 (40.12) | 1278 (1296) | 5.55 (5.84) | 35.27 (35.51) | 1112 (1057) |
| Desv. Est. | 0.369 | 2.95 | 42.3 | 0.398 | 2.74 | 81.1 |

Tabla 4.26. Propiedades a la flexión de las composiciones 1 y 2, con una muestra de tamaño 10 (el valor entre paréntesis representa el valor previo al aumento de las muestras).

| | Composición 1 | | Composición 2 | |
|----------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5%</i> (MPa) | <i>Ef</i> (MPa) | <i>Sflex@5%</i> (MPa) | <i>Ef</i> (MPa) |
| 1 | 48.30 | 1825 | 53.41 | 1546 |
| 2 | 58.34 | 1925 | 56.55 | 1883 |
| 3 | 51.38 | 1870 | 55.26 | 1945 |
| 4 | 50.06 | 1948 | 54.26 | 1605 |
| 5 | 55.03 | 1918 | 55.94 | 1859 |
| 6 | 51.78 | 1862 | 57.56 | 1618 |
| 7 | 49.65 | 2138 | 55.77 | 1932 |
| 8 | 49.38 | 2207 | 53.54 | 2006 |
| 9 | 58.16 | 1868 | 57.26 | 2032 |
| 10 | 51.27 | 1966 | 52.37 | 1856 |
| Media | 52.33 (50.23) | 1952 (1897) | 55.19 (55.91) | 1828 (1628) |
| Desv. Est. | 3.61 | 124.6 | 1.74 | 175.1 |

Si se comparan estos valores con los obtenidos antes del aumento del tamaño de la muestra (valores en paréntesis), se puede señalar que para ambas composiciones existen pequeñas variaciones en las propiedades. Sin embargo si se toma en cuenta a las desviaciones estándar, podemos indicar que prácticamente no existió tal diferencia entre los valores. Con lo cual se podría considerar que los valores de media y desviación estándar de las propiedades a tracción obtenidos con un tamaño de la muestra de 5 son bastante válidos.

4.4.1.1. Compuestos con fibras de 20 mm de longitud, y 35% en masa

Debido a los resultados que se obtuvieron en la fase de composición, se decidió realizar una prueba con la composición de 20 mm de longitud y 35% en fibra, utilizando los parámetros de procesamiento optimizados para la composición 1 (precalentamiento: 5 min, 180°C, 1.47 MPa; moldeo: 4 min, 180°C, 1.47 MPa; enfriamiento: 10 min, 0.74 MPa). Los resultados en cuanto a las propiedades a tracción y flexión de este compuesto se ilustran en la Tabla 4.27, en comparación con los obtenidos en la fase de composición, valores en paréntesis.

Tabla 4.27. Propiedades a tracción y flexión del compuesto con 20 mm y 35% en fibra.

| Tracción | | | Flexión | |
|----------------|-------------------------|---------------|------------------|----------------|
| ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) | S_{flex} (MPa) | E_f (MPa) |
| 5.20 ± 0.28 | 38.45 ± 2.49 | 1110 ± 87.9 | 51.70 ± 3.18 | 1989 ± 108.7 |
| (4.21 ± 0.07) | (26.21 ± 0.77) | (1221 ± 75.9) | (42.13 ± 3.15) | (1518 ± 115.1) |

Se observa una mejora en cuanto a la deformación a carga máxima y resistencia a tracción, resultado esperado, ya que como se vio en la etapa de definición de parámetros de procesamiento, el aumento del anclaje mecánico, y la eliminación de burbujas dentro del compuesto, permiten obtener mejoras en sus propiedades. Sin embargo, el módulo presenta una ligera disminución al valor obtenido en la etapa de composición, evidenciando una pérdida de rigidez en el material. Adicionalmente, se observa una mejora considerable en las propiedades a flexión, debido a la mejor inclusión del PP en la fibra de abacá, que permite obtener mayor cantidad de fibra en la superficie del mismo.

4.4.1.2. Compuestos de fibra continua y orientada longitudinalmente

De igual manera, se fabricaron placas con fibra continua y orientada longitudinalmente, con un contenido de 35% utilizando las mismas condiciones optimizadas para la composición 1. Los resultados a tracción y flexión de estas pruebas, detallados en la Tabla 4.28, permiten realizar una comparación con los obtenidos inicialmente en la etapa de composición, valores en paréntesis.

Tabla 4.28. Propiedades a tracción del compuesto con 20 mm y 35% en fibra.

| Tracción | | | Flexión | |
|-------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) | $S_{flex@5\%}$ (MPa) | E_f (MPa) |
| 5.92 ± 0.33 | 87.44 ± 9.23 | 2400 ± 267.5 | 124.36 ± 12.74 | 5175 ± 865.2 |
| (9.01 ± 0.76) | (141.86 ± 18.73) | (1966 ± 169.8) | (83.68 ± 3.00) | (2936 ± 555.2) |

Se observa una disminución en las propiedades a tracción del compuesto, en relación a los valores que se obtuvieron en la etapa de composición, aunque el módulo presenta un incremento. Estos resultados evidencian que las condiciones de procesamiento mejoradas para compuestos de fibra corta, no serían muy aplicables a los compuestos de fibras continuas, hecho que podría deberse a la diferencia de disposición de las fibras, humectabilidad, inclusión del PP en la fibra de abacá, entre otros muchos factores involucrados. Sin embargo, las propiedades a flexión mejoran enormemente sobre todo en módulo. Este efecto, como se dijo anteriormente, se debe principalmente a que la presión de moldeo permitió que la distribución de la fibra a lo largo del espesor del material mejore y que por ende exista un mayor contenido de esta en la superficie del compuesto.

4.4.1.3. Compuestos de fibra mercerizada

La intercara juega un rol importante en las propiedades físicas y mecánicas del compuesto, ya que las fibras celulósicas son incompatibles con el polímero a causa de la naturaleza hidrofóbica de este. Es por esto que se han estudiado muchos tratamientos para mejorar la unión interfacial fibra-matriz. Entre estos está el de mercerización que se ha empleado en el presente proyecto. [Herrera y Valadez, 2005; Li et al, 2004; S. Mishra et al, 2000; Gauthier et al, 1998; Kim et al, 2001; Tripathy et al, 1999]

El mercerizado indujo una variación de las propiedades físico-químicas de las fibras de abacá, provocando una pérdida significativa en su peso, debido a la disolución parcial de la hemicelulosa, lignina y pectina. Esto se evidencia por la coloración amarillenta que adquirió la solución, como se ilustra en la Figura 4.57. Adicionalmente, se observa que esta pérdida de hemicelulosa y pectina (aglutinante) contribuye a que la fibra se deshilache en pequeñas fibrillas. Es

decir, se produce una fibrilación superficial, tal como se ve en la Figura 4.58. Asimismo, la pérdida de lignina (rigidez estructural) permitió un hinchamiento que hace desaparecer la forma circular característica de la sección transversal de la fibra, la cual pasa a ser allanada.



Figura 4.57. Coloración amarillenta que obtiene la fibra por cambios en su composición química.

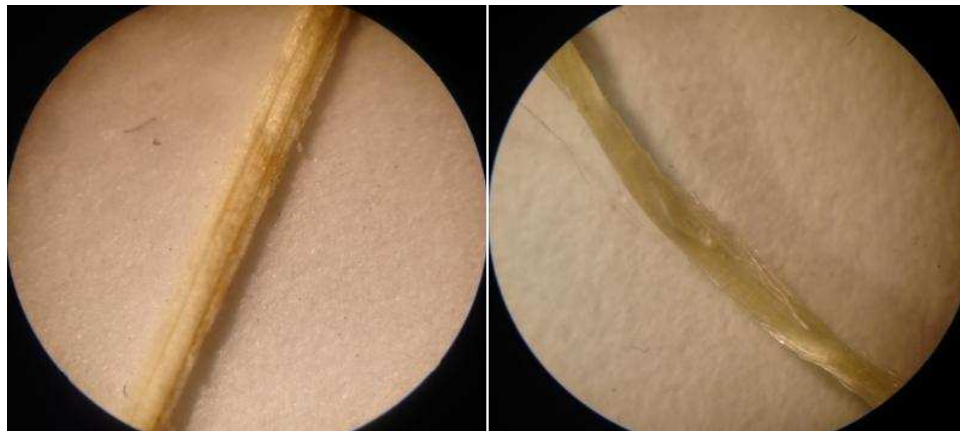


Figura 4.58. Comparación entre la estructura de las fibras antes y después del tratamiento de mercerizado.

Se ensayaron mecánicamente las fibras mercerizadas con una separación entre mordazas de 50 mm y una velocidad de 5 mm/min, los resultados se muestran en la Tabla 4.29. El diámetro descrito en la tabla se calcula a través de la ecuación (4.2), obtenida de la referencia [Lopez, 2004].

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 10^{-5} \times \text{Titulo}}{\pi \times \rho}} \quad (4.2)$$

donde:

d = diámetro de la fibra, en cm

$Título$ = relación entre el peso y la longitud de la fibra, en tex

ρ = densidad de la fibra, en g/cm³

El título (*tex*) corresponde al peso en gramos por cada 1000 m de longitud de fibra. La densidad ρ de la fibra se considera un valor de 1.3 g/cm³ según referencia bibliográfica [Mohanty, 2005; Wanbua, 2003; Cadena, 2000].

Tabla 4.29. Propiedades mecánicas a la tracción de las fibras mercerizadas.

| Muestra | Título (tex) | Tenacidad (N/tex) | Diámetro (mm) | <i>Sut</i> (MPa) | Módulo (MPa) |
|--------------|--------------|-------------------|---------------|------------------|--------------|
| 1 | 94.00 | 0.3084 | 0.3034 | 400.93 | 7955 |
| 2 | 103.16 | 0.2441 | 0.3179 | 317.30 | 6296 |
| 3 | 75.32 | 0.3698 | 0.2716 | 480.71 | 3765 |
| 4 | 58.58 | 0.3646 | 0.2395 | 474.02 | 9998 |
| 5 | 73.25 | 0.2083 | 0.2678 | 270.83 | 8065 |
| 6 | 65.44 | 0.3848 | 0.2532 | 500.20 | 8431 |
| 7 | 93.38 | 0.2693 | 0.3024 | 350.14 | 7548 |
| 8 | 62.42 | 0.3973 | 0.2472 | 516.53 | 10825 |
| 9 | 129.13 | 0.2894 | 0.3556 | 376.21 | 8041 |
| 10 | 108.67 | 0.3230 | 0.3262 | 419.91 | 8274 |
| Media | | | | 410.68 | 7920 |
| Desv. Est. | | | | 82.62 | 1921 |

Al comparar estos valores de las propiedades mecánicas de la fibra mercerizada con los de la fibra sin mercerizar (*Sut*: 1091 ± 295.87 MPa, y Módulo: 30832 ± 8497 MPa), se puede señalar que el mercerizado provoca una disminución considerable en las propiedades de la fibra de abacá.

Se preparó un compuesto con fibras de 30 mm de longitud y 35% en masa de fibra modificada por mercerización, a las condiciones de procesamiento optimizadas para esta composición. La Tabla 4.30 muestran las propiedades a tracción y flexión de los compuestos PP/abacá con fibra modificada en comparación con el compuesto de la misma composición pero con fibra sin modificar.

Tabla 4.30. Propiedades a tracción y flexión del compuesto con 30 mm y 35% en fibra modificada.

| Fibra | Tracción | | | Flexión | |
|-------------------|----------------|-------------------------|-------------|------------------|--------------|
| | ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) | S_{flex} (MPa) | E_f (MPa) |
| <i>Modificada</i> | 5.53 ± 0.42 | 35.44 ± 1.09 | 1055 ± 20.1 | 52.97 ± 2.77 | 1342 ± 133.3 |
| <i>No Tratada</i> | 5.61 ± 0.34 | 40.12 ± 2.63 | 1296 ± 48.9 | 50.23 ± 1.40 | 1897 ± 49.3 |

Se conoce que el mercerizado remueve una pequeña capa de ceras, y modifica la superficie de la fibra, como se vio anteriormente. Esto permitiría obtener una mayor compatibilidad y adhesión mecánica entre las fibras y la matriz, que sumadas a unas condiciones óptimas de procesamiento, asegurarían una mejora de las propiedades de tensión y flexión. Sin embargo, los resultados muestran que el tratamiento por mercerización de las fibras, a las condiciones empleadas, no mejora las propiedades del compuesto. Debiéndose posiblemente a la disminución en las propiedades mecánicas propias de las fibras. Un estudio más profundo sobre el efecto de la mercerización en las propiedades de los compuestos PP/abacá debe realizarse para tener una conclusión más firme.

4.4.2. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS PP/ABACÁ

En este apartado se estudia el comportamiento a la tracción de la matriz PP y de los 5 materiales compuestos finales: 30%/20 mm, 35%/20 mm, 35%/30 mm, 35%/FM (fibra modificada), 35%/FC (fibra continua), en base al diagrama esfuerzo vs. deformación unitaria.

En la Figura 4.59 se ilustran las curvas esfuerzo - deformación características de los materiales compuestos PP/abacá a diferentes composiciones, en comparación con la matriz de PP. La Figura 4.60 es una ampliación para el caso de los compuesto de fibra corta distribuida al azar.

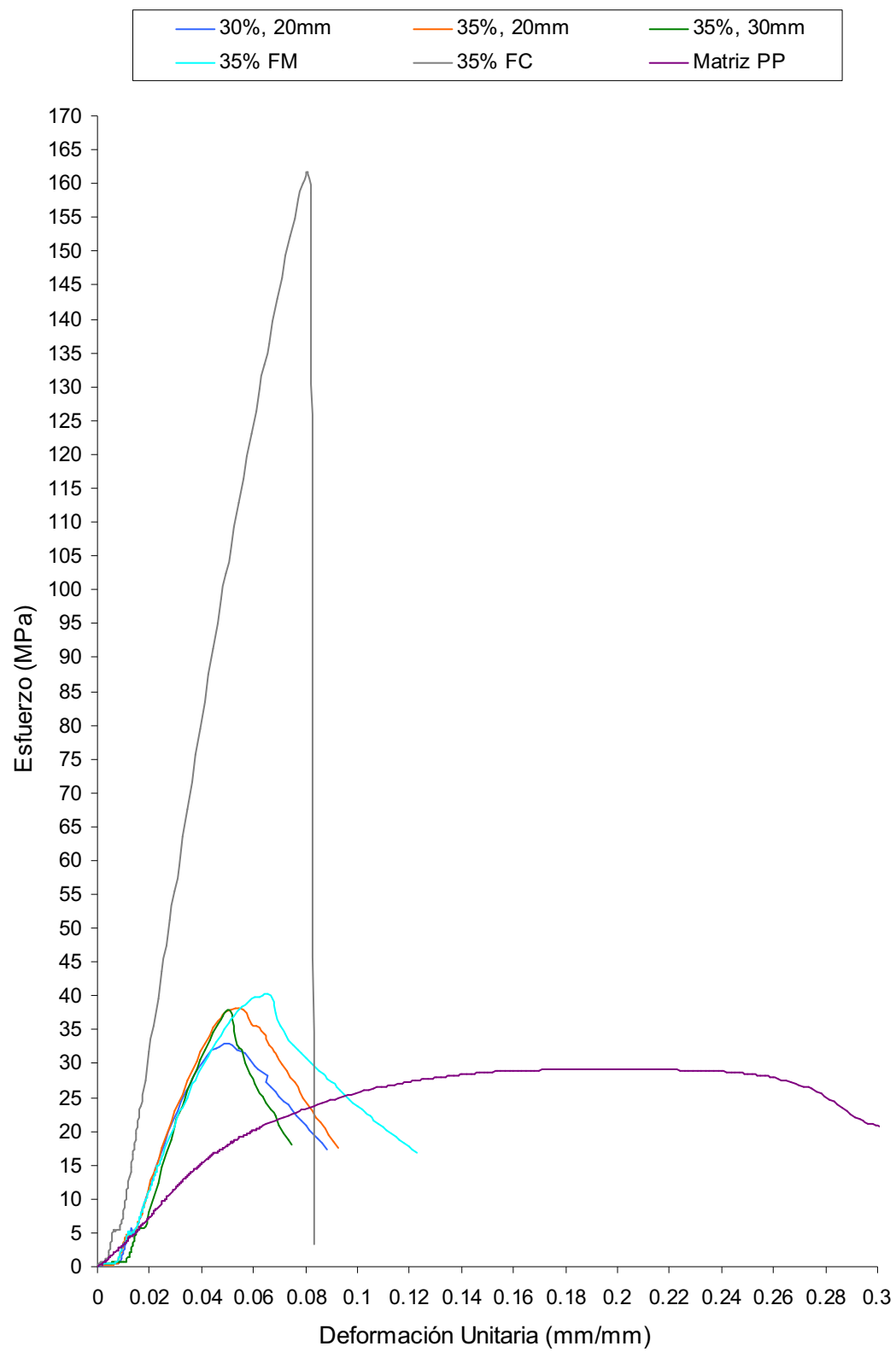


Figura 4.59. Curvas esfuerzo vs. deformación unitaria características de los materiales compuestos PP/abacá y de la matriz de PP.

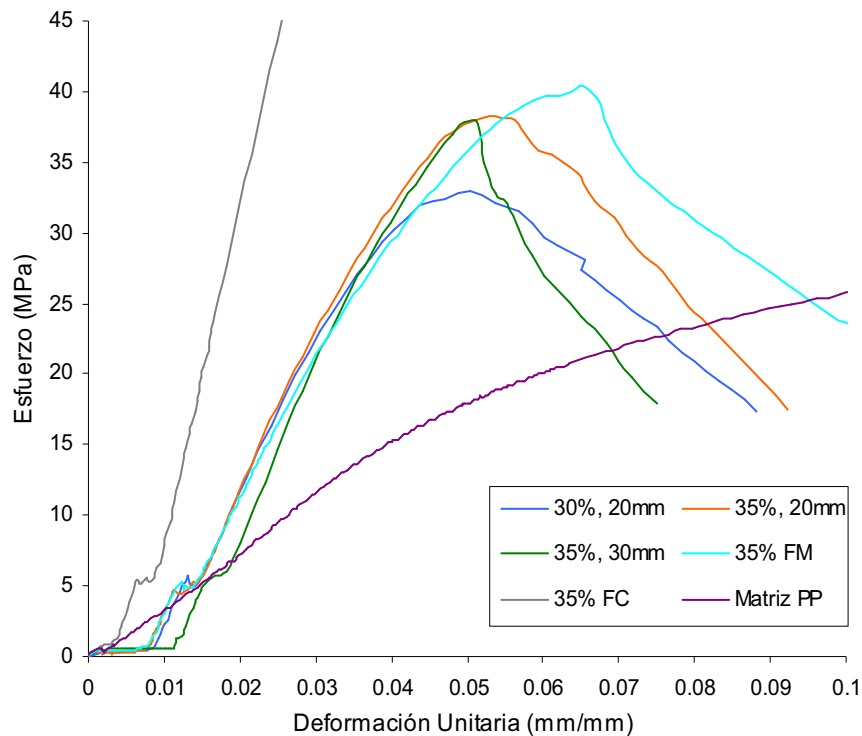


Figura 4.60. Acercamiento a las curvas esfuerzo vs. deformación de los materiales compuestos PP/abacá de fibra corta y orientada al azar.

Las curvas esfuerzo vs. deformación obtenidas de los ensayos a tracción de los materiales compuestos PP/abacá de fibra continua y corta denotan dos zonas divididas por un escalón en alrededor de 5 a 6 MPa de esfuerzo, el cual podría presentarse a causa de un error atribuido a la máquina de ensayos universales o por una fluencia localizada característica de estos materiales.

El hecho de que este escalón se presenta casi con el mismo valor de esfuerzo (5 a 6 MPa) para todas las composiciones del material PP/abacá; es decir, el hecho de que sea repetitivo lleva a pensar que no se trata de una falla en el equipo, sino más bien de una característica del material. Podría tratarse de que a este esfuerzo la unión mecánica entre la fibra y la matriz llega a ceder, permitiendo que exista un deslizamiento de la fibra entre la matriz, crecimiento de la deformación, sin que exista resistencia alguna del material, esfuerzo constante. Sin embargo, para poder llegar a una conclusión más valedera sobre este punto, se recomienda realizar un estudio más profundo sobre las curvas de esfuerzo vs. deformación de los materiales compuestos PP/abacá.

En los compuestos PP/abacá de fibra corta y orientada al azar, se observa un comportamiento similar a los materiales dúctiles, en donde se tienen deformaciones relativamente grandes en comparación con el esfuerzo registrado. En estos materiales la inclusión de fibra aumenta rigidez del compuesto, permitiendo que a bajas deformaciones, en el material se induzcan altos esfuerzos. Esto se observa de mejor manera en la zona por debajo del escalón antes mostrado. Por encima de este escalón, la matriz permite un comportamiento no lineal obteniéndose deformaciones relativamente grandes.

En cambio, en los compuestos PP/abacá de fibra continua y longitudinalmente orientada, el comportamiento es más similar a los materiales frágiles, en donde el efecto de la fibra es mucho más trascendente que el de la matriz. Asimismo, luego de alcanzada la carga máxima, los compuestos de fibra continua y corta muestran un comportamiento diferente. En el compuesto de fibra continua, una vez que la carga alcanza su valor máximo, la curva presenta un descenso brusco, denotando la rotura completa del compuesto; mientras que en los materiales de fibra corta, se observa una caída progresiva de la curva. Durante el ensayo de estos materiales, la carga máxima estaba dada por el punto en que la matriz de PP comienza a fracturarse, quedando únicamente la fibra entrelazada entre sí y en parte anclada a la matriz, provocando así que la caída del esfuerzo no sea tan drástica.

Como se había especificado en el apartado 3.4.4.1, los valores del módulo registrado a lo largo del presente proyecto corresponde al módulo entre un 25% a un 75% de la carga máxima, es decir en la zona por encima del escalón registrado. Por este motivo, a partir de estos diagramas esfuerzo vs. deformación unitaria, es conveniente determinar los valores del módulo de la zona por debajo del escalón, con el fin de establecer una comparación entre estos. La Figura 4.61 muestra una ampliación de los diferentes materiales.

En esta zona por debajo del escalón, el esfuerzo muestra ser proporcional a la deformación, y la pendiente de este tramo lineal corresponde al módulo. Por consiguiente, para determinar su valor se utiliza la ecuación (4.3)

$$E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \equiv \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.3)$$

Para el caso de la matriz de PP, debido a la dificultad para localizar el punto de fluencia, se ha considerado como límite elástico (esfuerzo de fluencia) el esfuerzo en el cual la matriz PP tiene una deformación del 0.005 mm/mm, tal como se ilustra en la Figura 4.62.

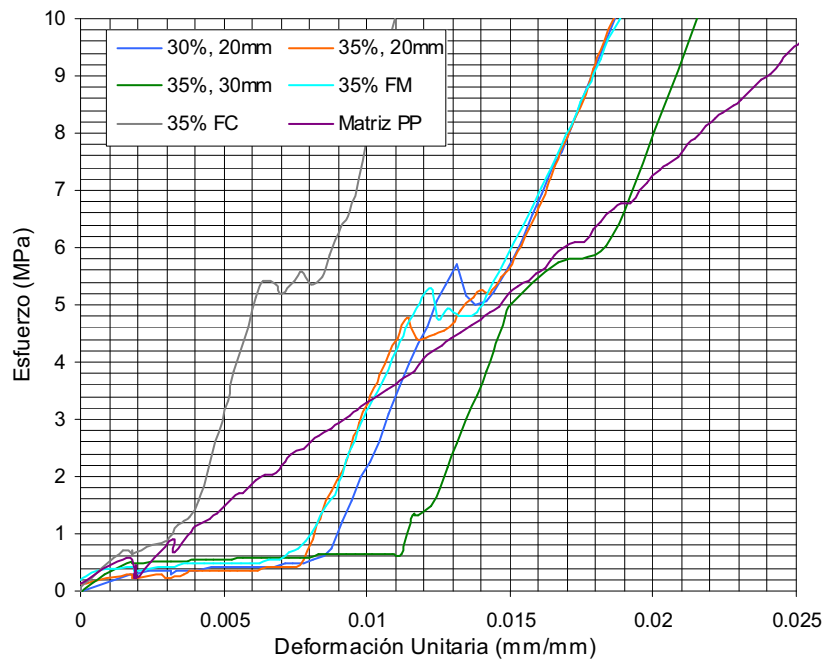


Figura 4.61. Escalón en la curva esfuerzo - deformación de los materiales compuestos PP/abacá.

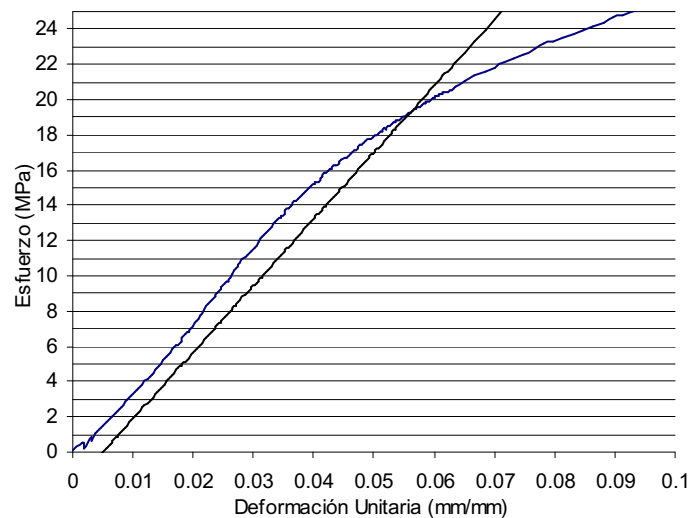


Figura 4.62. Determinación del esfuerzo de fluencia o límite elástico en la matriz de PP.

Los valores tanto de esfuerzo como de deformación que permiten calcular el módulo en esta zona por debajo del escalón se determinan a través de la Figura 4.62, y los resultados de este en comparación con los valores del módulo registrado como resultados en la etapas anteriores (entre un 25% a un 75% de la carga máxima, zona por encima del escalón) se exponen en la Tabla 4.31.

Tabla 4.31. Módulo de elasticidad y esfuerzo de fluencia de la matriz de PP y de los materiales compuestos PP/abacá.

| Ensayo | Módulo antes del escalón (MPa) | Módulo 25% al 75% (MPa) |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| <i>Matriz PP</i> | ~ 348.2 | 548.65 ± 6.7 |
| <i>30% - 20 mm</i> | ~ 1160.7 | 1111.80 ± 81.1 |
| <i>35% - 30 mm</i> | ~ 1212.3 | 1110.00 ± 87.9 |
| <i>35% - 30 mm</i> | ~ 1225.2 | 1277.80 ± 42.3 |
| <i>35% - 30 mm F. Modificada</i> | ~ 1119.4 | 1055.00 ± 20.1 |
| <i>35% - F. Continua</i> | ~ 1846.5 | 2400.40 ± 267.5 |

Al comparar el módulo por debajo del escalón (calculado a partir de la curva) con el módulo de tracción obtenido entre el 25% al 75% de la carga máxima (zona por encima del escalón) para cada composición, se puede señalar que la diferencia entre estos ni siquiera representa el valor de las dispersiones obtenidas. Es decir, los valores entre estos dos módulos de las diferentes zonas son estadísticamente comparables. En base a esto, queda demostrado que los valores del módulo a tracción determinado en un rango del 25% al 75% de la carga máxima de los compuestos PP/abacá registrados en este proyecto, son muy válidos para el diseño estructural con este tipo de materiales.

4.4.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS PP/ABACÁ

4.4.3.1. Dureza

La Tabla 4.32 muestra los valores obtenidos de dureza Shore-D, de los compuestos finales, en comparación con la matriz PP. Se observa en los resultados que los valores obtenidos de los compuesto y de la matriz, son

prácticamente los mismos. Esto se debe quizás a la existencia de una capa de superficial de PP, que cubre la fibra, y que de hecho es necesario que exista, en la cual se tomaron los datos.

Tabla 4.32. Dureza Shore-D de los compuestos finales PP/abacá.

| Ensayo | Matriz PP | 30%, 20 mm | 35%, 30 mm | 35%, 30 mm Fibra modificada | 35%, Fibra continua |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|---------------------|
| 1 | 75 | 75 | 72 | 79 | 75 |
| 2 | 75 | 76 | 73 | 79 | 76 |
| 3 | 74 | 72 | 73 | 75 | 74 |
| 4 | 75 | 74 | 70 | 77 | 77 |
| 5 | 74 | 75 | 71 | 78 | 72 |
| 6 | 73 | 75 | 72 | 76 | 74 |
| 7 | 75 | 73 | 72 | 80 | 76 |
| 8 | 73 | 74 | 75 | 76 | 74 |
| 9 | 75 | 75 | 75 | 78 | 78 |
| 10 | 75 | 74 | 73 | 78 | 74 |
| Media | 74.4 | 74.3 | 72.6 | 77.6 | 75 |
| Desv. Est. | 0.84 | 1.16 | 1.58 | 1.58 | 1.76 |

4.4.3.2. Densidad

La densidad de los compuestos se determinó mediante el método detallado en el apartado 3.4.4.4 del presente trabajo. La Tabla 4.33 muestra los valores de densidades calculados a través de la ecuación (3.6) y mediante el valor conocido de la densidad del alcohol isopropílico a 22.5°C (0.79 g/cm³).

Tabla 4.33. Densidad de los compuestos de PP/abacá.

| Material | Densidad (g/cm ³) |
|------------------------------------|-------------------------------|
| <i>Matriz de PP</i> | 0.9116 ± 0.0003 |
| <i>30%, 20 mm</i> | 0.9979 ± 0.0054 |
| <i>35%, 20 mm</i> | 1.0117 ± 0.0023 |
| <i>35%, 30 mm</i> | 1.0183 ± 0.0139 |
| <i>35%, 30 mm Fibra modificada</i> | 1.0558 ± 0.0082 |
| <i>35%, Fibra continua</i> | 1.0551 ± 0.0038 |

Los resultados muestran un aumento de la densidad del material compuesto respecto a la de la matriz de PP, causado por la inclusión de la fibra de abacá de mayor densidad (1.3 g/cm^3 [Mohanty, 2005]). La densidad de los compuestos PP/abacá de fibra corta varía entre 0.9979 g/cm^3 para un compuesto con 30% en fibra hasta 1.0183 g/cm^3 para un contenido del 35%. Los compuestos de fibra continua y modificada con un contenido de 35% tienen una densidad mayor o igual a 1.055 g/cm^3 , demostrando que el mercerizado aumenta la densidad de la fibra.

4.4.3.3. Absorción de agua

El ensayo de absorción de agua se realizó según la norma INEN 556 utilizando el aparato Kubelka, en base a lo recomendado por la referencia bibliográfica [Morejón y Narváez, 2004]. Sin embargo, los resultados expuestos en la Tabla 4.34 muestran ser imprecisos, quizá debido a que la norma empleada permite determinar la absorción de agua en cueros.

Tabla 4.34. Absorción de agua de los compuestos de PP/abacá, según norma INEN 556.

| Material | Masa (g) | Qm 15 min (ml/g) | Qm 60 min (ml/g) |
|----------------------|----------|------------------|------------------|
| Matriz de PP | 1.601 | 0.62 - 1.25 | 1.87 - 2.50 |
| Fibra 35% | 1.469 | 2.72 - 3.40 | 4.08 - 4.76 |
| Fibra modificada 35% | 1.554 | 3.86 - 4.50 | 5.15 - 5.79 |

Si se considera la densidad del agua ($\sim 1 \text{ g/ml}$), estos resultados implicarían que por cada 3.72 g de compuesto con 35% en fibra, 2.72 g de este es agua. Es decir un 73% del peso del compuesto es debido al agua. Este resultado es bastante incoherente ya que se conoce que el porcentaje del peso en agua que absorbe la fibra es de apenas el 10% y el PP de 0%.

Debido a esta falta de precisión y al interés que se tiene en determinar la absorción de agua del compuesto de PP/abacá, se empleó otro método, descrito en el artículo publicado por Li et al. [2004] y detallado en el apartado 3.4.4.5 del presente proyecto. Los resultados de absorción de agua con este método se exponen en la Tabla 4.35.

Tabla 4.35. Absorción de agua de los compuestos de PP/abacá, según método publicado por Li et al. [2004], no normalizado.

| Material | M% 15min | M% 60min | Qm 15min (ml/g) | Qm 60min (ml/g) |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|
| <i>Matriz de PP</i> | 0 | 0.249 | 0 | 0.003 |
| <i>30%, 20 mm</i> | 4.683 | 6.739 | 0.049 | 0.072 |
| <i>35%, 20 mm</i> | 4.386 | 5.899 | 0.046 | 0.063 |
| <i>35%, 30 mm</i> | 5.732 | 7.817 | 0.061 | 0.085 |
| <i>35%, 30 mm Fibra modificada</i> | 1.642 | 3.372 | 0.017 | 0.035 |
| <i>35%, Fibra continua</i> | 5.603 | 7.334 | 0.059 | 0.079 |

Aun cuando este segundo método (empleado para determinar la absorción de agua de los distintos materiales) no está normalizado, los resultados parecen tener una mejor relación a lo previsto por bibliografía, ya que la absorción máxima de agua en peso de los compuestos es menor al 10% que se tiene como registro para la fibra de abacá.

La absorción de agua muestra incrementarse con la cantidad y longitud de fibra, por eso es que se obtiene la mayor absorción de agua con los compuestos de 35% - 30 mm y 35% fibra continua. Sin embargo la mercerización de la fibra, muestra reducir considerablemente la absorción de agua aun al mismo contenido de fibra (35% - 30 mm), lo cual puede ser atribuido a que la sosa reacciona con los grupos hidrófilos -OH de la fibra, logrando disminuir su afinidad con el agua.

4.4.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y RELACIÓN CON LOS PRESENTADOS EN ESTUDIOS SIMILARES

Como parte final, se comparan los resultados obtenidos en cuanto a las propiedades mecánicas y físicas entre los materiales compuestos que mejor combinación de propiedades demostraron tener, siendo estos: 30% - 20 mm, 35% - 20 mm, 35% - 30 mm, 35% - 30 mm con fibra mercerizada, y 35% - fibra continua y longitudinalmente orientada.

Los resultados en cuanto a propiedades mecánicas se ilustran en las Tabla 4.36 y 4.37, para tracción y flexión, respectivamente; mientras que los resultados en cuanto a propiedades físicas se exponen en la Tabla 4.38.

Tabla 4.36. Propiedades mecánicas a la tracción de los compuestos PP/abacá.

| Compuesto | ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) |
|----------------------|----------------------------------|---|-----------------------------|
| <i>Matriz PP</i> | 15.52 ± 1.52 | 31.62 ± 0.39 | 548.65 ± 6.7 |
| <i>30%, 20 mm</i> | 5.55 ± 0.40 | 35.27 ± 2.74 | 1111.80 ± 81.1 |
| <i>35%, 20 mm</i> | 5.20 ± 0.28 | 38.45 ± 2.49 | 1110.00 ± 87.9 |
| <i>35%, 30 mm</i> | 5.03 ± 0.37 | 37.30 ± 2.95 | 1277.80 ± 42.3 |
| <i>35%, 30 mm FM</i> | 5.53 ± 0.42 | 35.44 ± 1.09 | 1055.00 ± 20.1 |
| <i>35%, FC</i> | 5.92 ± 0.33 | 87.44 ± 9.23 | 2400.40 ± 267.5 |

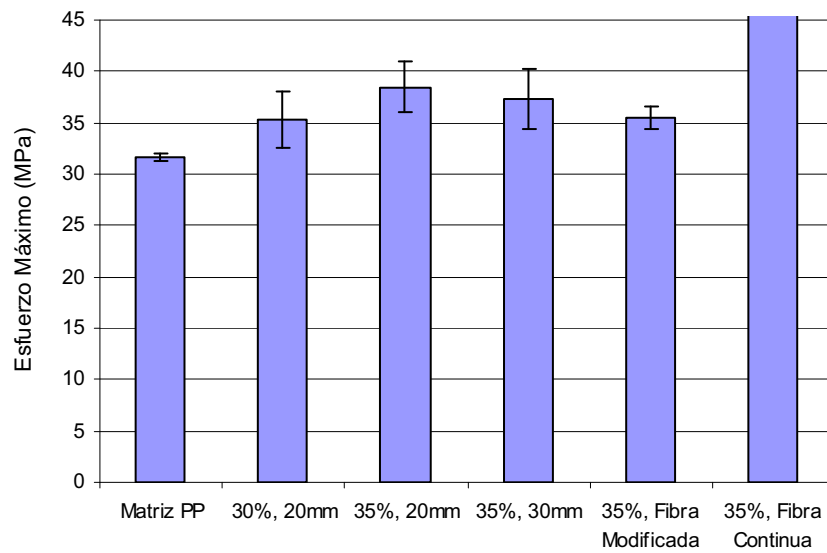
Tabla 4.37. Propiedades mecánicas a la flexión de los compuestos PP/abacá.

| Compuesto | $S_{flex@5\%}$ (MPa) | E_f (MPa) |
|---------------------|--|-------------------------------|
| <i>Matriz PP</i> | 37.50 ± 0.83 | 1249.60 ± 107.38 |
| <i>30%, 20 mm</i> | 55.19 ± 1.74 | 1828 ± 175.1 |
| <i>35%, 20 mm</i> | 51.70 ± 3.18 | 1989 ± 108.7 |
| <i>35%, 30 mm</i> | 52.33 ± 3.61 | 1952 ± 124.6 |
| <i>35%,30 mm FM</i> | 52.97 ± 2.77 | 1342 ± 133.3 |
| <i>35%, FC</i> | 124.36 ± 12.74 | 5175 ± 865.2 |

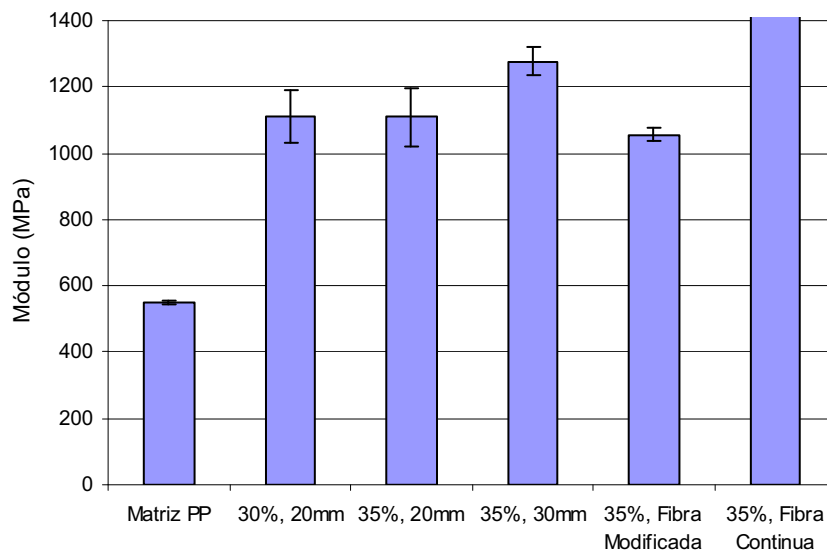
Tabla 4.38. Propiedades físicas de los compuestos PP/abacá.

| Compuesto | Dureza Shore-D | Densidad (g/cm³) | Absorción Agua (ml/g) | |
|----------------------|---------------------------|--|------------------------------|---------------|
| | | | 15 min | 60 min |
| <i>Matriz PP</i> | 74.4 ± 0.84 | 0.9116 ± 0.0003 | 0 | 0.003 |
| <i>30%, 20 mm</i> | 74.3 ± 1.16 | 0.9979 ± 0.0054 | 0.049 | 0.072 |
| <i>35%, 20 mm</i> | --- | 1.0117 ± 0.0023 | 0.046 | 0.063 |
| <i>35%, 30 mm</i> | 72.6 ± 1.58 | 1.0183 ± 0.0139 | 0.061 | 0.085 |
| <i>35%, 30 mm FM</i> | 77.6 ± 1.58 | 1.0558 ± 0.0082 | 0.017 | 0.035 |
| <i>35%, FC</i> | 75 ± 1.76 | 1.0551 ± 0.0038 | 0.059 | 0.079 |

Las Figuras 4.63 (a) y (b) muestran una comparación gráfica de las propiedades mecánicas obtenidas en los compuestos PP/abacá estudiados en el presente proyecto. En las figuras se ha recortado el valor del esfuerzo para el compuesto 35% fibra continua (FC), puesto que de antemano se conoce de su superioridad en relación a los demás.



(a)



(b)

Figura 4.63. Comparación de las propiedades a tracción finales de los materiales compuestos PP/abacá: a) Esfuerzo máximo, b) Módulo a tracción.

De manera general, el efecto causado por la adición de la fibra de abacá como refuerzo en la matriz de PP se refleja en un aumento de su rigidez, aceptando mayores cargas pero a la vez reduciendo su deformación a carga máxima. En la deformación unitaria de los compuestos, la adición de la fibra provoca una disminución de alrededor del 65% en comparación con la deformación de la matriz PP, y parece presentar el mismo valor para todos los compuestos, siendo ligeramente mayor en los de fibra continua, mercerizada y de 30% - 20 mm (0.0555 mm/mm).

Al igual que con la deformación, el esfuerzo máximo a tracción de los compuestos de fibra corta es prácticamente el mismo en todas las composiciones de fibra corta, con un ligero aumento para el compuesto con mayor contenido de fibra: 35%. Se obtiene un reforzamiento de entre el 11.5% y 21.6% respecto a la resistencia a la tracción de la matriz PP, demostrando que aun sin que se haya hecho un tratamiento superficial de la fibra, la variación del proceso de conformado y la buena selección de sus parámetros, permite obtener un anclaje mecánico y reducir los defectos que puedan presentarse en el compuesto, permitiendo así tener un reforzamiento en la matriz. En cuanto al módulo a tracción, se tiene de igual manera una mejora importante en la rigidez del matriz de PP al añadir fibra de abacá corta y orientada al azar, la cual va del 92.3% al 133%. Los compuestos de fibra continua y orientada longitudinalmente presentan aun mejores resultados, llegando a un aumento en comparación con la matriz de PP del 176% para el esfuerzo máximo y del 337% para el módulo a tracción.

Al comparar estos incrementos con los obtenidos en trabajos similares [Morejón y Narváez, 2004; Cadena et al., 2000; P.V. Joseph et al, 1998], con las diferencias del caso, se puede decir que el aumento en las propiedades mecánicas de los compuestos de PP/abacá obtenidos en este proyecto mediante el moldeo por compresión, son muy comparativos. Es más si se compara específicamente con un proyecto previo llevado a cabo en el CIAP [Morejón y Narváez, 2004], se observa una superioridad en los resultados obtenidos.

En la Tabla 4.39 se ilustran los valores más altos de las propiedades mecánicas obtenidas en trabajos de investigación similares, detallando la diferencia que existe con las propiedades mecánicas de la matriz utilizada en cada caso.

Tabla 4.39. Mejores propiedades mecánicas registradas en otros trabajos similares.

| Compuesto | ϵ (%) | $S_{m\acute{a}x}$ (MPa) | E (MPa) | Referencia |
|--------------------------------------|----------------------------------|---|---------------------------------|-------------------------|
| <i>PE</i> | 106.6 | 18.5 | 60.9 | Morejón y Narváez, 2004 |
| <i>PE/abacá 20% Inyección</i> | 33.3 | 13.2 | 197.0 | |
| Variación | -68.8% | -28.6% | 223% | |
| <i>PP</i> | 18.1 | 23.9 | 578.0 | Cadena et al., 2000 |
| <i>PP/abacá 30% Compresión</i> | 11.8 | 33.2 | 1185.6 | |
| Variación | -34.8% | 38.9% | 105% | |
| <i>PP</i> | 10.33 | 35.0 | 498.0 | P.V. Joseph et al, 1998 |
| <i>PP/sisal 20% - 6 mm Azar</i> | 8.33 | 36.5 | 1630.8 | |
| Variación | -19.4% | 4.3% | 227% | |
| <i>PP</i> | 10.33 | 35.0 | 498.0 | P.V. Joseph et al, 1998 |
| <i>PP/sisal 30% - 6 mm Orientada</i> | 8.33 | 44.4 | 1050 | |
| Variación | -19.4% | 26.9% | 111% | |

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El moldeo por compresión permitió obtener materiales compuestos utilizando como matriz polipropileno y como refuerzo fibras de abacá cortas distribuidas al azar y fibras continuas unidireccionalmente orientadas. Se evitó la degradación física y térmica de las fibras que comúnmente ocurre durante el procesamiento por métodos convencionales como la extrusión o inyección. Se obtuvo adicionalmente, un aumento significativo en las propiedades mecánicas de la matriz de PP.
- El gran volumen que ocupan las fibras cortas distribuidas al azar, en conjunto con las dimensiones restringidas del molde utilizado, limitaron el estudio de estos materiales compuestos a una composición con fracción en masa de fibra del 35%, debido a las dificultades que se presentaron al momento del conformado de estos materiales. Adicionalmente, estos compuestos con 35% en fibra presentaron indicios de saturación, ya que en las esquinas de algunas placas, la matriz no alcanzaba a cubrir las fibras.

Procesabilidad de la matriz de polipropileno

- Las condiciones mínimas de procesamiento para obtener placas de PP sin defectos visuales son: 15 g de PP; una temperatura de 180°C para el precalentamiento durante 5 minutos a una presión de 0 MPa; la misma temperatura de 180°C por un tiempo mínimo de 2 minutos a 0.44 MPa (1500 lbf) para el moldeo; y, para el enfriamiento es necesario 3 minutos a 0 MPa utilizando el sistema cerrado del baño térmico con una temperatura inicial del agua de 0°C, pero para permitir su manipulación es requerido 7 minutos adicionales.

- El enfriamiento con un sistema cerrado y controlado (baño térmico) permite obtener enfriamientos más rápidos que si se lo hiciera con una fuente externa como la acometida de agua potable de la EMAAP, y además se evita el desperdiciar grandes cantidades de agua.

Composición de la material PP/abacá

- Se estudió las propiedades mecánicas de los compuestos PP/abacá en función de la longitud, cantidad y orientación de fibra; mostrando que para los compuestos de fibra corta y orientada al azar, el mejor balance en las propiedades mecánicas, se alcanzó con una longitud de fibra mayor a 20 mm y en un rango de fracción en masa del 30 al 35%. En los compuestos de fibra continua y orientada longitudinalmente con una concentración de fibra del 35% la respuesta mecánica fue mucho mejor, representando un refuerzo en la matriz de más del 200%.
- Los principales problemas presentados en la conformación de los compuestos de PP/abacá son:
 - La falta de adhesión fibra-matriz característica en compuestos con fibra vegetal. Sin embargo, se ha visto que existe un anclaje mecánico, como consecuencia de la superficie irregular y porosa de la fibra de abacá. Esto permite que las propiedades del compuesto se vean mejoradas aunque en pequeño grado.
 - La existencia de fibra orientada transversalmente a la dirección del esfuerzo, perjudica la respuesta del compuesto ante la tracción, ya que estas fibras estarían actuando como concentradores de esfuerzo, más no como refuerzos.
 - La inclusión de aire al momento de retirar la presión de moldeo, llevaba a obtener placas con burbujas y por ende una disminución de las propiedades mecánicas.
 - La falta de inclusión del PP en la fibra de abacá, es decir la mala distribución a lo largo del espesor del compuesto, denotado por la existencia de una mayor cantidad de fibra en el centro que en las

superficies de las placas, disminuye la respuesta a la flexión de los compuestos.

- Los materiales compuestos unidireccionales con fibras continuas presentan resultados interesantes en cuanto a sus propiedades mecánicas, como el mantener o ir aumentado su ductilidad con el contenido de fibra. Esto se manifiesta con el aumento de la deformación unitaria a tracción, mientras que se refuerza considerablemente la resistencia máxima a tracción y flexión. Además, se obtiene un aumento en la rigidez manifestado con el aumento considerable del módulo tanto para tracción como para flexión.
- El mayor problema presentado en estos compuestos unidireccionales de fibra continua, es la gran dispersión obtenida en sus propiedades mecánicas. Efecto que básicamente se atribuye a la variación implícita que tienen las propiedades de las fibras naturales en general, y del abacá en particular.

Condiciones de procesamiento de los compuestos PP/abacá

- Se han mejorado las condiciones del procesamiento por moldeo por compresión, en función de las propiedades mecánicas de los compuestos PP/abacá de dos diferentes composiciones (30% - 20 mm, 35% - 30 mm), revelando que para la composición de 35% y 30 mm de longitud en fibra, las mejores condiciones son: precalentamiento a una temperatura de 180°C con una presión de 1.47 MPa durante 5 minutos; el moldeo a 180°C, durante 4 minutos a 1.47 MPa; y, el enfriamiento a 0.74 MPa durante 10 minutos y con una temperatura inicial del agua de 0°C. Para la composición de 30% y 20 mm de longitud en fibra, el mejor balance en las propiedades mecánicas se presentó con: un precalentamiento a 180°C y 0.88 MPa durante 10 minutos, un moldeo de 4 minutos a 180°C y 1.47 MPa de presión; y, para el enfriamiento se utiliza el mismo sistema cerrado con una temperatura inicial del agua de 0°C, a una presión de 1.47 MPa por unos 10 minutos para que el molde se enfríe por completo.
- La variación de las condiciones del procesamiento por moldeo por compresión ha permitido eliminar de mejor manera el aire que queda atrapado entre las

placas de PP y la fibra (material tipo sánduche), mejorar la mojabilidad de la fibra por la matriz y por ende la adhesión mecánica entre estos dos componentes, logrando así aumentar sus propiedades mecánicas a la tracción y a la flexión hasta alcanzar un refuerzo en las propiedades de la matriz de PP. El aumento de la presión de moldeo permitió una mejor distribución de la fibra a lo largo del espesor del compuesto, inclusión de la matriz en las porosidades de la fibra y en los espacios entre fibras del compuesto, lo cual se refleja en el aumento considerable de las propiedades a flexión. Al aplicar una presión en el enfriamiento, se eliminó en su mayor cantidad las burbujas de aire (porosidades en el compuesto) que actuaban como concentradores y reducían las propiedades a tracción del compuesto.

Caracterización final de los compuestos PP/abacá

- El efecto causado por las fibras de refuerzo en el PP se traduce en un aumento de su rigidez acompañado de una pérdida de la ductilidad. La deformación a carga máxima disminuye en alrededor del 65%. El módulo, más dependiente de la composición, aumenta entre un 92.3% y un 133% para compuestos de fibra corta y distribuida al azar, y en 337% para compuestos de fibra continua unidireccional. En el esfuerzo máximo a tracción se obtiene un reforzamiento en los compuestos de fibra corta de entre el 11.5% y 21.6%, y del 176% para los de fibra continua, respecto a la resistencia a la tracción de la matriz PP, demostrando que aun sin que se haya hecho un tratamiento superficial de la fibra, la variación del proceso de conformado y la buena selección de sus parámetros, permite obtener un anclaje mecánico y reducir los defectos que puedan presentarse en el compuesto.
- De las curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria se concluye que los compuestos PP/abacá de fibra corta y orientada al azar, poseen un comportamiento similar a los dúctiles, en donde se tienen deformaciones relativamente grandes en comparación con el esfuerzo registrado. En cambio, en los compuestos PP/abacá de fibra continua y longitudinalmente orientada, el comportamiento es más parecido al de los materiales frágiles, en donde el efecto de la fibra es mucho más trascendente que el de la matriz.

- Comparando las propiedades mecánicas de los compuestos con y sin modificación de la fibra por mercerizado, se puede señalar que no existe una mejora; aunque por el cambio superficial que sufrieron las fibras al tratarlas, se creería que debe existir una mayor compatibilidad y adhesión mecánica entre las fibras y la matriz, que sumados a unas condiciones óptimas de procesamiento, asegurarían obtener una mejora de las propiedades de tensión y flexión. Por este motivo, un estudio más profundo debe hacerse para llegar a una conclusión firme acerca de los efectos que la mercerización de la fibra tiene sobre la intercara fibra-matriz y por ende sobre las propiedades de los compuestos PP/abacá.
- En cuanto a las propiedades físicas, se ha visto que tanto la densidad como la absorción de agua se incrementan por la inclusión de fibra en la matriz de PP. El aumento de la densidad en relación a la matriz de PP es del 10% en compuestos con 30% en masa de fibra y del 16% en compuestos con 35% de fibra. La absorción de agua aumenta a 0.085 ml/g, siendo que la del PP es nula. La mercerización de la fibra, muestra reducir en un 60% la absorción de agua de los compuestos. En cuanto a la dureza, no se tiene ningún cambio considerable en comparación con la matriz de PP

5.2. RECOMENDACIONES

- En el estudio de la composición de los compuesto de PP/abacá, el haber obtenido mejores resultados con bajos contenido de fibra, mientras que en la bibliografía se puede ver que a mayor contenido de fibra mejores resaltados en refuerzo se obtienen, nos indica que estuvieron involucrados factores ajenos a la composición del compuestos, tales como la falta de un mejor anclaje mecánico, presencia de burbujas de aire dentro del compuesto, falta de aglomeración, entre otros defectos que, mediante la optimización de los parámetros de procesamiento pudieron ser mejorados y hasta eliminados. Por lo dicho, se sugiere para trabajos similares, establecer un nuevo procedimiento experimental, en donde inicialmente se optimice los parámetros de

procesamiento, para mediante la utilización de estos determinar de una manera más cierta los efectos de la composición del material.

- Si bien no se registró un aumento en las propiedades de los compuestos al reforzarlos con fibra de abacá modificada mediante mercerización, se sugiere estudiar de manera más amplia sus efectos, ya sea utilizando la misma mercerización o mediante el uso de otro agente de acoplamiento, puesto que de referencias bibliográficas se conoce de las mejoras en la afinidad fibra-matriz debido a los tratamientos químicos sobre las fibras vegetales.
- Se recomienda profundizar el estudio de los compuestos de fibra continua y orientada unidireccionalmente, puesto que los resultados muestran un reforzamiento considerable en las propiedades del polipropileno, comparables a las obtenidas con fibras de refuerzo tradicionales como la fibra de vidrio.
- Se sugiere, el estudio de compuestos que poseen más de 3 capas, o el estudio de un método de mezcla mecánica entre los pellets de PP y la fibra de abacá. Para evitar el problema de la falta de aglomeración del compuesto, y por ende la disminución en sus propiedades mecánicas.
- Se sugiere que para eliminar de mejor manera el problema de burbujas se utilice un molde que permita, mediante el empleo de una bomba de vacío, eliminar todo el aire que quede atrapado entre las paredes del molde durante el procesamiento de los compuestos, y en conjunto con una presión en la fase de enfriamiento lograr eliminar por completo la presencia de porosidades en el material. Porosidades que al ser grandes concentradores de esfuerzo, limitan la resistencia mecánica del material compuesto PP/abacá.
- Es necesario buscar un método experimental que permita definir si el escalón observado en las curvas esfuerzo vs. deformación unitaria corresponde a una respuesta del material o simplemente se debe a un error de la máquina de ensayos utilizada.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, Solís. Los Bosques del Ecuador y sus Productos. Editorial Ecuador. Quito. 1971.
- CADENA, F.; LETERRIER, Y.; MANSON, J. Les composites a fibres naturelles. Laboratoire de Technologie des Composites et Polymères. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. 1994.
- COGSWELL, F.N.; Manufacturing Techniques for Thermoplastics; Aromatic Polymer Composites, Butterworth-Heinemann Ltd., 1992.
- COOK, Gordon. Handbook of Textil Fibers. Fibers Vegetable. Tomo I y II. 1981.
- CORRALES, Farners. Modificació de Fibres de Jute per L'elaboració de Plàstics Reforçats. Universidad Politècnica de Catalunya. Catalunya. 2002.
- EHRENSTEIN, Gottfried W.; RIEDEL, Gabriela; TRAWIEL, Pia. Thermal Analysis Of Plastics: Theory and Practice. Hanser. Munich. 2004.
- ELLISON, G; McNAUGHT, R. The Use of Natural Fiber in Non-Woven Structures for Applications as Automotive Component Substrates. UK Government MAFF Report. London. 2000.
- FUJIYAMA, M; WAKINO, T. Journal of Applied Polymer Science. 1991.
- GAUTHIER, R.; JOLY, C.; COMPAS, A.; GAULTIER, H. ESCOUBES, M. Interfaces in polyolefin/cellulosic fibre composites: chemical coupling, morphology, correlation with adhesion and aging in moisture. Polymer Composites. 1998.
- GUERRERO, Víctor. Materiales compuestos. Quito. 2004.
- HERRERA, P.; VALADEZ, A. A Study of the Mechanical Properties of Short Natural-Fiber Reinforced Composites. Composites Part B: engineering. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mexico. 2005.

- JAYARAMAN, Krishnan. Manufacturing Sisal-Polypropylene Composites with Minimum Fibre Degradation. Composites Science and Technology. University of Auckland. New Zealand. 2001.
- JOHNSON, Carl; RUDD, Chris. Manufacturing Process Selection for Composite Components. Comprehensive Composite Materials; Vol. 2. 2000.
- JUNOVICH, Analia. El cultivo del abacá en el Ecuador. Proyecto Sica – III Censo Nacional Agropecuario. Quito. 2002.
- KIM, J-K, SHAM, M.; WU, J. Nanoscale characterisation of interphase in silane treated glass fibre composites. Applied Science and Manufacturing. 2001.
- LEÃO, Alcides; CARVALHO, Francisco. Lignocellulosic-Plastics Composites. UNESP. Sao Paulo. 1997.
- LI, X.; PANIGRAHI, S; TABIL, L; CRERAR, W. Fiber-reinforced Composites and the Effect of Chemical Treatments on their Properties. University of Saskatchewan. Manitoba. 2004.
- LÓPEZ, Angel. Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas. Universidad Politécnica de Cataluña. Girona. 2004.
- MASPOCH. Materiales compuestos. UPC. Barcelona. 1995.
- MAYUGO, Joan. Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona 2003.
- MISHRA, S.; NAIK, J.; PATIL, Y. The compatibilising effect of maleic anhydride on swelling and mechanical properties of plant-fibrereinforced novolac composites. Composites Science and Technology. 2000.
- MOHANTY, Amar; MISRA, Manjusri. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2005.

- MOIR. Consulta sobre fibras naturales: Los efectos ambientales de las fibras duras y el yute en aplicaciones industriales no textiles. Fiat Panis. Roma. 2004.
- MOREJÓN, Sergio; NARVÁEZ, Leslye, Materiales Compuestos de Matrices Polietilénicas Reforzados con Fibras Naturales de Abacá y Cabuya. Escuela Politécnica Nacional. Quito. 2004.
- MORHAIN, Cédric. Microestructura y propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno con hidróxido de magnesio y aluminio moldeados por inyección. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 2001.
- P.V., Joseph; KURUVILLA, Joseph, SABU, Thomas. Effect of Processing Variables on the Mechanical Properties of Sisal-Fiber-Reinforced Polypropylene Composites. Composites Science and Technology. Mahatma Gandhi University. Kottayam. 1998.
- RANA, A.; MANDAL, A. Short Jute Fiber-Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Compatibilizer. Calcutta. 1997.
- ROJAS, R. Materiales compuestos a partir de matriz vinílica y refuerzos fibrosos recuperados de desechos de curtiembre. Escuela Politécnica Nacional. Carrera de Ingeniería Química. Quito, 2003.
- RONGA, Min Zhi; ZHANGB Ming Qiu; LIUB, Yuan. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. China. 2001.
- SCHAFFER, James; SAXENA, Ashok. Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería. 1ra. Edición. Compañía Editorial Continental. México. 2000.
- SREEKALA, M; KUMARAN, M; JACOB, M; THOMAS,S. Oil palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites: Influence of fiber surface modifications on the mechanical performance. Applied Composite Materials. 2000.
- TAYLOR Jhon. Quality Assurance of Chemical Measurement. Lewis Publishers. USA. 1987.

- TRYPATHY, S.; MISHRA, S.; NAYAK, S. Novel, low-cost jute-polyester composite. *Polymer Composites*. 1999.
- VALADEZ, A., CERVANTES, J.; OLAYO, R.; HERRERA, P. Chemical modification of henequen fibers with an organosilane coupling agent. *Engineering*. 1999.
- WAKE, W. Theories of Adhesion and Uses of Adhesives: A Review. 291-308. 1978.
- WAKEMAN, M; RUDD, Chris. Compression Molding of Thermoplastic Composites. *Comprehensive Composite Materials*. Vol. 2. Elsevier Science Ltd. 2000.
- WAMBUA, Paul; IVENS, Jan; VERPOEST, Ignaas. Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?. *Composite Science and Technology*. Katholic Universiteit Keuven. Belgium. 2003.
- WU, Z.; PITTMAN, H.; GARDNER, S. Grafting isocyanate terminated elastomers onto the surfaces of carbon fibers: Reaction of isocyanate with acidic surface functions. 1996.
- [CADE]
<http://www.sica.gov.ec/agronegocios/productos%20para%20invertir/fibras/abaca/principal.htm>
- [Internet 1] <http://www.biologia.edu.ar/botanica/>
- [Internet 2] <http://www.abacaphilippines.com>
- [Internet 3] <http://www.mailxmail.com/curso/excelencia/cienciamateriales>
- [Internet 4] <http://www.textoscientificos.com>
- [Internet 5] <http://materiales.eia.edu.co/index.htm>

ANEXOS

| | |
|--|----------------|
| ANEXO 1. TRATAMIENTOS Y AGENTES DE ACOPLAMIENTO..... | 196 |
| A1.1. MÉTODOS FÍSICOS | 196 |
| A1.2. MÉTODOS QUÍMICOS..... | 196 |
| A1.1.1. Mercerización | 197 |
| A1.2.1. Copolimerización de injerto | 197 |
| A1.2.2. Agentes de acoplamiento..... | 198 |
| A1.3. INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS COMPUESTOS. | 202 |
| ANEXO 2. PROCESOS DE MANUFACTURA | 203 |
| A2.1. CRITERIO DE SELECCIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA | 203 |
| A2.1.1. Velocidad o Tasa de Producción | 203 |
| A2.1.2. Costos | 203 |
| A2.1.3. Desempeño | 204 |
| A2.1.4. Tamaño | 204 |
| A2.1.5. Forma | 204 |
| A2.2. BASES DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE LOS COMPUESTOS | 206 |
| A2.2.1. Impregnación | 206 |
| A2.2.2. Estratificación | 206 |
| A2.2.3. Consolidación | 206 |
| A2.2.4. Solidificación | 207 |
| ANEXO 3. VALORES DE TEMPERATURA Y ENTALPÍA CARACTERÍSTICOS DE TERMOPLÁSTICOS SEMICRISTALINOS PARA DETERMINAR SU PORCENTAJE DE CRISTALINIDAD. | 208 |
| ANEXO 4. ESPECIFICACIONES Y PLANOS DEL MOLDE | 209 |
| ANEXO 5. RESULTADOS PARA LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN DE LA ETAPA DE COMPOSICIÓN DEL MATERIAL | 210 |
| A5.1. COMPUESTOS DE FIBRA DISCONTINUA | 210 |
| A5.2. COMPUESTOS DE FIBRA CONTINUA | 211 |

| | |
|---|------------|
| ANEXO 6. RESULTADOS PARA LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN DE LA ETAPA DE COMPOSICIÓN DEL MATERIAL..... | 212 |
| A6.1. COMPUESTOS DE FIBRA CORTA | 212 |
| A6.2. COMPUESTOS DE FIBRA CONTINUA | 213 |
| ANEXO 7. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN PARA LAS PRUEBAS REALIZADAS EN LA ETAPA DE PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO..... | 214 |
| A7.1. FASE DE MOLDEO..... | 214 |
| A7.2. FASE DE PRECALENTAMIENTO..... | 216 |
| A7.3. FASE DE ENFRIAMIENTO | 217 |
| ANEXO 8. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN PARA LAS PRUEBAS REALIZADAS EN LA ETAPA DE PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO..... | 219 |
| A8.1. FASE DE MOLDEO..... | 219 |
| A8.2. FASE DE PRECALENTAMIENTO..... | 221 |
| A8.3. FASE DE ENFRIAMIENTO | 222 |
| ANEXO 9. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DENSIDAD DEL POLIPROPILENO Y MATERIALES COMPUESTOS PP/ABACÁ. | 224 |

ANEXO 1. TRATAMIENTOS Y AGENTES DE ACOPLAMIENTO

Se han propuestos métodos físicos y químicos que permiten modificar la superficie de las fibras vegetales. Entre los físicos se tiene el tratamiento corona, de plasma frío; y entre los químicos la mercerización, la copolimerización de injertos monómeros en la superficie de las fibras, y el uso de agentes de acoplamiento [Herrera y Valadez, 2005].

A1.1. MÉTODOS FÍSICOS

Los métodos o tratamientos físicos son aplicados sobre las fibras con el fin de modificar su superficie. Los tratamientos físicos no cambian la composición química de las fibras, sino que cambian las propiedades estructurales y superficiales en las fibras influyendo sobre la adhesión y enlaces mecánicos con los polímeros. Entre los tratamientos físicos se tienen métodos de descarga eléctrica como: [López 2004, Corrales 2002]:

- Tratamiento de Corona.- El tratamiento Corona es una de las técnicas más interesantes para la activación de la superficie de oxidación. Este proceso cambia la energía superficial de las fibras de celulosa. En el caso de la madera la activación de la superficie incrementa la cantidad de grupos aldehídos.
- Tratamiento de Plasma Frío.- Mediante este tratamiento se obtiene el mismo efecto que con el anterior. La diferencia es que dependiendo del tipo y naturaleza de los gases utilizados, se puede alcanzar otra variedad de modificación, en la que existe un entrecruzamiento superficial, se puede incrementar o disminuir la energía superficial y también se pueden producir grupos y radicales libres reactivos.

A1.2. MÉTODOS QUÍMICOS

Con el fin de eliminar la incompatibilidad existente entre las fibras hidrofílicas y la matriz hidrófoba, se puede introducir un tercer material o tratar la superficie de la fibra mediante este compuesto, que actúa formando enlaces químicos entre los otros dos, y de esta forma crear un grado de compatibilidad.

A1.1.1. Mercerización

La mercerización es uno de los métodos más antiguos, y es ampliamente utilizado en la modificación de las fibras textiles de algodón. Se trata de un tratamiento alcalino el cual depende del tipo y concentración de la solución alcalina, de su temperatura, del tiempo del tratamiento, de la fuerza de tensión del material y de los aditivos utilizados en el proceso.

Es un método de modificación de elevada importancia puesto que facilita la adhesión interfacial. Unas condiciones óptimas de la mercerización aseguran el incremento de las propiedades de tracción y capacidad de absorción, muy importantes en la formación de los materiales compuestos. Actualmente existe una tendencia a utilizar la mercerización con otras fibras naturales, tales como el lino, cañamo y ramio.

A1.2.1. Copolimerización de injerto

Es un método efectivo que permite alterar significativamente las propiedades físicas y mecánicas de las fibras. Esta reacción es inicializada por radicales libres de moléculas de celulosa. La celulosa es tratada con una solución acuosa con iones seleccionados y luego es expuesta a una alta energía de radiación. Debido a esto la molécula de celulosa se rompe y forma radicales. Los radicales libres son tratados con la correcta solución (compatible con la matriz polimérica), por ejemplo: monómeros de vinilo, metacrilato de metilo, y poliestireno.

Por medio de este tratamiento se produce un ataque a la superficie de la fibra mejorando los enlaces entre esta y la matriz. Por ejemplo, el tratamiento de las fibras de celulosa con copolímeros de anhídrido maleico – polipropileno calientes (MAH-PP), suministra enlaces covalentes a lo largo de la superficie. El mecanismo de reacción puede ser dividido en dos pasos: una primera en la que tras el tratamiento de la fibra se activa el copolímero a partir de un incremento de temperatura (170°C) y una segunda en la que tiene lugar la esterificación de la celulosa.

Después de este tratamiento la energía superficial de las fibras es incrementada hasta un nivel más cercano de la energía superficial de la matriz. Este proceso produce una mejor humectabilidad y así se obtiene una mejor adhesión interfacial. El método de copolimerización de injerto es efectivo, pero complejo.

A1.2.2. Agentes de acoplamiento

La misión de los agentes de acoplamiento es la de servir de enlace entre la fibra y la matriz, y así mejorar la adhesión interfacial. Se han propuesto muchas teorías para explicar el papel del agente de acoplamiento. Una de estas dice que reduce la tensión interfacial (fuerzas de cohesión moleculares en la superficie que le separa de otro medio) e incrementa la energía de superficie, facilitando compatibilidad con el material inicialmente inmiscible y asegura una buena humectación. La reducción de la tensión interfacial de la fibra, produce además una no-polaridad, haciéndola más similar a la matriz polimérica. Se favorece una dispersión uniforme de la fibra en la matriz, facilitando la formación de nuevas interfases. [Corrales, 2002; López, 2004]

Se han investigado varios agentes de acoplamiento, entre los cuales se tienen: [Corrales, 2002, Morejón y Narváez, 2004; P.V. Joseph et al, 1998; Li et al, 2004]

- Tratamientos con Anhídridos

Los anhídridos son compuestos ampliamente usados como agentes de acoplamiento. Entre estos se destacan: anhídrido maleico (MA), anhídrido acético (AA), anhídrido succínico (SANO) y anhídrido fenílico (PHA), los cuales se ilustran en la Figura A1.1. Los anhídridos acético, succínico y fenílico, tienen dos grupos carboxilos (-COO-) que pueden enlazarse a las fibras a través de un proceso de esterificación o bien por enlace de puente de hidrógeno. En cambio, el anhídrido maleico es un compuesto carbonílico α, β -insaturado que contiene un C=C y dos grupos carboxilos (-COO-). Esta estructura conjugada, incrementa la reactividad del doble enlace carbono-carbono de anillo heterocíclico presente en la fibra con la matriz polimérica. Es un proceso que tiene lugar a través de una adición conjugada en presencia de un radical iniciador, dando lugar a una fuerte adhesión en la intercara.

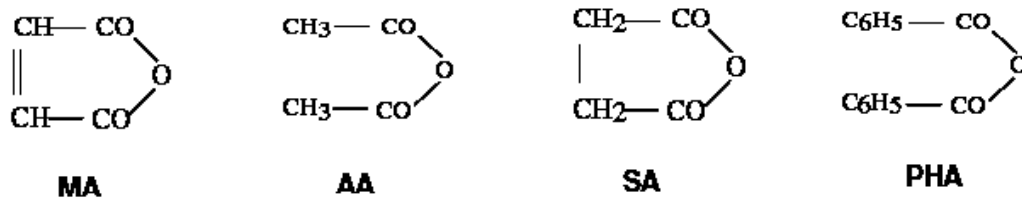


Figura A1. 1 Estructuras de los principales anhídridos utilizados como agentes de acoplamiento: Anhídrido Maleico (MA), Anhídrido Acético (AA), Anhídrido Succínico (SANO) y Anhídrido Fenílico (PHA) [Corrales, 2002].

El anhídrido maléico ha demostrado tener buenos resultados al ser utilizado para tratar fibra de sisal. P.V. Joseph [1998] y X. Li [2004] reportan un incremento considerable en las propiedades mecánicas finales de los compuestos.

- Tratamiento con alcalinos

Se conoce que los tratamientos alcalinos, principalmente con hidróxido de sodio (NaOH) remueven las ceras y grasas ácidas de la superficie de fibras como el sisal [P.V. Joseph et al, 1998; Li et al, 2004] haciendo que su superficie sea más rugosa. Además, produce la fibrilación o destrucción de los haces de fibras en pequeñas fibras. Con esto se incrementa el área superficial efectiva logrando mejorar la adhesión en la intercara fibra / matriz, y a su vez se produce un incremento en las propiedades mecánicas del compuestos final.

- Tratamiento con isocianatos

Los isocianatos son compuestos en los cuales el grupo isocianato –NCO, está unido a un radical orgánico. Con este tipo de componente es posible realizar tratamiento a las fibras o a la matriz, mejorando las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Comparando los dos métodos, tratamiento con silanos y tratamiento con isocianatos, el tratamiento con isocianatos es más efectivo que el tratamiento con silanos. Iguales resultados son obtenidos cuando el isocianato–polifenilo–polimetileno (PMPPIC) es usado para la modificación de las fibras o matriz polimérica.

- Tratamiento con silanos

Los organosilanos son el principal grupo de agentes de acoplamiento para polímeros reforzados con fibra de vidrio. Análogamente, los silanos son utilizados como agentes de acoplamiento para materiales compuestos de fibras naturales – polímero. Por ejemplo, el tratamiento de fibras de lino con trietoxisilano disminuye significativamente las ceras y grasas presentes en la superficie de las fibras y por ende mejora las propiedades mecánicas del compuesto final [Li et al., 2004]. El mismo efecto ocurre al tratar el cáñamo con hidroxilo de sodio y silano [Herrera y Valadez, 2005].

- Tratamiento con triclorotriazines y derivados

Las triclorotriazines y derivados tienen grupos multifuncionales en su estructura molecular, cada uno de ellos con una función diferente en el proceso de acoplamiento. De una parte los átomos de cloro pueden interactuar con los grupos hidroxil –OH de la cadena de celulosa. Por otro lado, el átomo de nitrógeno, debido a su elevada electronegatividad, puede enlazarse con el grupo OH a través de un enlace por puente del hidrógeno. Los dobles enlaces carbono-carbono también pueden interactuar formando enlaces covalentes con la matriz polimérica y algunos de los derivados formados, también pueden enlazarse a la celulosa por medio del enlace por puente de hidrógeno.

Este tratamiento provoca una reducción en la absorción de humedad de las fibras celulósicas y en los materiales compuestos. Esto se explica por una reducción del número de grupos hidroxilo de la celulosa, los que están disponibles para tomar humedad; la reducción de la hidrofilidad de la superficie fibrosa; y, por restringir el hinchamiento de la fibra por incremento de la red de enlaces transversales debido a enlaces covalentes entre la matriz y la fibra.

- Tratamiento con resinas

Los compuestos químicos que contienen grupos metanol (-CH₂OH) forman enlaces covalentes estables con las fibras de celulosa. Son ampliamente conocidos y utilizados en la química textil. Algunas resinas como por ejemplo la

mono y di metanolmelamina (DMM), pueden unirse a las fibras con un enlace metilénico (-CH₂). Estas funciones alcohol formadas en la fibra no pueden reaccionar con una matriz termoplástica, por lo que la dimetilomelanina facilita la adhesión interfacial.

- Tratamiento con ácidos y esteres

De forma similar al anhídrido maleico, el ácido acrílico y los metacrilatos como el ácido metacrílico (MAA), metacrilato de metilo (MMA), y metacrilato de epoxipropil (EPMA), mostrados en la Figura A1.2 también tienen una estructura α , β -insaturada, que puede dar lugar a una adhesión interfacial fuerte.

- Tratamiento con inorgánicos

Actúan como agentes dispersantes con objeto de cambiar la polaridad superficial de las fibras y facilitar la compatibilidad entre estas y el polímero. Solo unos cuantos agentes inorgánicos, como por ejemplo los silicatos, son capaces de actuar como agentes modificantes.

- Tratamiento con orgánicos-inorgánicos

Son compuestos con una estructura híbrida. Normalmente contienen un centro formado por un átomo inorgánico y una parte orgánica que le rodea. Ejemplos de este tipo de compuestos serían los titanatos, ilustrado en la Figura A1.3, o zirconatos.

La funcionalidad de la parte orgánica es la que determina la efectividad del agente. En cuanto a la función que realizan, puede decirse que es de un punto intermedio entre los orgánicos e inorgánicos.

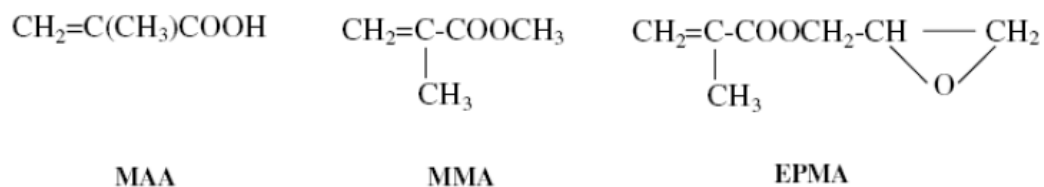


Figura A1. 2 Estructuras del Acido Metacrílico (MAA), Metacrilato de Metilo (MMA), y Metacrilato de Epoxipropil (EPMA) [Corrales, 2002].

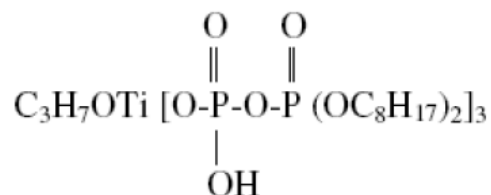


Figura A1. 3 Estructura de un titanato. [Corrales 2002]

A1.3. INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS COMPUESTOS.

Como se dijo anteriormente, la hemicelulosa juega un papel importante en las propiedades mecánicas de las fibras vegetales. La mercerización, y especialmente la sosa cáustica, afecta sensiblemente a la hemicelulosa, logrando que la región interfibrilar sea menos densa y rígida. Además, se cree que aumenta su porcentaje de cristalinidad, provocando una mejora en el empaquetamiento de las cadenas y el mejoramiento de sus propiedades.

El tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH) de las fibras es capaz de provocar un incremento en el orientación molecular, lo cual incrementa el módulo de Young de las misma.

La aplicación de los silanos como agentes de acoplamiento, influye en la humectabilidad de las fibras y mejora la afinidad química con la matriz polimérica. Un ejemplo se da al tratar la fibra del lino con vinilmetoxilano disuelto en metanol y dibutildiuretano como catalizador. En este caso se obtiene un incremento de un 60% en la resistencia a la tracción.

La matriz de polipropileno (PP) se puede modificar con anhídrido metacrílico (MAH). Las largas cadenas de MAH-PP dan lugar a un incremento de la humectabilidad, facilitando la adhesión de la fibra con la matriz.

ANEXO 2. PROCESOS DE MANUFACTURA

A2.1. CRITERIO DE SELECCIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA

Resulta muy complicado para los ingenieros el seleccionar un proceso de manufactura correcto para la elaboración de alguna parte. La razón principal es que se dispone de una gran variedad de técnicas de procesamiento y de materias primas. Por esta razón, es necesario establecer ciertos criterios que faciliten el realizar una correcta selección de los procesos de manufactura.

La selección de un proceso depende principalmente de las necesidades y de la aplicación del producto. Entre los principales criterios se tiene: la tasa de producción, costos, prestación, tamaño y forma requerida en la parte a fabricar. A continuación se describe cada uno de estos criterios. Se debe recordar que estas recomendaciones se dan para materiales de uso típico y probado [Cogswell 1992].

A2.1.1. Velocidad o Tasa de Producción

La velocidad o tasa de producción esta dada por las necesidades del mercado y por la aplicación a la cual va orientado el producto. Por ejemplo, el mercado automotriz requiere una alta tasa de producción: de 10 000 a 5 000 000 unidades al año, mientras que para la industria aeroespacial usualmente el rango está entre las 10 a las 100 unidades al año. Existen técnicas de manufactura de compuestos diseñadas para bajos y altos volúmenes de producción. Como ejemplo están los procesos de estratificado y estratificado húmedo, que se utilizan en volúmenes de producción bajos, mientras que el moldeo por compresión (SMC) y el moldeo por inyección se utilizan en volúmenes altos de producción.

A2.1.2. Costos

Los costos de producción influyen en gran medida la selección de cierto proceso de manufactura puesto que la mayoría de clientes, y entre estos el mercado automotriz, son sensibles a los costos y no pueden afrontar precios muy elevados en su producción. Los factores que influyen en el costo son las herramientas, mano de obra, materia prima, tiempo de ciclo de procesamiento, tiempo de

ensamblaje y volumen de producción. Existen algunas técnicas de manufactura excelentes para la producción de partes a bajo costo, mientras que otras son prohibitivas por sus costos. El costo de un producto es significativamente afectado por el volumen de producción. Un ejemplo de esto se da en la fabricación de paneles automotrices, cuando el volumen de producción es menor a 150 000 unidades por año, se selecciona el moldeo por compresión (SMC) en vez del estampado de metales.

A2.1.3. Desempeño

Cada proceso utiliza diferentes materiales y es por eso la diferencia en las propiedades de los productos. La resistencia del compuesto en gran parte depende del tipo, longitud, orientación y contenido de fibra (60 a 70% es más resistente, como regla). Por ejemplo, los compuestos de fibra continua tienen mayor dureza y resistencia que los compuestos de fibra corta. Existe una gran variedad de materia prima y de técnicas de manufactura que se seleccionan dependiendo de la exigencia que va a tener el producto.

A2.1.4. Tamaño

Otro factor decisivo es el tamaño del producto final. Típicamente el mercado automotriz requiere de componentes pequeños, en comparación con la industria marina y la aeroespacial. Los procesos de moldes cerrados se prefieren para componentes pequeños y medianos. En cambio, para estructuras grandes, como cascos de botes, se utilizan procesos de moldes abiertos.

A2.1.5. Forma

La forma del producto también tiene un rol importante en la selección de una técnica de producción. Por ejemplo, para la fabricación de recipientes de presión y formas cilíndricas se prefiere el bobinado, mientras que la pultrusión es muy económica en la producción de partes largas de sección uniforme, como perfiles.

A continuación en la Tabla A2.1, se muestra una caracterización de cada método de producción basado en los criterios antes expuestos. El costo se refiere al costo

de producto una vez que la maquinaria se haya instalado y funcione a su capacidad total.

Tabla A2. 1. Criterios de selección para los procesos de manufactura [Cogswell 1992].

| | Tasa de producción | Costo | Resistencia | Tamaño | Forma | Materia Prima |
|---|---------------------------|--------------|--|---|-----------------------------------|---|
| Bobinado (filament winding) | Baja – Alta | Bajo – Alto | Alta | Pequeña - Grande | Cilíndrica y axialmente simétrica | Fibra continua con resina epoxi y poliéster |
| Pultrusión | Alta | Bajo - Medio | Alta (a lo largo del eje longitudinal) | Sin restricción en largo, Pequeño – Medio sección transversal | Sección transversal constante | Fibra continua, usualmente con resinas poliéster y vinilester |
| Estratificado | Baja | Alto | Alta | Pequeño – Grande | Simple – Compleja | Prepreg fabricado con resina epoxi |
| Estratificado húmedo | Baja | Medio | Media – Alta | Medio Grande – | Simple – Compleja | Mat con poliéster y resina epoxi |
| Moldeo por aspersión | Media – Alta | Bajo | Baja | Pequeño – Medio | Simple – Compleja | Fibra corta con resina catalizadora |
| Moldeo por transferencia de resina (RTM, Resin transfer molding) | Media | Bajo – Medio | Media | Pequeño – Medio | Simple – Compleja | Preformas con vinilester y epoxi |
| Moldeo estructural por reacción (SRIM, Structural reaction injection molding) | Alta | Bajo | Media | Pequeño – Medio | Simple – Compleja | Preformas con polisocianuro |
| Moldeo por compresión | Alta | Bajo | Media | Pequeño – Medio | Simple – Compleja | SMC, BMC |
| Estampado | Alta | Medio | Media | Medio | Simple – Ceñida | Fibra impregnada con termoplástico (tape) |
| Moldeo por inyección | Alta | Bajo | Baja Media – | Pequeño | Compleja | Fibra corta con termoplástico (pellets) |
| Roll wrapping | Media – Alta | Bajo - Medio | Alta | Pequeño – Medio | Tubular | Prepregs |

A2.2. BASES DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE LOS COMPUESTOS

Todos los procesos de manufactura de partes compuestas involucran cuatro pasos básicos, que son: impregnación, estratificación, consolidación y solidificación [Cogswell, 1992].

A2.2.1. Impregnación

En este paso las fibras y resina se mezclan para formar una lámina, como ejemplo, en el bobinado (filament winding), las fibras se hacen pasar por un baño de resina para su impregnación. El objetivo es el de asegurarse que la resina fluya alrededor y envuelva a toda la fibra. La viscosidad, la tensión superficial y la capilaridad son los principales parámetros que afectan el proceso de impregnación. Los termoestables, con viscosidades en el rango 10 a 10^4 cp son más fáciles de “distribuir”. La viscosidad de los termoplásticos está en el rango 10^4 a 10^8 cp y requiere una mayor presión para una mejor impregnación.

A2.2.2. Estratificación

En este paso se forman los laminados compuestos colocando “mezclas” fibra - resina o preimpregnados formando los ángulos que se desee y en los lugares que se requiera. El espesor deseado del compuesto se alcanza colocando varias capas de la mezcla fibra-resina. El propósito de este paso es alcanzar la arquitectura de fibra que dicta el diseño. Las prestaciones de una estructura compuesta dependen en gran parte de la orientación de las fibras y la secuencia de estratificación.

A2.2.3. Consolidación

Este paso implica el crear un contacto íntimo entre cada capa de preimpregnados o lámina. Además se asegura que todo el aire atrapado sea removido de entre las láminas durante el procesamiento. Es un paso muy importante para asegurar la calidad de las piezas. Las partes que no se han consolidado apropiadamente tendrán poros y puntos secos. La consolidación de compuestos con fibras continuas involucra dos procesos importantes: el flujo de resina a través de

medios porosos y la deformación elástica de las fibras. Durante el proceso de consolidación la presión aplicada se reparte entre la estructura de fibras y la resina. Al inicio, sin embargo, la presión aplicada es soportada solamente por la resina (la deformación elástica de las fibras es nula). Las fibras experimentan deformaciones elásticas cuando la presión aplicada se incrementa y la resina fluye hacia los bordes del molde.

A2.2.4. Solidificación

Este proceso puede tomar menos de un minuto para los termoplásticos y hasta unos 120 minutos para los termoestables. Mientras menor sea el tiempo de solidificación, mayor será la tasa de producción que se pueda alcanzar en el proceso. En los termoestables la tasa de solidificación depende de la formulación de la resina y la cinética del curado. Durante el procesamiento se aplica el calor para acelerar el curado. Usualmente, con una mayor temperatura de curado el proceso de reticulación es más rápido. En los termoplásticos no hay cambios químicos durante la solidificación y por ello el proceso requiere menor tiempo. En este caso la tasa de solidificación depende de la tasa de enfriamiento del proceso. En los termoestables la temperatura se eleva para obtener solidificación más rápida mientras que en el caso de los termoplásticos es mejor acelerar la reducción de la temperatura para obtener una parte rígida.

ANEXO 3. VALORES DE TEMPERATURA Y ENTALPÍA CARACTERÍSTICOS DE TERMOPLÁSTICOS SEMICRISTALINOS PARA DETERMINAR SU PORCENTAJE DE CRISTALINIDAD.

| Material | ΔH_m^0 [J/g] | ΔH_m^0 [J/g] | ΔH_m^0 [J/g] | T_m^0 [°C] | T_m^0 [°C] | T_{pm} [°C] |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | [Wunderlich] | [van Krevelen] | [LKT] | [Wunderlich] | [LKT] | [LKT] |
| PE-LD | 293 | 293 | – | 141 | – | 105–120 |
| PE-HD | 293 | 293 | – | 141 | – | 130–140 |
| PP-H | 207 | 207 | 205 | 188 | 191 | 160–165 |
| POM-H | 326 | 326 | 270 | 184 | 210 - 230 | 175–190 |
| POM-C | – | – | 220 | – | 180 - 190 | 140–170 |
| PA 6 | 230 | 230 | – | 260 | – | 220 |
| PA 66 | 255 | 300 | – | 301 | – | 260 |
| PA 11 | 244 | 226 | – | 220 | – | 187 |
| PA 610 | 284 | 208 | – | 233 | – | 222 |
| PA 46 | – | – | – | – | – | 280–290 |
| PET | 140 | 145 | – | 280 | – | 240–260 |
| PBT | 140 | – | – | 248 | – | 220–230 |
| PTFE | 82 | 82 | – | – | – | 327 |

Table 1.3 Characteristic temperatures and enthalpy values for the crystalline fraction in semicrystalline thermoplastics [17–19]

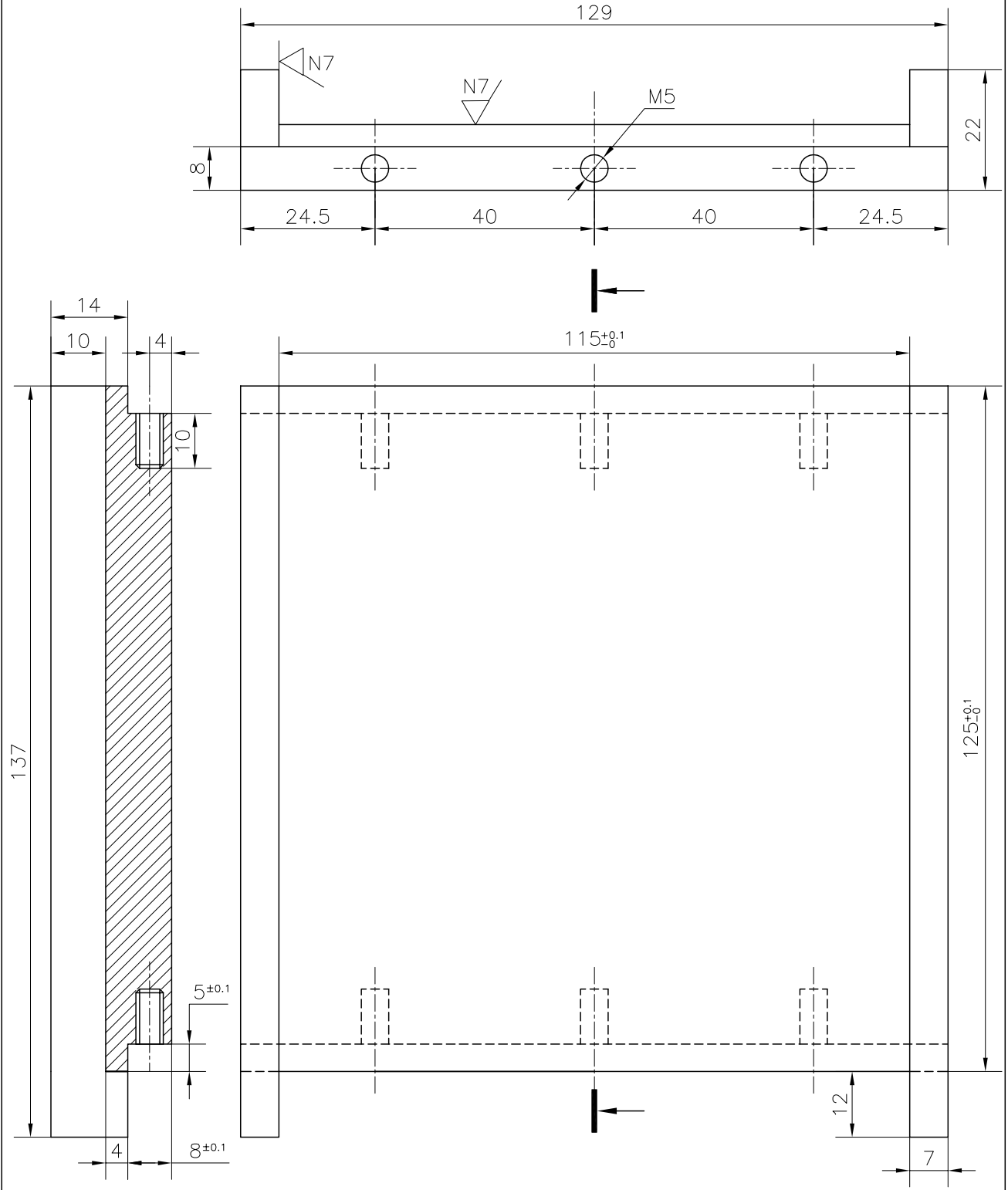
T_{pm} from melting point curve (2nd heating scan), heating rate 10 °C/min, following cooling; cooling rate 10 °C/min

ANEXO 4. ESPECIFICACIONES Y PLANOS DEL MOLDE

- Material parte macho: Acero A36
- Material parte hembra: Duraluminio
- Área de la concavidad: 115.1 x 131.2 mm²
- Alto de la pared: 12 mm
- Peso: 3.4 kg

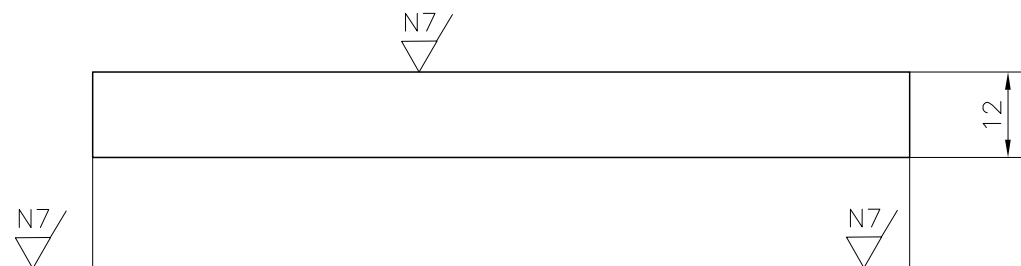
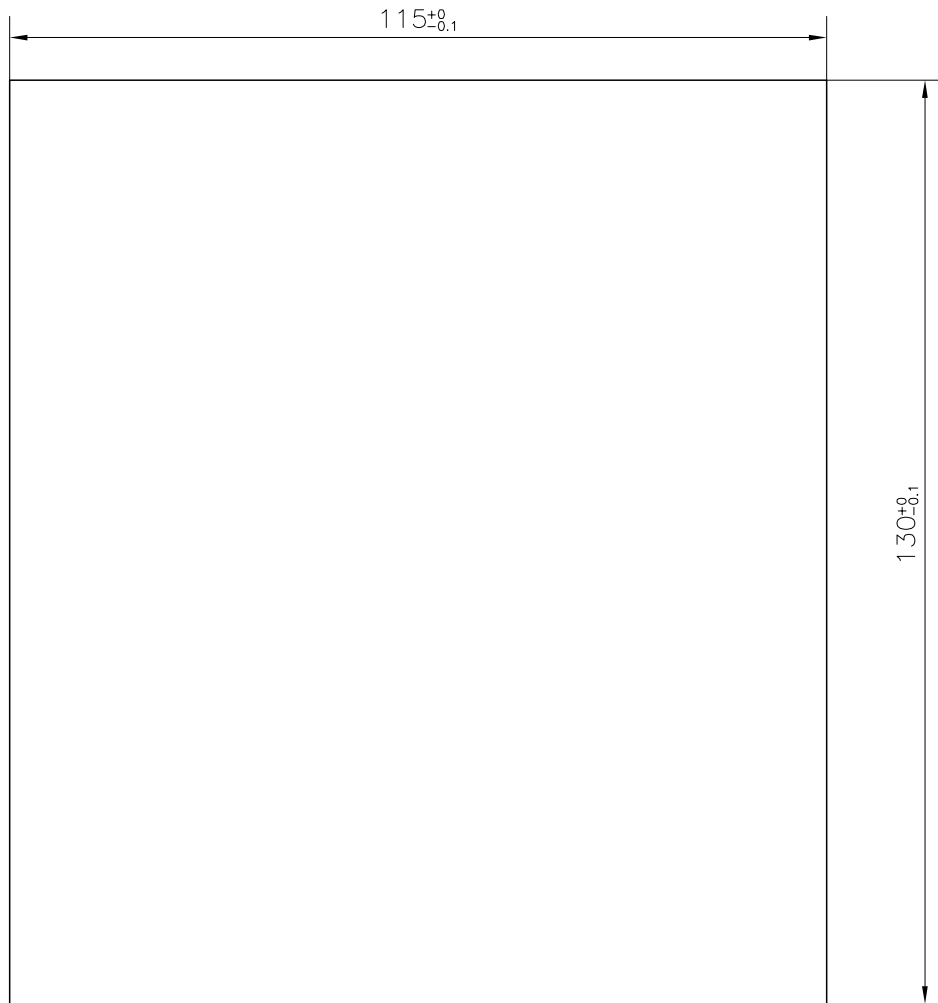
Planos:

N8 / (N7)



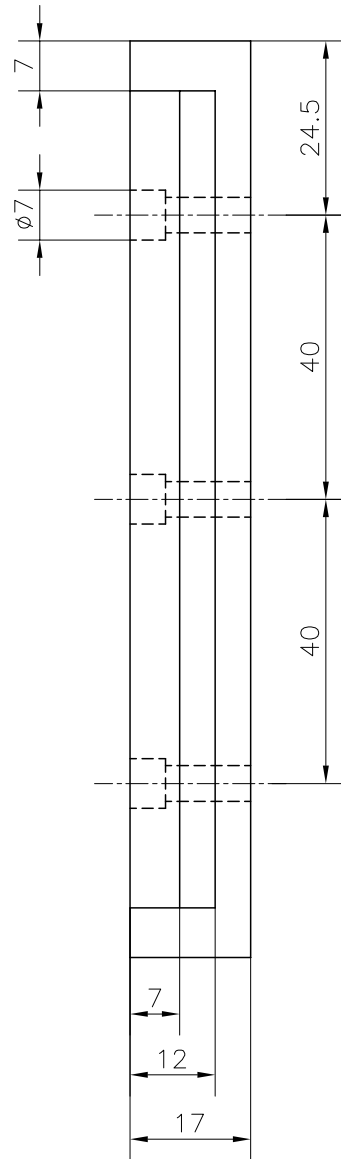
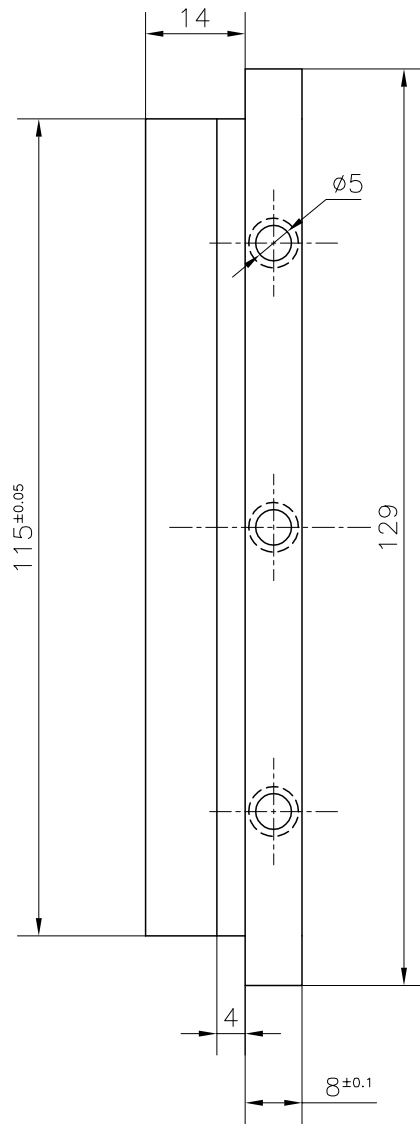
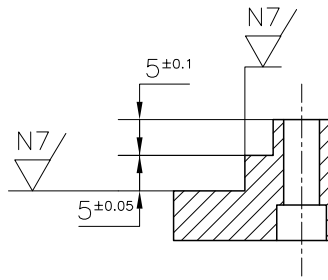
| | | | | |
|---------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| TRAT. TERMICO | NINGUNO | ESCALA | CARRERA DE INGENIERIA MECANICA | |
| No. de Piezas | 1 | | DIB. | Páez Juan |
| MATERIAL: | ACERO AISI 1010 | Tol. Gral. ±0.5 | 1:1 | DIS. |
| | | | REV. | Guerrero Víctor |
| BASE MOLDE | | MT.001.01 | | Fecha: |

N8 / (N7 /)



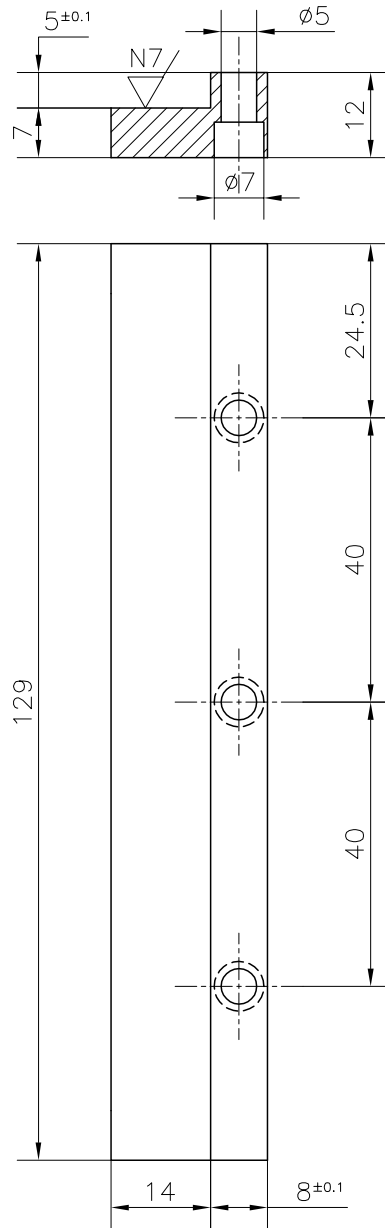
| | | | | |
|---------------|-------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| TRAT. TERMICO | NINGUNO | | CARRERA DE | |
| No. de Piezas | 1 | | INGENIERIA MECANICA | |
| MATERIAL: | DURALUMINIO | Tol. Gral. ±0.5 | ESCALA | DIB. Páez Juan |
| | | | 1:1 | DIS. |
| | | | | REV. Guerrero Víctor |
| MACHO MOLDE | | MT.001.02 | | Fecha: |

N8 / (N7)



| | | | | |
|---------------|-----------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
| TRAT. TERMICO | NINGUNO | | CARRERA DE INGENIERIA MECANICA | |
| No. de Piezas | 2 | | DIB. | Páez Juan |
| MATERIAL: | ACERO AISI 1010 | Tol. Gral. ± 0.5 | ESCALA | DIS. |
| | | | 1:1 | REV. Guerrero Víctor |
| PARED FRONTAL | | MT.001.03 | | Fecha: |

N8 / (N7)



| | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|-----------|-----------------|
| TRAT. TERMICO | NINGUNO | | CARRERA DE INGENIERIA MECANICA | | |
| No. de Piezas | 2 | | DIB. | Páez Juan | |
| MATERIAL: | ACERO AISI 1010 | Tol. Gral. ±0.5 | ESCALA | | |
| | | | 1:1 | DIS. | |
| | | | | REV. | Guerrero Víctor |
| PARED POSTERIOR | | MT.001.04 | | Fecha: | |

ANEXO 5. RESULTADOS PARA LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN DE LA ETAPA DE COMPOSICIÓN DEL MATERIAL

A5.1. COMPUESTOS DE FIBRA DISCONTINUA

| Prueba 1510 (15%, 10 mm) | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 6.516 | 23.84 | 935.85 |
| 2 | 6.451 | 21.10 | 772.28 |
| 3 | 6.051 | 23.20 | 937.52 |
| 4 | 6.366 | 23.05 | 886.04 |
| 5 | 5.992 | 24.59 | 794.15 |
| Media | 6.275 | 23.16 | 865.167 |
| Desv. Est. | 0.239 | 1.30 | 78.005 |
| Prueba 2010 (20%, 10 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 6.324 | 21.33 | 732.95 |
| 2 | 6.718 | 20.22 | 925.85 |
| 3 | 6.180 | 19.74 | 768.55 |
| 4 | 5.187 | 20.90 | 753.84 |
| 5 | 6.258 | 20.39 | 708.14 |
| Media | 6.133 | 20.52 | 777.87 |
| Desv. Est. | 0.568 | 0.61 | 85.79 |
| Prueba 3010 (30%, 10 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.262 | 19.65 | 619.59 |
| 2 | 4.522 | 20.29 | 790.81 |
| 3 | 4.383 | 19.73 | 755.02 |
| 4 | 4.515 | 20.48 | 870.83 |
| 5 | 4.322 | 20.60 | 805.23 |
| Media | 4.401 | 20.15 | 768.30 |
| Desv. Est. | 0.116 | 0.43 | 93.11 |
| Prueba 3510 (35%, 10 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.774 | 18.31 | 761.29 |
| 2 | 4.729 | 18.83 | 790.03 |
| 3 | 4.658 | 18.88 | 837.20 |
| 4 | 4.663 | 19.68 | 724.91 |
| 5 | 4.894 | 19.86 | 829.74 |
| Media | 4.744 | 19.11 | 788.63 |
| Desv. Est. | 0.097 | 0.64 | 47.06 |
| Prueba 1520 (15%, 20 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.945 | 27.75 | 701.28 |
| 2 | 5.827 | 27.46 | 594.09 |
| 3 | 5.648 | 27.56 | 593.31 |

| 4 | 6.021 | 27.22 | 601.25 |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| 5 | 5.889 | 28.15 | 691.27 |
| Media | 5.866 | 27.627 | 636.24 |
| Desv. Est. | 0.141 | 0.35 | 55.01 |
| Prueba 2020 (20%, 20 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.458 | 24.39 | 671.76 |
| 2 | 4.267 | 24.42 | 651.56 |
| 3 | 5.059 | 23.43 | 706.97 |
| 4 | 4.536 | 24.26 | 673.03 |
| 5 | 4.454 | 24.28 | 637.63 |
| Media | 4.555 | 24.16 | 668.19 |
| Desv. Est. | 0.299 | 0.41 | 26.22 |
| Prueba 3020 (30%, 20 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.408 | 25.70 | 872.60 |
| 2 | 5.123 | 24.12 | 866.13 |
| 3 | 5.489 | 25.85 | 872.89 |
| 4 | 5.429 | 24.98 | 865.74 |
| 5 | 4.981 | 25.63 | 839.75 |
| Media | 5.286 | 25.26 | 863.42 |
| Desv. Est. | 0.221 | 0.72 | 13.67 |
| Prueba 3520 (35%, 20 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.232 | 25.63 | 1272.91 |
| 2 | 4.099 | 25.55 | 1154.25 |
| 3 | 4.200 | 26.53 | 1126.79 |
| 4 | 4.289 | 27.41 | 1299.39 |
| 5 | 4.241 | 25.95 | 1251.33 |
| Media | 4.212 | 26.21 | 1220.93 |
| Desv. Est. | 0.071 | 0.77 | 75.98 |
| Prueba 1530 (15%, 30 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.401 | 33.87 | 795.03 |
| 2 | 5.710 | 33.64 | 957.92 |
| 3 | 5.543 | 31.07 | 910.26 |
| 4 | 5.943 | 33.50 | 761.10 |
| 5 | 5.522 | 29.52 | 750.80 |
| Media | 5.624 | 32.32 | 835.02 |
| Desv. Est. | 0.210 | 1.93 | 93.44 |

| Prueba 2030 (20%, 30 mm) | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.041 | 27.94 | 883.00 |
| 2 | 5.182 | 25.74 | 831.51 |
| 3 | 4.853 | 26.12 | 857.89 |
| 4 | 5.153 | 27.94 | 834.75 |
| 5 | 5.024 | 28.17 | 943.99 |
| Media | 5.051 | 27.18 | 870.23 |
| Desv. Est. | 0.130 | 1.16 | 46.12 |
| Prueba 3030 (30%, 30 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.193 | 24.95 | 914.18 |
| 2 | 3.895 | 21.82 | 883.98 |
| 3 | 4.305 | 21.12 | 950.96 |

| 4 | 4.066 | 23.63 | 845.53 |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| 5 | 4.141 | 21.47 | 863.09 |
| Media | 4.120 | 22.60 | 891.55 |
| Desv. Est. | 0.153 | 1.63 | 41.91 |
| Prueba 3530 (35%, 30 mm) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 3.742 | 25.08 | 1055.20 |
| 2 | 4.172 | 25.62 | 951.84 |
| 3 | 3.887 | 21.73 | 992.44 |
| 4 | 4.182 | 26.02 | 936.83 |
| 5 | 3.532 | 21.50 | 959.19 |
| Media | 3.903 | 23.99 | 979.10 |
| Desv. Est. | 0.280 | 2.19 | 47.16 |

A5.2. COMPUESTOS DE FIBRA CONTINUA

| Prueba FC15 (15%, Fibra continua) | | | |
|--|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 6.00 | 66.71 | 1229 |
| 2 | 6.30 | 57.46 | 1264 |
| 3 | 6.40 | 65.59 | 1229 |
| 4 | 6.08 | 61.82 | 1165 |
| 5 | 6.80 | 56.69 | 1095 |
| Media | 6.31 | 61.65 | 1196.4 |
| Desv. Est. | 0.32 | 4.56 | 67.0 |
| Prueba FC20 (20%, Fibra continua) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 6.40 | 34.27 | 837.9 |
| 2 | 6.00 | 76.80 | 1470 |
| 3 | 7.40 | 56.27 | 1051 |
| 4 | 6.75 | 55.66 | 1188 |
| 5 | 6.40 | 38.20 | 893.6 |
| Media | 6.59 | 52.24 | 1088.1 |
| Desv. Est. | 0.53 | 16.96 | 253.8 |
| Prueba FC30 (30%, Fibra continua) | | | |

| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
|--|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| 1 | 7.20 | 72.30 | 1347 |
| 2 | 7.94 | 81.84 | 1397 |
| 3 | 7.60 | 67.75 | 1448 |
| 4 | 6.26 | 80.30 | 1622 |
| 5 | 7.28 | 53.08 | 1312 |
| Media | 7.26 | 71.05 | 1425.2 |
| Desv. Est. | 0.63 | 11.59 | 121.4 |
| Prueba FC35 (35%, Fibra continua) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 10.08 | 128.2 | 1830 |
| 2 | 8.51 | 163 | 2122 |
| 3 | 8.19 | 129.3 | 2140 |
| 4 | 8.81 | 161.7 | 1761 |
| 5 | 9.47 | 127.1 | 1978 |
| Media | 9.01 | 141.86 | 1966.2 |
| Desv. Est. | 0.76 | 18.73 | 169.8 |

ANEXO 6. RESULTADOS PARA LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN DE LA ETAPA DE COMPOSICIÓN DEL MATERIAL

A6.1. COMPUESTOS DE FIBRA CORTA

| Prueba 1510 (15%, 10 mm) | | |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%} (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 38.59 | 1465 |
| 2 | 41.58 | 1414 |
| 3 | 38.93 | 1405 |
| 4 | 44.01 | 1269 |
| 5 | 41.54 | 1391 |
| Media | 40.93 | 1388.8 |
| Desv. Est. | 2.22 | 72.6 |
| Prueba 2010 (20%, 10 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%} (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 43.72 | 1765 |
| 2 | 43.51 | 1693 |
| 3 | 44.44 | 1649 |
| 4 | 44.26 | 1626 |
| 5 | 43.43 | 1565 |
| Media | 43.87 | 1659.6 |
| Desv. Est. | 0.45 | 74.9 |
| Prueba 3010 (30%, 10 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%} (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 42.99 | 1568 |
| 2 | 33.61 | 1863 |
| 3 | 46.03 | 1871 |
| 4 | 50.72 | 1787 |
| 5 | 42.44 | 1420 |
| Media | 43.16 | 1701.8 |
| Desv. Est. | 6.27 | 141.3 |
| Prueba 3510 (35%, 10 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%} (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 32.91 | 1406 |
| 2 | 36.65 | 1383 |
| 3 | 31.64 | 1535 |
| 4 | 36.18 | 1387 |
| 5 | 32.09 | 1499 |
| Media | 33.89 | 1442.0 |
| Desv. Est. | 2.35 | 70.2 |
| Prueba 1520 (15%, 20 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%} (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 40.93 | 1203 |
| 2 | 45.88 | 1451 |
| 3 | 46.08 | 1286 |

| 4 | 41.92 | 1283 |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 5 | 47.28 | 1690 |
| Media | 44.42 | 1382.6 |
| Desv. Est. | 2.81 | 194.1 |
| Prueba 2020 (20%, 20 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%} (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 48.94 | 1523 |
| 2 | 45.49 | 1579 |
| 3 | 47.59 | 1623 |
| 4 | 46.36 | 1870 |
| 5 | 48.94 | 1882 |
| Media | 47.46 | 1695.4 |
| Desv. Est. | 1.54 | 168.7 |
| Prueba 3020 (30%, 20 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%} (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 35.68 | 1345 |
| 2 | 42.05 | 1849 |
| 3 | 41.13 | 1695 |
| 4 | 39.96 | 2095 |
| 5 | 41.60 | 1542 |
| Media | 40.08 | 1705.2 |
| Desv. Est. | 2.58 | 286.8 |
| Prueba 3520 (35%, 20 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%} (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 40.76 | 1666 |
| 2 | 38.84 | 1574 |
| 3 | 43.53 | 1410 |
| 4 | 40.63 | 1548 |
| 5 | 46.90 | 1394 |
| Media | 42.13 | 1518.4 |
| Desv. Est. | 3.15 | 115.1 |
| Prueba 1530 (15%, 30 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%} (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 4.73 | 52.53 |
| 2 | 4.94 | 51.86 |
| 3 | 4.68 | 45.62 |
| 4 | 4.71 | 50.75 |
| 5 | 4.85 | 48.21 |
| Media | 4.78 | 49.79 |
| Desv. Est. | 0.11 | 2.86 |

| Prueba 2030 (20%, 30 mm) | | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 43.86 | 1258 |
| 2 | 49.56 | 1264 |
| 3 | 45.43 | 1646 |
| 4 | 42.11 | 1301 |
| 5 | 45.69 | 1289 |
| Media | 45.33 | 1351.6 |
| Desv. Est. | 2.76 | 165.5 |
| Prueba 3030 (30%, 30 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 41.20 | 1448 |
| 2 | 36.11 | 1450 |
| 3 | 47.39 | 1577 |

| 4 | 40.91 | 1336 |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 5 | 38.03 | 1632 |
| Media | 40.73 | 1488.6 |
| Desv. Est. | 4.28 | 117.1 |
| Prueba 3530 (35%, 30 mm) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 38.76 | 1637 |
| 2 | 36.40 | 1423 |
| 3 | 42.11 | 1472 |
| 4 | 36.89 | 1676 |
| 5 | 39.59 | 1556 |
| Media | 38.75 | 1552.8 |
| Desv. Est. | 2.29 | 106.8 |

A6.2. COMPUESTOS DE FIBRA CONTINUA

| Prueba FC15 (15%, Fibra continua) | | |
|--|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 53.69 | 1252 |
| 2 | 52.90 | 1282 |
| 3 | 51.27 | 1275 |
| 4 | 53.18 | 1215 |
| 5 | 50.56 | 1209 |
| Media | 52.32 | 1246.6 |
| Desv. Est. | 1.34 | 33.5 |
| Prueba FC20 (20%, Fibra continua) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 61.35 | 1741 |
| 2 | 51.58 | 1419 |
| 3 | 59.31 | 1482 |
| 4 | 50.28 | 1503 |
| 5 | 62.10 | 1737 |
| Media | 56.92 | 1576.4 |
| Desv. Est. | 5.58 | 151.6 |
| Prueba FC30 (30%, Fibra continua) | | |

| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
|--|-----------------------|-----------------------------|
| 1 | 81.99 | 2153 |
| 2 | 83.21 | 2711 |
| 3 | 79.47 | 2653 |
| 4 | 86.32 | 2149 |
| 5 | 80.67 | 2609 |
| Media | 82.33 | 2455.0 |
| Desv. Est. | 2.63 | 279.7 |
| Prueba FC35 (35%, Fibra continua) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 80.38 | 3434 |
| 2 | 81.98 | 3346 |
| 3 | 85.52 | 2703 |
| 4 | 86.83 | 2262 |
| 5 | | |
| Media | 83.68 | 2936.2 |
| Desv. Est. | 3.00 | 555.2 |

ANEXO 7. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN PARA LAS PRUEBAS REALIZADAS EN LA ETAPA DE PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO.

A7.1. FASE DE MOLDEO

| Prueba P001 (Composición 1) | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 3.742 | 25.08 | 1055.20 |
| 2 | 4.172 | 25.62 | 951.84 |
| 3 | 3.887 | 28.76 | 992.44 |
| 4 | 4.182 | 26.02 | 936.83 |
| 5 | 3.532 | 30.47 | 959.19 |
| Media | 3.903 | 27.19 | 979.10 |
| Desv. Est. | 0.280 | 2.32 | 47.16 |
| Prueba P002 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 6.000 | 23.26 | 1149 |
| 2 | 5.187 | 23.70 | 1082 |
| 3 | 6.000 | 23.05 | 1045 |
| 4 | 5.600 | 27.02 | 1104 |
| 5 | 5.085 | 24.08 | 1102 |
| Media | 5.574 | 24.22 | 1096 |
| Desv. Est. | 0.434 | 1.61 | 38 |
| Prueba P003 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.800 | 21.93 | 1118 |
| 2 | 4.800 | 26.01 | 1046 |
| 3 | 5.600 | 21.34 | 966.1 |
| 4 | 5.026 | 22.48 | 1133 |
| 5 | 5.600 | 20.82 | 1110 |
| Media | 5.165 | 22.52 | 1075 |
| Desv. Est. | 0.407 | 2.05 | 69 |
| Prueba P004 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.800 | 25.56 | 1035 |
| 2 | 4.800 | 26.71 | 988 |
| 3 | 4.281 | 23.77 | 1052 |
| 4 | 4.800 | 28.20 | 902 |
| 5 | 4.268 | 26.32 | 1068 |
| Media | 4.590 | 26.11 | 1009 |
| Desv. Est. | 0.288 | 1.62 | 67 |
| Prueba P005 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.800 | 30.98 | 1074 |
| 2 | 4.800 | 28.90 | 1170 |
| 3 | 4.519 | 29.55 | 1065 |

| 4 | 4.400 | 26.29 | 1118 |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| 5 | 4.196 | 25.49 | 1052 |
| Media | 4.543 | 28.24 | 1096 |
| Desv. Est. | 0.262 | 2.29 | 48 |
| Prueba P006 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.11 | 29.13 | 1100 |
| 2 | 4.269 | 32.97 | 1198 |
| 3 | 4.4 | 32.98 | 1172 |
| 4 | 4.4 | 29.82 | 1042 |
| 5 | 3.978 | 30.44 | 1035 |
| Media | 4.231 | 31.07 | 1109 |
| Desv. Est. | 0.185 | 1.80 | 74 |
| Prueba P007 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.528 | 22.88 | 1031 |
| 2 | 4.673 | 25.77 | 1020 |
| 3 | 5.028 | 26.68 | 1072 |
| 4 | 5.148 | 26.78 | 967 |
| 5 | | 23.21 | 1091 |
| Media | 4.844 | 25.06 | 1036 |
| Desv. Est. | 0.292 | 1.89 | 48 |
| Prueba P008 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.178 | 23.44 | 1074 |
| 2 | 3.962 | 25.72 | 1150 |
| 3 | 4.675 | 23.51 | 1143 |
| 4 | 4.461 | 25.96 | 1010 |
| 5 | 4.000 | 23.96 | 1163 |
| Media | 4.255 | 24.52 | 1108 |
| Desv. Est. | 0.306 | 1.23 | 65 |
| Prueba P009 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.632 | 28.17 | 1069 |
| 2 | 4.764 | 30.47 | 1074 |
| 3 | 4.955 | 27.51 | 1083 |
| 4 | 4.800 | 29.29 | 1067 |
| 5 | 4.916 | 29.01 | 1125 |
| Media | 4.813 | 28.89 | 1084 |
| Desv. Est. | 0.129 | 1.13 | 24 |

| Prueba P010 (Composición 2) | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.406 | 23.80 | 887.8 |
| 2 | 4.743 | 25.70 | 869.8 |
| 3 | 4.592 | 24.12 | 907.5 |
| 4 | 4.312 | 25.85 | 904.2 |
| 5 | 4.753 | 24.97 | 918.5 |
| Media | 4.561 | 24.89 | 897.6 |
| Desv. Est. | 0.198 | 0.92 | 19.0 |
| Prueba P011 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.353 | 28.73 | 858.6 |
| 2 | 5.200 | 28.62 | 981.7 |
| 3 | 6.000 | 26.84 | 1029 |
| 4 | 5.600 | 29.67 | 930.5 |
| 5 | 5.200 | 28.07 | 1014 |
| Media | 5.471 | 28.39 | 962.8 |
| Desv. Est. | 0.338 | 1.04 | 69.4 |
| Prueba P012 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.600 | 28.42 | 1007 |
| 2 | 5.200 | 27.25 | 1074 |
| 3 | 5.200 | 25.34 | 1044 |
| 4 | 5.452 | 27.64 | 967.1 |
| 5 | 4.780 | 27.92 | 937.2 |
| Media | 5.246 | 27.31 | 1006 |
| Desv. Est. | 0.312 | 1.18 | 56 |
| Prueba P013 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.630 | 24.34 | 984.3 |
| 2 | 5.200 | 24.57 | 991.6 |
| 3 | 5.200 | 28.92 | 944.9 |
| 4 | 4.840 | 28.77 | 1137 |
| 5 | 4.453 | 26.56 | 1023 |
| Media | 4.865 | 26.63 | 1016 |
| Desv. Est. | 0.335 | 2.20 | 73 |
| Prueba P014 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.882 | 28.23 | 1166 |
| 2 | 4.800 | 28.11 | 1134 |
| 3 | 4.777 | 30.20 | 1115 |
| 4 | 4.800 | 28.97 | 1055 |
| 5 | 5.182 | 27.48 | 1156 |
| Media | 4.888 | 28.60 | 1125 |

| Desv. Est. | 0.169 | 1.04 | 44 |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| Prueba P015 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.008 | 23.90 | 998.9 |
| 2 | 4.551 | 26.96 | 908.5 |
| 3 | 4.936 | 25.17 | 906.9 |
| 4 | 4.817 | 24.34 | 886.7 |
| 5 | 4.040 | 27.08 | 952.4 |
| Media | 4.470 | 25.49 | 930.7 |
| Desv. Est. | 0.431 | 1.47 | 45.0 |
| Prueba P016 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.440 | 23.60 | 862.6 |
| 2 | 4.633 | 25.89 | 908.3 |
| 3 | 4.731 | 25.06 | 889.5 |
| 4 | 4.181 | 25.60 | 873.9 |
| 5 | 4.800 | 24.35 | 933.7 |
| Media | 4.557 | 24.90 | 893.6 |
| Desv. Est. | 0.250 | 0.93 | 28.2 |
| Prueba P017 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.379 | 25.89 | 1005 |
| 2 | 4.332 | 24.98 | 954.6 |
| 3 | 4.224 | 24.39 | 977.1 |
| 4 | 4.372 | 24.82 | 956.8 |
| 5 | 4.716 | 25.05 | 1011 |
| Media | 4.405 | 25.03 | 980.9 |
| Desv. Est. | 0.185 | 0.55 | 26.3 |
| Prueba P018 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.603 | 24.15 | 831.4 |
| 2 | 4.017 | 21.50 | 793.3 |
| 3 | 4.412 | 23.27 | 879.7 |
| 4 | 4.672 | 24.42 | 867.5 |
| 5 | 4.130 | 21.13 | 820.1 |
| Media | 4.367 | 22.89 | 838.4 |
| Desv. Est. | 0.287 | 1.51 | 35.3 |
| Prueba P013-A (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 6.000 | 30.79 | 1012 |
| 2 | 5.473 | 29.25 | 1013 |
| 3 | 6.000 | 30.00 | 1061 |
| 4 | 5.285 | 29.29 | 1028 |

| | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| 5 | 6.000 | 30.91 | 1045 |
| Media | 5.752 | 30.05 | 1032 |
| Desv. Est. | 0.347 | 0.79 | 21 |
| Prueba P014-A (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.443 | 24.85 | 970.3 |

| | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2 | 4.692 | 25.12 | 964.9 |
| 3 | 4.440 | 23.29 | 896.5 |
| 4 | 4.498 | 24.13 | 900.3 |
| 5 | 5.218 | 24.53 | 885.8 |
| Media | 4.858 | 24.38 | 923.6 |
| Desv. Est. | 0.448 | 0.71 | 40.6 |

A7.2. FASE DE PRECALENTAMIENTO

| Prueba P019 (Composición 1) | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.480 | 27.69 | 1034 |
| 2 | 4.499 | 30.30 | 940.0 |
| 3 | 4.440 | 27.19 | 974.1 |
| 4 | 4.330 | 27.90 | 1049 |
| 5 | 4.490 | 28.22 | 947.8 |
| Media | 4.448 | 28.26 | 989.0 |
| Desv. Est. | 0.070 | 1.20 | 49.9 |
| Prueba P020 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.361 | 29.34 | 1076 |
| 2 | 4.476 | 28.14 | 1044 |
| 3 | 4.822 | 27.03 | 1028 |
| 4 | 4.570 | 29.82 | 1039 |
| 5 | 4.560 | 27.61 | 1076 |
| Media | 4.558 | 28.39 | 1053 |
| Desv. Est. | 0.170 | 1.17 | 22 |
| Prueba P021 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.121 | 29.11 | 1182 |
| 2 | 5.200 | 28.67 | 1225 |
| 3 | 5.200 | 32.24 | 1183 |
| 4 | 5.060 | 30.72 | 1115 |
| 5 | 5.027 | 31.48 | 1219 |
| Media | 5.122 | 30.44 | 1185 |
| Desv. Est. | 0.079 | 1.52 | 44 |

| Prueba P022 (Composición 1) | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.800 | 30.98 | 1074 |
| 2 | 4.800 | 28.90 | 1170 |
| 3 | 4.519 | 29.55 | 1065 |
| 4 | 4.400 | 26.29 | 1118 |
| 5 | 4.196 | 25.49 | 1052 |
| Media | 4.543 | 28.24 | 1096 |
| Desv. Est. | 0.262 | 2.29 | 48 |
| Prueba P023 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.800 | 30.23 | 103 |
| 2 | 4.537 | 27.87 | 992.0 |
| 3 | 4.800 | 29.93 | 827.5 |
| 4 | 3.888 | 31.04 | 1023 |
| 5 | 4.800 | 28.70 | 1013 |
| Media | 4.565 | 29.55 | 977.9 |
| Desv. Est. | 0.395 | 1.26 | 85.5 |
| Prueba P024 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.400 | 29.53 | 1150 |
| 2 | 4.400 | 30.88 | 1214 |
| 3 | 4.060 | 34.15 | 1170 |
| 4 | 4.147 | 30.91 | 1200 |
| 5 | 4.690 | 34.53 | 1181 |
| Media | 4.339 | 32.00 | 1183 |
| Desv. Est. | 0.248 | 2.21 | 25 |

| Prueba P028 (Composición 2) | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 6.400 | 29.61 | 900.9 |
| 2 | 6.057 | 29.36 | 922.8 |
| 3 | 6.352 | 28.90 | 872.7 |

| | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 4 | 5.650 | 28.97 | 938.6 |
| 5 | 5.658 | 28.31 | 893.4 |
| Media | 6.023 | 29.03 | 905.7 |
| Desv. Est. | 0.362 | 0.50 | 25.7 |

| Prueba P029 (Composición 2) | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.455 | 29.68 | 904.6 |
| 2 | 5.062 | 26.84 | 1006 |
| 3 | 5.141 | 28.01 | 899.0 |
| 4 | 5.164 | 26.51 | 860.0 |
| 5 | 5.794 | 24.66 | 798.3 |
| Media | 5.323 | 27.14 | 893.6 |
| Desv. Est. | 0.302 | 1.86 | 75.8 |
| Prueba P030 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.446 | 30.05 | 979.0 |
| 2 | 5.248 | 29.49 | 930.1 |
| 3 | 4.582 | 30.46 | 935.5 |
| 4 | 4.856 | 30.48 | 969.3 |
| 5 | 5.115 | 28.26 | 964.4 |
| Media | 5.049 | 29.75 | 955.7 |
| Desv. Est. | 0.338 | 0.92 | 21.6 |
| Prueba P031(Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.882 | 28.23 | 1166 |
| 2 | 4.800 | 28.11 | 1134 |
| 3 | 4.777 | 30.20 | 1115 |

| 4 | 4.800 | 28.97 | 1055 |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| 5 | 5.182 | 27.48 | 1156 |
| Media | 4.888 | 28.60 | 1125 |
| Desv. Est. | 0.169 | 1.04 | 44 |
| Prueba P032 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.646 | 31.09 | 1078 |
| 2 | 5.600 | 32.58 | 1048 |
| 3 | 5.600 | 31.92 | 1035 |
| 4 | 6.045 | 31.38 | 1038 |
| 5 | 5.848 | 32.68 | 999.7 |
| Media | 5.748 | 31.93 | 1040 |
| Desv. Est. | 0.195 | 0.71 | 28 |
| Prueba P033 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.578 | 28.27 | 1200 |
| 2 | 5.200 | 30.80 | 1091 |
| 3 | 4.680 | 25.08 | 1171 |
| 4 | 5.213 | 31.25 | 1182 |
| 5 | 4.958 | 30.99 | 1100 |
| Media | 4.926 | 29.28 | 1149 |
| Desv. Est. | 0.292 | 2.64 | 50 |

A7.3. FASE DE ENFRIAMIENTO

| Prueba P034 (Composición 1) | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.121 | 29.11 | 1182 |
| 2 | 5.2 | 28.67 | 1225 |
| 3 | 5.2 | 32.24 | 1183 |
| 4 | 5.06 | 30.72 | 1115 |
| 5 | 5.027 | 31.48 | 1219 |
| Media | 5.122 | 30.44 | 1185 |
| Desv. Est. | 0.079 | 1.52 | 44 |
| Prueba P035 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.600 | 41.32 | 1299 |
| 2 | 5.767 | 38.24 | 1354 |
| 3 | 6.000 | 43.62 | 1223 |

| 4 | 5.070 | 40.52 | 1281 |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| 5 | 5.600 | 36.92 | 1321 |
| Media | 5.607 | 40.12 | 1296 |
| Desv. Est. | 0.342 | 2.63 | 49 |
| Prueba P036 (Composición 1) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.662 | 36.59 | 1223 |
| 2 | 5.388 | 38.66 | 1084 |
| 3 | 5.200 | 35.90 | 1150 |
| 4 | 5.318 | 35.64 | 1148 |
| 5 | 4.800 | 39.77 | 1262 |
| Media | 5.274 | 37.31 | 1173 |
| Desv. Est. | 0.314 | 1.81 | 70 |

| Prueba P037 (Composición 2) | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 5.646 | 31.09 | 1078 |
| 2 | 5.600 | 32.58 | 1048 |
| 3 | 5.600 | 31.92 | 1035 |
| 4 | 6.045 | 31.38 | 1038 |
| 5 | 5.848 | 32.68 | 1000 |
| Media | 5.748 | 31.93 | 1040 |
| Desv. Est. | 0.195 | 0.71 | 28 |
| Prueba P038 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 4.838 | 30.98 | 1090 |
| 2 | 4.946 | 32.03 | 1095 |
| 3 | 4.999 | 31.60 | 1150 |

| 4 | 5.060 | 33.24 | 1261 |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| 5 | 4.580 | 34.71 | 1172 |
| Media | 4.885 | 32.51 | 1154 |
| Desv. Est. | 0.189 | 1.48 | 70 |
| Prueba P039 (Composición 2) | | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Deformación al Smáx (%)</i> | <i>Smáx (MPa)</i> | <i>Módulo (MPa)</i> |
| 1 | 6.000 | 35.51 | 1104 |
| 2 | 5.600 | 34.29 | 1010 |
| 3 | 6.000 | 36.06 | 1035 |
| 4 | 6.000 | 35.55 | 1002 |
| 5 | 5.600 | 36.16 | 1135 |
| Media | 5.840 | 35.51 | 1057 |
| Desv. Est. | 0.219 | 0.74 | 59 |

ANEXO 8. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN PARA LAS PRUEBAS REALIZADAS EN LA ETAPA DE PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO

A8.1. FASE DE MOLDEO

| Prueba P001 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 38.76 | 1637 |
| 2 | 36.40 | 1423 |
| 3 | 42.11 | 1472 |
| 4 | 36.89 | 1676 |
| 5 | 39.59 | 1556 |
| Media | 38.75 | 1553 |
| Desv. Est. | 2.29 | 107 |
| Prueba P002 (Composición 1) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 44.26 | 1757 |
| 2 | 45.88 | 1762 |
| 3 | 42.79 | 1945 |
| 4 | 40.68 | 1945 |
| 5 | 47.01 | 1822 |
| Media | 44.12 | 1846 |
| Desv. Est. | 2.50 | 94 |
| Prueba P003 (Composición 1) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 52.44 | 1900 |
| 2 | 51.05 | 1699 |
| 3 | 53.30 | 2045 |
| 4 | 49.52 | 1852 |
| 5 | 46.86 | 1856 |
| Media | 50.63 | 1870 |
| Desv. Est. | 2.55 | 124 |
| Prueba P004 (Composición 1) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 46.33 | 1504 |
| 2 | 41.60 | 1644 |
| 3 | 46.73 | 1671 |
| 4 | 52.65 | 1881 |
| 5 | 50.71 | |
| Media | 47.60 | 1675 |
| Desv. Est. | 4.29 | 156 |

| Prueba P005 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 53.68 | 2099 |
| 2 | 53.52 | 2367 |
| 3 | 52.28 | 2205 |
| 4 | 55.88 | 1857 |
| 5 | 54.88 | |
| Media | 54.05 | 2132 |
| Desv. Est. | 1.38 | 214 |
| Prueba P006 (Composición 1) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 56.84 | 2124 |
| 2 | 52.35 | 2394 |
| 3 | 60.01 | 2132 |
| 4 | 53.12 | 2108 |
| 5 | 53.72 | 2167 |
| Media | 55.21 | 2185 |
| Desv. Est. | 3.18 | 119 |
| Prueba P007 (Composición 1) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 42.33 | 1649 |
| 2 | 39.99 | 1895 |
| 3 | 44.83 | 1954 |
| 4 | 50.86 | 2212 |
| 5 | 47.09 | |
| Media | 45.02 | 1928 |
| Desv. Est. | 4.21 | 231 |
| Prueba P008 (Composición 1) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 51.42 | 2155 |
| 2 | 43.51 | 2141 |
| 3 | 42.77 | 1846 |
| 4 | 50.77 | 2077 |
| 5 | 47.85 | 2220 |
| Media | 47.26 | 2088 |
| Desv. Est. | 4.01 | 144 |

| Prueba P009 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 45.18 | 1877 |
| 2 | 39.96 | 1950 |

| | | |
|--------------|--------------|-------------|
| 3 | 45.91 | 2187 |
| 4 | 42.28 | 2098 |
| 5 | 42.95 | 2205 |
| Media | 43.26 | 2063 |
| Desv. Est. | 2.38 | 145 |

| Prueba P010 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 46.97 | 1846 |
| 2 | 47.18 | 1609 |
| 3 | 42.52 | 1881 |
| 4 | 44.77 | 1964 |
| 5 | | 1849 |
| Media | 45.36 | 1830 |
| Desv. Est. | 2.18 | 132 |

| Prueba P014 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 48.54 | 1580 |
| 2 | 46.73 | 1641 |
| 3 | 45.90 | 1674 |
| 4 | 46.42 | 1611 |
| 5 | 48.11 | 1589 |
| Media | 47.14 | 1619 |
| Desv. Est. | 1.13 | 39 |

| Prueba P011 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 47.86 | 1559 |
| 2 | 48.21 | 1498 |
| 3 | 45.92 | 1484 |
| 4 | 39.05 | 1489 |
| 5 | 44.85 | 1456 |
| Media | 45.18 | 1497 |
| Desv. Est. | 3.69 | 38 |

| Prueba P015 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 40.73 | 1506 |
| 2 | 41.13 | 1481 |
| 3 | 40.64 | 1662 |
| 4 | 41.63 | 1520 |
| 5 | 46.03 | 1546 |
| Media | 42.03 | 1543 |
| Desv. Est. | 2.27 | 71 |

| Prueba P012 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 48.42 | |
| 2 | 50.17 | 1446 |
| 3 | 46.04 | 1746 |
| 4 | 46.77 | 1532 |
| 5 | 48.00 | 1678 |
| Media | 47.88 | 1601 |
| Desv. Est. | 1.59 | 136 |

| Prueba P016 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 39.43 | 1430 |
| 2 | 42.74 | 1405 |
| 3 | 38.90 | 1386 |
| 4 | 38.82 | 1264 |
| 5 | 42.52 | 1393 |
| Media | 40.48 | 1376 |
| Desv. Est. | 1.98 | 65 |

| Prueba P013 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 42.90 | 1551 |
| 2 | 44.75 | 1481 |
| 3 | 41.70 | 1646 |
| 4 | 39.99 | 1508 |
| 5 | 43.84 | 1769 |
| Media | 42.64 | 1591 |
| Desv. Est. | 1.86 | 118 |

| Prueba P017 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 48.21 | 1603 |
| 2 | 43.95 | 1888 |
| 3 | 45.25 | |
| 4 | 46.07 | 1740 |
| 5 | 44.33 | 1559 |
| Media | 45.56 | 1698 |
| Desv. Est. | 1.69 | 149 |

| Prueba P018 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 41.63 | 1865 |
| 2 | 51.64 | 1897 |

| | | |
|--------------|--------------|-------------|
| 3 | 45.54 | 1992 |
| 4 | 48.71 | 1622 |
| 5 | 40.84 | 1772 |
| Media | 45.67 | 1830 |
| Desv. Est. | 4.60 | 140 |

A8.2. FASE DE PRECALENTAMIENTO

| Prueba P019 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 44.91 | 1740 |
| 2 | 40.40 | 1615 |
| 3 | 39.40 | 1474 |
| 4 | 40.69 | 1695 |
| 5 | 49.38 | 1572 |
| Media | 42.96 | 1619 |
| Desv. Est. | 4.17 | 104 |

| Prueba P022 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 53.68 | 2099 |
| 2 | 53.52 | 2367 |
| 3 | 52.28 | 2205 |
| 4 | 55.88 | 1857 |
| 5 | 54.88 | |
| Media | 54.05 | 2132 |
| Desv. Est. | 1.38 | 214 |

| Prueba P020 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 44.00 | 1737 |
| 2 | 42.08 | 1578 |
| 3 | 39.56 | 1663 |
| 4 | 45.41 | 1568 |
| 5 | 42.27 | 1683 |
| Media | 42.66 | 1646 |
| Desv. Est. | 2.21 | 72 |

| Prueba P023 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 48.68 | 2032 |
| 2 | 52.64 | 1931 |
| 3 | 48.30 | 1614 |
| 4 | 48.57 | 1862 |
| 5 | 51.37 | 1882 |
| Media | 49.91 | 1864 |
| Desv. Est. | 1.97 | 155 |

| Prueba P021 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 50.21 | 1394 |
| 2 | 50.16 | 1446 |
| 3 | 49.05 | 1577 |
| 4 | 50.55 | 1517 |
| 5 | 48.62 | 1401 |
| Media | 49.72 | 1467 |
| Desv. Est. | 0.83 | 79 |

| Prueba P024 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 56.74 | 1675 |
| 2 | 60.39 | 2037 |
| 3 | 56.29 | 1904 |
| 4 | 55.07 | 2161 |
| 5 | 55.25 | 1670 |
| Media | 56.75 | 1889 |
| Desv. Est. | 2.15 | 218 |

| Prueba P028 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 52.65 | 1594 |
| 2 | 49.80 | 1633 |

| | | |
|--------------|--------------|-------------|
| 3 | 49.33 | 1685 |
| 4 | 51.03 | 1471 |
| 5 | 46.89 | 1617 |
| Media | 49.94 | 1600 |
| Desv. Est. | 2.13 | 79 |

| Prueba P029 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 48.83 | 1751 |
| 2 | 43.47 | 1717 |
| 3 | 41.76 | 1734 |
| 4 | 43.58 | 1691 |
| 5 | 47.69 | 1646 |
| Media | 45.07 | 1708 |
| Desv. Est. | 3.03 | 41 |
| Prueba P030 (Composición 2) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 50.57 | 1853 |
| 2 | 47.01 | 1900 |
| 3 | 50.05 | 2004 |
| 4 | 49.20 | 2061 |
| 5 | 47.99 | 2031 |
| Media | 48.96 | 1970 |
| Desv. Est. | 1.46 | 89 |
| Prueba P031 (Composición 2) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 48.54 | 1580 |
| 2 | 46.73 | 1641 |

| 3 | 45.90 | 1674 |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 4 | 46.42 | 1611 |
| 5 | 48.11 | 1589 |
| Media | 47.14 | 1619 |
| Desv. Est. | 1.13 | 39 |
| Prueba P032 (Composición 2) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 45.68 | 1872 |
| 2 | 44.53 | 1856 |
| 3 | 47.28 | 1874 |
| 4 | 43.72 | 1854 |
| 5 | 48.95 | 1864 |
| Media | 46.03 | 1864 |
| Desv. Est. | 2.11 | 9 |
| Prueba P033 (Composición 2) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 49.94 | 1606 |
| 2 | 50.92 | 1750 |
| 3 | 53.92 | 1901 |
| 4 | 52.72 | 1894 |
| 5 | 51.11 | 1570 |
| Media | 51.72 | 1744 |
| Desv. Est. | 1.58 | 155 |

A8.3. FASE DE ENFRIAMIENTO

| Prueba P034 (Composición 1) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 50.21 | 1394 |
| 2 | 50.16 | 1446 |
| 3 | 49.05 | 1577 |
| 4 | 50.55 | 1517 |
| 5 | 48.62 | 1401 |
| Media | 49.72 | 1467 |
| Desv. Est. | 0.83 | 77 |
| Prueba P035 (Composición 1) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 48.30 | 1825 |
| 2 | 51.38 | 1925 |

| 3 | 50.06 | 1870 |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 4 | 51.78 | 1948 |
| 5 | 49.65 | 1918 |
| Media | 50.23 | 1897 |
| Desv. Est. | 1.40 | 49 |
| Prueba P036 (Composición 1) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex_{@5%}</i> (MPa) | <i>Módulo flexión</i> (MPa) |
| 1 | 55.29 | 1910 |
| 2 | 59.79 | 1742 |
| 3 | 61.08 | 1882 |
| 4 | 55.14 | 1954 |
| 5 | 59.85 | 1883 |
| Media | 58.23 | 1874 |
| Desv. Est. | 2.80 | 79 |

| Prueba P037 (Composición 2) | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 45.68 | 1872 |
| 2 | 44.53 | 1856 |
| 3 | 47.28 | 1874 |
| 4 | 43.72 | 1854 |
| 5 | 48.95 | 1864 |
| Media | 46.03 | 1864 |
| Desv. Est. | 2.11 | 9 |
| Prueba P038(Composición 2) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 48.07 | 1527 |
| 2 | 48.49 | 1674 |

| 3 | 46.61 | 1757 |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 4 | 47.91 | 1767 |
| 5 | 46.18 | 1917 |
| Media | 47.45 | 1728 |
| Desv. Est. | 1.00 | 143 |
| Prueba P039 (Composición 2) | | |
| <i>Probeta</i> | <i>Sflex@5% (MPa)</i> | <i>Módulo flexión (MPa)</i> |
| 1 | 50.60 | 1932 |
| 2 | 55.77 | 2006 |
| 3 | 53.54 | 2032 |
| 4 | 52.37 | 1856 |
| 5 | 50.66 | 2131 |
| Media | 52.59 | 1991 |
| Desv. Est. | 2.16 | 104 |

ANEXO 9. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DENSIDAD DEL POLIPROPILENO Y MATERIALES COMPUESTOS PP/ABACÁ.

| Densidad del PP | | | |
|--------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------|
| <i>Prueba</i> | <i>A (g)</i> | <i>B (g)</i> | ρ (g/cm ³) |
| 1 | 0.2965 | 0.0395 | 0.9114 |
| 2 | 0.3057 | 0.0409 | 0.9120 |
| 3 | 0.3177 | 0.0423 | 0.9113 |
| 5 | 0.2110 | 0.0281 | 0.9114 |
| 6 | 0.1888 | 0.0252 | 0.9117 |
| Media | | | 0.9116 |
| Desv. Est. | | | 0.0003 |
| Densidad de 30% - 20 mm | | | |
| <i>Prueba</i> | <i>A (g)</i> | <i>B (g)</i> | ρ (g/cm ³) |
| 1 | 0.5164 | 0.1081 | 0.9992 |
| 2 | 0.5110 | 0.1075 | 1.0005 |
| 3 | 0.4386 | 0.0938 | 1.0049 |
| 4 | 0.4573 | 0.0934 | 0.9928 |
| 5 | 0.4472 | 0.0911 | 0.9921 |
| Media | | | 0.9979 |
| Desv. Est. | | | 0.0054 |

| Densidad de 35% Fibra Continua | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------|
| <i>Prueba</i> | <i>A (g)</i> | <i>B (g)</i> | ρ (g/cm ³) |
| 1 | 0.5000 | 0.1258 | 1.0556 |
| 2 | 0.4980 | 0.1263 | 1.0584 |
| 3 | 0.4561 | 0.1132 | 1.0508 |
| 4 | 0.5008 | 0.1246 | 1.0517 |
| 5 | 0.4569 | 0.1161 | 1.0591 |
| Media | | | 1.0551 |
| Desv. Est. | | | 0.0038 |
| Densidad de 35% - 30 mm | | | |
| <i>Prueba</i> | <i>A (g)</i> | <i>B (g)</i> | ρ (g/cm ³) |
| 1 | 0.5511 | 0.1276 | 1.0280 |
| 2 | 0.4847 | 0.1131 | 1.0304 |
| 3 | 0.5218 | 0.1186 | 1.0224 |
| 4 | 0.5022 | 0.1038 | 0.9958 |
| 5 | 0.5124 | 0.1136 | 1.0150 |
| Media | | | 1.0183 |
| Desv. Est. | | | 0.0139 |

| Densidad de 35% F. Mercerizada | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------|
| <i>Prueba</i> | <i>A (g)</i> | <i>B (g)</i> | ρ (g/cm ³) |
| 1 | 0.5020 | 0.1277 | 1.0595 |
| 2 | 0.4701 | 0.1152 | 1.0464 |
| 3 | 0.5179 | 0.1275 | 1.0480 |
| 4 | 0.5233 | 0.1331 | 1.0595 |
| 5 | 0.4408 | 0.1140 | 1.0656 |
| Media | | | 1.0558 |
| Desv. Est. | | | 0.0082 |
| Densidad de 35% - 20 mm | | | |
| <i>Prueba</i> | <i>A (g)</i> | <i>B (g)</i> | ρ (g/cm ³) |
| 1 | 0.5550 | 0.1220 | 1.0126 |
| 2 | 0.5976 | 0.1297 | 1.0090 |
| 3 | 0.5647 | 0.1237 | 1.0116 |
| 4 | 0.5783 | 0.1282 | 1.0150 |
| 5 | 0.5958 | 0.1300 | 1.0105 |
| Media | | | 1.0117 |
| Desv. Est. | | | 0.0023 |