

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE POLIETILENO  
REFORZADO CON FIBRAS DE ABACÁ MEDIANTE  
MOLDEO POR COMPRESIÓN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN LA  
ESPECIALIZACIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA ESCUELA  
POLITÉCNICA NACIONAL**

**ANDRÉS PABLO SALAS BALSECA**

pablo.a.salas@gmail.com

**DIRECTOR: VÍCTOR GUERRERO, PH.D.**

victor.guerrero@epn.edu.ec

**Quito, DM, (Febrero, 2009)**

## DECLARACIÓN

Yo, Andrés Pablo Salas Balseca, declaro 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.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Andrés Pablo Salas Balseca

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el siguiente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. Andrés Pablo Salas Balseca como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

Víctor Guerrero, Ph.D.

## AGRADECIMIENTOS

A Gloria y Julio mis padres, mis hermanos y mi abuelita Lucita por su apoyo, ayuda y amor incondicional.

Al Dr. Víctor Guerrero, por su acertada dirección, ayuda, apoyo, confianza y paciencia.

Al Dr. Francisco Quiroz, Dr. Francisco Cadena, Químico Iván Chango, Química Elizabeth Venegas, Ing. Omar Bonilla y por medio suyo a todos los compañeros y amigos del CIAP por su apoyo y colaboración.

Al Ing. Jorge Escobar, Ing. Claudio Álvarez, Ing. Adrián Peña, Ing. Guillermo Ruiz, Ing. Wilson Zambrano y todos los maestros que me han formado e instruido.

A la Señora Gloria Castellanos, Señora Adriana Pavón, Miguel Sarmiento, Luis Escobar, LM: Alex V., Carlos L., Santiago M., Leonardo T. y Paúl M., Diego R.(+), Fidaa A. y Jairo A. y todos quienes me ayudaron desinteresadamente durante toda mi carrera y la ejecución de este proyecto.

A Alejandra, mi esposa, por su amor, cuidado, comprensión y apoyo idóneo para alcanzar este sueño, y a Paula Isabel, mi hija, por darme el último impulso con su ternura y amor.

Y principalmente a DIOS por rodearme de todas estas personas y bendecirme por medio de ellas. Tu brazo Señor siempre me ha protegido y nunca me has dejado solo. Tuya sea la Honra, el Poder y la Gloria por toda la Eternidad.

**Andrés**



## DEDICATORIA

A la memoria de mi abuelita *Olguita*. +

A mis dos princesas.

*Alejandra y Paula Isabel*

***Andrés***

## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XVIII</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XXI</b>
<b>PRESENTACIÓN</b>	<b>XXII</b>
<b>CAPITULO 1 FIBRAS DE ABACA</b>	<b>1</b>
1.1.    FIBRAS	1
1.1.1.    CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS	2
1.1.2.    FIBRAS NATURALES DE ORIGEN VEGETAL	6
1.1.2.1.    Características Físico - Químicas	8
1.1.2.2.    Propiedades Mecánicas	11
1.2.    EL ABACÁ EN EL ECUADOR	15
1.2.1.    MERCADO ACTUAL DEL ABACÁ	17
1.2.2.    CARACTERÍSTICAS	19
1.2.2.1.    Composición Química	21
1.2.2.2.    Variedades	21
1.2.2.3.    Grado de la Fibra	22
1.2.3.    TÉCNICAS PARA EL CULTIVO	23
1.2.4.    TÉCNICAS PARA LA COSECHA	24
1.2.5.    NUEVAS PERSPECTIVAS DE USO DEL ABACÁ	29
<b>CAPITULO 2 COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA REFORZADA CON FIBRAS NATURALES</b>	<b>34</b>
2.1.    MATERIALES COMPUESTOS	34

2.1.1.	FUNCIONES DE LA MATRIZ Y LOS REFUERZOS	41
2.1.2.	DISEÑO DE MATERIALES COMPUESTOS	43
2.2.	EL POLIETILENO COMO MATRIZ	45
2.2.1.	TIPOS DE MATRICES POLIMÉRICAS Y SUS APLICACIONES	46
2.2.2.	MATRICES TERMOPLÁSTICAS	51
2.2.3.	PROCESOS DE MANUFACTURA DE MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ TERMOPLÁSTICA	53
2.2.4.	EL POLIETILENO	54
2.2.4.1.	Tipos de Polietileno	55
2.2.4.2.	Propiedades Mecánicas y Físico-Químicas	57
2.2.4.3.	Usos del Polietileno	62
2.3.	COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES	64
2.3.1.	EFFECTOS DE UTILIZAR FIBRAS DELGADAS COMO REFUERZOS	65
2.3.2.	PREDICCIÓN DE PROPIEDADES DEL COMPUESTO – LEY DE LAS MEZCLAS	69
2.3.3.	CONFIGURACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LAS FIBRAS EN EL COMPUESTO	75
2.3.3.1.	Variación de propiedades	76
2.3.3.2.	Limitantes de los procesos de manufactura	78
2.3.4.	INTERCARA FIBRA – MATRIZ	79
2.3.5.	COMPUESTOS CON FIBRAS VEGETALES FRENTE A COMPUESTOS REFORZADOS CON OTRO TIPO DE FIBRAS	81
2.4.	PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN	83
2.4.1.	MATERIA PRIMA	85
2.4.2.	EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	87

2.4.3.	FASES DEL PROCESO	89
2.4.3.1.	Fase de Pre calentamiento del Molde	91
2.4.3.2.	Fase de Moldeo	92
2.4.3.3.	Fase de Enfriamiento	92
2.4.4.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN	93
2.4.5.	COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES OBTENIDOS A TRAVÉS DE MOLDEO POR COMPRESIÓN	94
2.5.	ALCANCE Y OBJETIVOS	95
2.5.1.	ALCANCE	95
2.5.2.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	97
<b>CAPITULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS</b>		<b>98</b>
3.1.	TÉCNICAS, EQUIPOS E INSUMOS UTILIZADOS	98
3.1.1.	TÉCNICAS UTILIZADAS	98
3.1.2.	EQUIPOS E INSUMOS	102
3.2.	MATERIA PRIMA	106
3.2.1.	REFUERZO DE FIBRA DE ABACÁ VARIEDAD BUNGALANÓN	106
3.2.2.	MATRIZ / POLIETILENO 1-BUTENO VENELENE 2213	109
3.2.3.	PROPIEDADES DE MATRIZ Y REFUERZOS	112
3.3.	OPERACIONES SOBRE LA MATERIA PRIMA	113
3.3.1.	PROCESAMIENTO DE FIBRAS	113
3.3.1.1.	PREPARACIÓN, CORTE Y ENTRELAZADO DE FIBRAS	113
3.3.1.2.	Disminución de la cantidad de agua y secado	115
3.3.2.	PROCESAMIENTO DE LA MATRIZ	116

3.3.2.1.	Manufactura de placas	119
3.3.2.2.	Determinación de los parámetros óptimos para el proceso de moldeo por compresión	121
3.3.2.2.1.	Tiempos y energía involucrados en cada etapa	121
3.3.2.2.2.	Criterios de evaluación de resultados preliminares	126
3.4.	OBTENCIÓN DEL COMPUESTO	127
3.4.1.	CONSIDERACIONES PARA LA ELABORACIÓN DE PLACAS	127
3.4.2.	VARIACIÓN DE LA FRACCIÓN MÁSCICA Y LA DISPOSICIÓN DE LA FIBRA EN LA MATRIZ	129
3.5.	CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS OBTENIDOS	129
<b>CAPITULO 4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>		<b>133</b>
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS REFUERZOS	133
4.1.1.	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE ABACÁ	133
4.1.2.	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA FIBRA DE ABACÁ	135
4.2.	PREPARACIÓN DE MATERIALES E INSTRUMENTOS	136
4.2.1.	ACONDICIONAMIENTO DEL MOLDE	136
4.2.2.	TEMPERATURA DE FUSIÓN DEL POLIETILENO	137
4.2.3.	OPERACIÓN DE DESHILADO, CORTE Y ENTRELAZADO DE FIBRAS	138
4.3.	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DE LAS PLACAS DE POLIETILENO	140
4.3.1.	ELIMINACIÓN DE DEFECTOS – ADAPTACIÓN A LOS INSTRUMENTOS Y PARÁMETROS PRELIMINARES	140
4.3.2.	EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DENTRO DEL MOLDE - DETERMINACIÓN DE LAS ETAPAS DEL MOLDEO	142
4.3.3.	PROPIEDADES MECÁNICAS DE PLACAS ELABORADAS USANDO DIFERENTES PARÁMETROS	145

4.3.4.	SELECCIÓN DE PARÁMETROS PARA CADA ETAPA DEL MOLDEO	147
4.4.	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DEL COMPUESTO	149
4.4.1.	VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN Y OBTENCIÓN DE PLACAS	149
4.4.2.	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS SOBRE LAS PLACAS DE COMPUESTO PARA LA SELECCIÓN DE LOS MEJORES PARÁMETROS	150
4.5.	CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS OBTENIDOS	152
4.5.1.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS	152
4.5.1.1.	Resultados de ensayos de tracción	153
4.5.1.2.	Resultados de ensayos de flexión	161
4.5.2.	PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS	169
4.5.2.1.	Densidad	169
4.5.2.2.	Dureza	171
4.5.2.3.	Determinación de absorción de agua	172
4.5.3.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.	174
<b>CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>186</b>
5.1.	CONCLUSIONES	186
5.2.	RECOMENDACIONES	191
<b>REFERENCIAS</b>		<b>192</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>196</b>
<b>ANEXO 1. TENACIDAD DE FIBRAS DE ABACÁ DE DIFERENTES GRADOS</b>		<b>197</b>
<b>ANEXO 2. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO DE UNA MUESTRA DE PE DE BAJA DENSIDAD 1-BUTENO – VENELENE 2213</b>		<b>199</b>

<b>ANEXO 3. HOJA TÉCNICA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD 1-BUTENO VENELENE 2213</b>	<b>200</b>
<b>ANEXO 4. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINACIÓN ABSORCIÓN DE AGUA DE COMPUESTOS</b>	<b>201</b>
<b>ANEXO 5. PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN DE FIBRAS DE ABACÁ GRADO 3 VARIEDAD BUNGALANÓN</b>	<b>206</b>
<b>ANEXO 6. TERMOGRAVIMETRÍA DEL ABACÁ</b>	<b>208</b>
<b>ANEXO 7. RESULTADOS DE PRUEBAS MECÁNICAS SOBRE COMPUESTOS OBTENIDOS Y PROPIEDADES ESPECÍFICAS A TRACCIÓN</b>	<b>209</b>
<b>ANEXO 8. PLANOS: 1) MOLDE DE ACERO USADO PARA MOLDEAR EL MATERIAL DE LA MATRIZ Y EL COMPUESTO, Y 2) TROQUEL DE CORTE DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN.</b>	<b>212</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1.	CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS SEGÚN SU ORIGEN.	2
FIGURA 1.2.	ALGUNOS TIPOS DE FIBRAS COMERCIALES.	6
FIGURA 1.3.	USOS DE LAS FIBRAS NATURALES.	8
FIGURA 1.4.	ESTRUCTURA CRISTALINA DE LA CELULOSA. [LILHOLT & LAWThER]	9
FIGURA 1.5.	FRUTO DE ABACÁ. [INTERNET 1]	16
FIGURA 1.6.	PLANTACIONES DE ABACÁ EN SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS, ECUADOR.	17
FIGURA 1.7.	PRODUCTOS ARTESANALES DE ABACÁ. [INTERNET]	18
FIGURA 1.8.	VOLUMEN DE EXPORTACIÓN DE ABACÁ EN EL ECUADOR DESDE EL AÑO 1995 HASTA 2007. [CORPEI]	19
FIGURA 1.9.	PSEUDOTALLOS MÚLTIPLES DE LA PLANTA DE ABACÁ, DE DONDE SE OBTIENE PRINCIPALMENTE LA FIBRA.	20
FIGURA 1.10.	ESTRUCTURA MOLECULAR DE LA CELULOSA.	21
FIGURA 1.11.	FIBRAS DE ABACÁ DE DIFERENTES GRADOS. EL COLOR LOS DIFERENCIA.	23
FIGURA 1.12.	AGRICULTOR ORIENTAL EN PLANTACIÓN DE ABACÁ.	24
FIGURA 1.13.	A) TUXIES DE ABACÁ. B) SUNKES O DESHOJES.	25
FIGURA 1.14.	TRANSPORTE ANIMAL DE LA FIBRA DENTRO DE LA FINCA.	26
FIGURA 1.15.	DEFIBRADORA, NÓTESE LOS DIFERENTES GRADOS A LA SALIDA DE LA MÁQUINA.	27
FIGURA 1.16.	SECADO DE LA FIBRA.	27
FIGURA 1.17.	(A) PRENSA PARA EMPAQUETAR LA FIBRA. (B) BULTO LISTO PARA EL ALMACENADO.	28
FIGURA 1.18.	ALMACENAMIENTO DE LA FIBRA EN BODEGA CERRADA.	28
FIGURA 1.19.	INDUSTRIA PAPELERA A BASE DE ABACÁ - INDONESIA. [INTERNET 15]	30
FIGURA 1.20.	AUTOPARTES DE ABACÁ EN VEHÍCULOS MERCEDES BENZ CLASE 500 CONSTRUIDOS POR DAIMLER CHRYSLER. [INTERNET 15]	31



FIGURA 1.21.	“ABACAR” FORD MODELO U CONCEPTO.	32
FIGURA 2.1.	ESCLAVOS HEBREOS ELABORANDO ADOBES DE ARCILLA Y PAJA.	35
FIGURA 2.2.	COMPUESTOS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON MADERA/ FIBRAS VEGETALES. [SMITH&WOLLCOT]	38
FIGURA 2.3.	VARIACIÓN DE LA FORMA, DISTRIBUCIÓN, TAMAÑO, CONCENTRACIÓN Y ORIENTACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DEL REFUERZO EN UNA MISMA MATRIZ. [CALLISTER]	39
FIGURA 2.4.	CLASIFICACIÓN DE LOS COMPUESTOS SEGÚN SU EL TIPO DE REFUERZO. [CALLISTER]	39
FIGURA 2.5.	COMPUESTOS ESTRUCTURALES. [CALLISTER]	41
FIGURA 2.6.	CARGA DE TRACCIÓN APLICADA AL COMPUESTO Y SOPORTADA POR LOS REFUERZOS. [MILLIS]	42
FIGURA 2.7.	PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE MATERIALES. [ASHBY]	43
FIGURA 2.8.	TEMPERATURAS LÍMITE DE OPERACIÓN DE COMPUESTOS DE DIFERENTES MATRICES. [MITCHELL]	46
FIGURA 2.9.	PROPIEDADES DE ALGUNOS POLÍMEROS DE LOS CUATRO GRUPOS. [ASHBY]	48
FIGURA 2.10.	CURVAS TÍPICAS ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE POLÍMEROS FRÁGILES (A), PLÁSTICOS CON ZONA ELÁSTICA (B), Y TOTALMENTE ELÁSTICOS O ELASTÓMEROS (C). [CALLISTER]	49
FIGURA 2.11.	ESFUERZO ÚLTIMO A LA TRACCIÓN (TS) Y ESFUERZO DE FLUENCIA EN UN POLÍMERO CON COMPORTAMIENTO PLÁSTICO Y ELÁSTICO. [CALLISTER]	49
FIGURA 2.12.	DEFORMACIÓN MACROSCÓPICA DE UN ESPÉCIMEN DE UN POLÍMERO EN LAS ZONAS ELÁSTICA Y PLÁSTICA. [CALLISTER]	50
FIGURA 2.13.	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA CARACTERÍSTICA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DEL PPOLIMETILMETACRILATO. [CALLISTER]	52
FIGURA 2.14.	ALGUNOS DE LOS TERMOPLÁSTICOS MÁS COMUNES. [ASHBY]	53
FIGURA 2.15.	DIFERENCIAS EN EL PROCESAMIENTO DE TERMOPLÁSTICOS Y TERMOESTABLES.	54
FIGURA 2.16.	ESQUEMA DEL POLIETILENO EN TRES DIMENSIONES.	55

FIGURA 2.17. PROPIEDADES DE DIFERENTES TIPOS DE PE. [CHANDA & ROY]	56
FIGURA 2.18. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN DEL LDPE.	59
FIGURA 2.19. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE ALGUNOS TIPOS DE POLIETILENO.	59
FIGURA 2.20. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN DEL PEBD (PUBLICACIÓN "PLASTICS MATERIALS").	60
FIGURA 2.21. PRODUCTOS COMUNES HECHOS A BASE DE LDPE Y HDPE. [CHANDA & ROY]	64
FIGURA 2.22. RELACIÓN DE LA RESISTENCIA ÚLTIMA A LA TRACCIÓN DE FIBRAS DE CARBONO CON RESPECTO A SU DIÁMETRO. [KAW]	65
FIGURA 2.23. FOTOS POR MEDIO DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE ALGUNAS FIBRAS NATURALES Y SUS DIÁMETROS. [LILHOLT & LAWThER]	67
FIGURA 2.24. ESFUERZO ÚLTIMO ESPECÍFICO A LA TRACCIÓN Y MÓDULO DE TENSIÓN ESPECÍFICO DE ALGUNAS FIBRAS USADAS COMO REFUERZO Y DE ALGUNOS MATERIALES ESTRUCTURALES TÍPICAMENTE UTILIZADOS. [MITCHELL]	68
FIGURA 2.25. EFECTO DEL DIÁMETRO DE UNA FIBRA DE VIDRIO SOBRE EL ESFUERZO ÚLTIMO A LA TRACCIÓN DE UN POLIESTIRENO REFORZADO. [MITCHELL]	69
FIGURA 2.26. MÓDULO DE UN COMPUESTO REFORZADO CON FIBRAS EN FUNCIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE LAS MISMAS. [ASHBY]	70
FIGURA 2.27. MÓDULO DE UN COMPUESTO REFORZADO CON FIBRAS EN FUNCIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE LAS MISMAS. [ASHBY]	71
FIGURA 2.28. MÓDULO DE UN COMPUESTO REFORZADO CON FIBRAS CONTINUAS UNIDIRECCIONALES EN FUNCIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE LAS MISMAS. [ASHBY]	72
FIGURA 2.29. LÍMITE SUPERIOR E INFERIOR APLICANDO LA LEY DE LAS MEZCLAS PARA UN COMPUESTO REFORZADO CON FIBRAS. [CALLISTER]	73
FIGURA 2.30. CARGA TRANSFERIDA DESDE LA MATRIZ A LA FIBRA QUE CAUSA DE UN ESFUERZO DE TRACCIÓN QUE SE ELEVA A LA ALTURA DEL CENTRO DE LA FIBRA. SI EL PICO ES EXCEDIDO LA FIBRA SE ROMPERÁ. [ASHBY]	74
FIGURA 2.31. CONFIGURACIONES COMUNES DE FIBRAS QUE REFUERZAN CMP. [ADVANI]	76
FIGURA 2.32. CONFIGURACIONES COMUNES DE FIBRAS QUE REFUERZAN CMP. [CHANDA & ROY]	77

FIGURA 2.33. ROL ESQUEMÁTICO DE LA CONFIGURACIÓN DE LA FIBRA SOBRE EL DESEMPEÑO Y LA FACILIDAD DE PROCESAMIENTO. [ADVANI]	79
FIGURA 2.34. MODOS TÍPICOS DE FRACTURA EN PLÁSTICOS REFORZADOS POR FIBRAS: A) CON UNA FUERTE ADHERENCIA, Y B) CON UNA ADHERENCIA DÉBIL ENTRE LOS ELEMENTOS. [CHANDA & ROY]	80
FIGURA 2.35. COMPUESTO DE FIBRAS DE LINO CON PP, LA ZONA DE FRACTURA DA LA INFORMACIÓN ACERCA DE LA ADHESIÓN DE FIBRAS Y MATRIZ. [LILHOT]	81
FIGURA 2.36. PRODUCCIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES. [INTERNET14]	82
FIGURA 2.37. COMBINACIONES DE MATRICES POLIMÉRICAS Y REFUERZOS DE DE FIBRAS NATURALES COMUNES. [INTERNET13]	84
FIGURA 2.38. SMC, PROCESO BÁSICO Y APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ.	85
FIGURA 2.39. PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALGUNOS MATERIALES A BASE DE CELULOSA, SECOS Y HÚMEDOS. [CHANDA & ROY]	86
FIGURA 2.40. PRESENTACIÓN DE DIFERENTES MATERIALES UTILIZADOS COMO REFUERZO. FIBRA DE VIDRIO, CARBONO Y FIBRAS NATURALES. [CHANDA & ROY]	87
FIGURA 2.41. PRENSA CALEFACTORA PARA MOLDEO POR COMPRESIÓN	88
FIGURA 2.42. MOLDE TIPO HEMBRA-MACHO PARA MOLDEO POR COMPRESIÓN.	88
FIGURA 2.43. MOLDE METÁLICO TÍPICO, TIPO CAJA, PARA MOLDEO POR COMPRESIÓN. [ADVANI]	89
FIGURA 2.44. OPERACIONES DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN. A) CARGA DEL MATERIAL, B) MOLDEO DEL MATERIAL BAJO CONDICIONES DE TEMPERATURA Y PRESIÓN DADAS, Y C) DESMOLDE.	90
FIGURA 2.45. FASES DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN PARA UN MOLDE DE ACERO CON UNA FORMA DETERMINADA DONDE SE PROCESA POLIETILENO VENELENE 2213.	90
FIGURA 2.46. PANELES HECHOS A BASE DE COMPUESTOS OBTENIDOS CON MOLDEO POR COMPRESIÓN.	95
FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DEL COMPUESTO.	101

FIGURA 3.2.	ELEMENTOS PRINCIPALES DE UNA PRENSA CALEFACTORA Y SU FUNCIÓN EN EL MOLDEO POR COMPRESIÓN.	102
FIGURA 3.3.	EQUIPOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO.	105
FIGURA 3.4.	VARIACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA FIBRA CON RESPECTO A LA LONGITUD DE LA FIBRA. [MOREJÓN, NARVÁEZ]	109
FIGURA 3.5.	CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SU ESTRUCTURA	111
FIGURA 3.6.	PRESENTACIÓN DE LA FIBRA DE ABACÁ ENSAYADA COMO REFUERZO.	114
FIGURA 3.7.	TELAR USADO PARA OBTENER LA FIBRA ENTRELAZADA EN DOS DIMENSIONES.	114
FIGURA 3.8.	FIBRA CORTADA Y SECA, PREPARADA PARA SER INCORPORADA EN EL COMPUESTO.	116
FIGURA 3.9.	TERMOGRAMA TÍPICO DE UN DSC DE UN TERMOPLÁSTICO. [WUNDERLICH]	117
FIGURA 3.10.	PROCESO DE OBTENCIÓN DE PLACAS.	118
FIGURA 3.11.	MOLDE DE ACERO UTILIZADO EN EL MOLDEO.	119
FIGURA 3.12.	PASOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE PROCESAMIENTO DE PLACAS. ENSAYOS PRELIMINARES.	120
FIGURA 3.13.	TRANSICIÓN DEL POLIETILENO A TRAVÉS DE LAS TRES FASES DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN.	122
FIGURA 3.14.	TRANSICIÓN DEL POLIETILENO A TRAVÉS DE LAS TRES FASES DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN.	123
FIGURA 3.15.	BAÑO TÉRMICO QUE CONTROLA EL CAUDAL DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO.	125
FIGURA 3.16.	ESQUEMA PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS Y EVALUACIÓN DE LA VARIACIÓN DE SUS TIPOS, CANTIDAD Y ORIENTACIÓN DE SUS REFUERZOS.	128
FIGURA 3.17.	TROQUEL CONSTRUIDO PARA OBTENCIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS A FLEXIÓN.	132
FIGURA 4.1.	CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE UNA MUESTRA REPRESENTATIVA CON DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN APLICADAS A LAS FIBRAS DE ABACÁ VARIEDAD BUNGALANÓN.	134

FIGURA 4.2. TERMOGRAVIMETRÍA DE LA FIBRA DE ABACÁ VARIEDAD BUNGANÓN DEL GRUPO 3 EN ESTUDIO.	135
FIGURA 4.3. POLIETILENO LINEAL 1-BUTENO DE BAJA DENSIDAD VENELENE 2213 GRADO INYECCIÓN.	137
FIGURA 4.4. REPRESENTACIÓN DEL SEGUNDO BARRIDO DEL DSC REALIZADO AL POLIETILENO LINEAL 1-BUTENO DE BAJA DENSIDAD VENELENE 2213 GRADO INYECCIÓN.	138
FIGURA 4.5. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DENTRO DEL MOLDE DE ACERO. DIFERENCIACIÓN DE LAS TRES FASES DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN.	144
FIGURA 4.6. CURVAS ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETAS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO DE PLACAS FABRICADAS CON DIFERENTES PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO.	147
FIGURA 4.7. COMPARACIÓN ENTRE DOS CONDICIONES DE EVOLUCIÓN DE TEMPERATURA EN EL MOLDE CON TEMPERATURAS DIFERENTES EN LAS PLACAS CALEFACTORAS.	148
FIGURA 4.8. CURVAS ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS OBTENIDOS CON DIFERENTES PARÁMETROS DE FABRICACIÓN.	151
FIGURA 4.9. MUESTRAS ENSAYADAS A TRACCIÓN Y FLEXIÓN EN LA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS MARCA INSTRON DE DONDE SE OBTUVO LOS RESULTADOS DE ESTE ESTUDIO.	152
FIGURA 4.10. PROBETAS ENSAYADAS A TRACCIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE REFUERZO Y FRACCIÓN MÁSCA	153
FIGURA 4.11. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN TRACCIÓN DE COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 10 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR EN LA MATRIZ DE PE.	155
FIGURA 4.12. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN TRACCIÓN DE COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 20 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR EN LA MATRIZ DE PE.	156
FIGURA 4.13. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN TRACCIÓN DE COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 30 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE Y COMPUESTOS REFORZADOS CON UN TEJIDO BIDIMENSIONAL.	158
FIGURA 4.14. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN TRACCIÓN DE COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CONTINUAS UNIFORMEMENTE DISPUESTAS SOBRE LA MATRIZ DE PE.	160

FIGURA 4.15. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN FLEXIÓN DE COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 10 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE.	163
FIGURA 4.16. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN FLEXIÓN DE COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 20 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE.	164
FIGURA 4.17. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN FLEXIÓN DE COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 30 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE.	166
FIGURA 4.18. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN FLEXIÓN DE COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS CONTINUAS DISPUESTAS UNIFORMEMENTE SOBRE LA MATRIZ DE PE.	168
FIGURA 4.19. PROBETAS DE MATERIALES COMPUESTOS DE POLIETILENO Y ABACÁ LUEGO DE HABER SOMETIDOS A ESFUERZOS DE FLEXIÓN.	168
FIGURA 4.20. RESULTADOS DE VARIACIÓN DE LA DENSIDAD EXPERIMENTAL EN LOS MATERIALES COMPUESTOS ABACÁ-POLIETILENO.	170
FIGURA 4.21. VARIACIÓN DEL AUMENTO DE MASA DE CADA MUESTRA POR ABSORCIÓN DE AGUA EN LOS MATERIALES COMPUESTOS ABACÁ-POLIETILENO	174
FIGURA 4.22. ESFUERZOS MÁXIMOS A TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE COMPUESTOS CON FRACCIÓN MÁSCICA DEL 15% DE REFUERZOS.	178
FIGURA 4.23. ESFUERZOS MÁXIMOS A TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE COMPUESTOS CON FRACCIÓN MÁSCICA DEL 25% DE REFUERZOS.	179
FIGURA 4.24. ESFUERZOS MÁXIMOS A TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE COMPUESTOS CON FRACCIÓN MÁSCICA DEL 35% DE REFUERZOS.	179
FIGURA 4.25. MÓDULOS DE YOUNG A TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE COMPUESTOS CON FRACCIÓN MÁSCICA DEL 15% DE REFUERZOS.	180
FIGURA 4.26. MÓDULOS DE YOUNG A TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE COMPUESTOS CON FRACCIÓN MÁSCICA DEL 25% DE REFUERZOS.	180
FIGURA 4.27. MÓDULOS DE YOUNG A TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE COMPUESTOS CON FRACCIÓN MÁSCICA DEL 35% DE REFUERZOS.	181

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. DIMENSIONES DE FIBRAS VEGETALES. [LILHOLT & LAWThER]	11
TABLA 1.2. CONSTANTE ELÁSTICA DE FIBRAS VEGETALES.	12
TABLA 1.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE ALGUNAS FIBRAS VEGETALES. [LILHOLT & LAWThER]	13
TABLA 1.4. DENSIDAD DE ENLACES Y ESFUERZO TEÓRICO ÚLTIMO DE ALGUNOS MATERIALES. [LILHOLT & LAWThER]	13
TABLA 1.5. CONSTANTE ELÁSTICA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DE ALGUNOS MATERIALES. [LILHOLT & LAWThER]	14
TABLA 1.6. DIFERENCIAS ENTRE LOS TIPOS DE FIBRAS QUE SE CULTIVAN EN EL ECUADOR.	22
TABLA 1.7. INDUSTRIAS AUTOMOTRICES QUE LIDERAN EL USO DE MATERIALES BIODEGRADABLES. [INTERNET 15]	31
TABLA 2.1. EFICIENCIA DE REFORZAMIENTO EN COMPUESTOS REFORZADOS POR FIBRAS PARA ALGUNAS ORIENTACIONES DE FIBRAS Y DIRECCIONES DE LA CARGA APLICADA [CALLISTER]	77
TABLA 3.1. NORMAS Y PROCEDIMIENTOS USADOS EN ESTE ESTUDIO.	100
TABLA 3.2. EQUIPOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO EXPERIMENTAL.	103
TABLA 3.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA FIBRA DE ABACÁ VARIEDAD BUNGALANÓN [TRÁVEZ, D; NIETO, M.]	108
TABLA 3.4. COMPOSICIÓN DE ALGUNAS FIBRAS VEGETALES. [MONTHANTY, CADENA, LÓPEZ].	108
TABLA 3.5. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL POLIETILENO 1-BUTENO DE BAJA DENSIDAD VENELENE 2213.	111
TABLA 3.6. TIPOS DE ENSAYO REALIZADOS SOBRE LA MATERIA PRIMA.	112
TABLA 3.7. PLACAS PARA PRUEBAS DE DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS OPTIMIZADOS DE FABRICACIÓN.	127
TABLA 3.8. PLACAS DE MATERIALES COMPUESTOS OBTENIDOS PARA PRUEBAS MECÁNICAS Y DE CARACTERIZACIÓN.	130

TABLA 3.9. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS USADOS PARA CARACTERIZAR LOS COMPUESTOS.	131
TABLA 4.1. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN APLICADAS A LAS FIBRAS DE ABACÁ VARIEDAD BUNGALANÓN.	134
TABLA 4.2. TEMPERATURA MEDIDA EN EL MOLDE DE ACERO DURANTE EL MOLDEO POR COMPRESIÓN DE UNA MUESTRA DE POLIETILENO.	143
TABLA 4.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN REALIZADOS SOBRE LAS PLACAS DE PE ELABORADAS CON DIFERENTES PARÁMETROS.	146
TABLA 4.4. PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN DE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS OBTENIDOS CON DIFERENTES PARÁMETROS DE FABRICACIÓN.	150
TABLA 4.5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 10 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE.	154
TABLA 4.6. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 20 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE.	156
TABLA 4.7. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 30 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE.	157
TABLA 4.8. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON UNA CAPA INTERMEDIA DE TEJIDO BIDIMENSIONAL DE FIBRAS.	158
TABLA 4.9. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS UNIDIRECCIONALES CONTINUAS.	160
TABLA 4.10. RESULTADOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 10 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE.	163
TABLA 4.11. RESULTADOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 20 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE.	164
TABLA 4.12. RESULTADOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS DE 30 MM DE LARGO DISPUESTAS AL AZAR SOBRE LA MATRIZ DE PE	165



TABLA 4.13.	RESULTADOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS CONTINUAS DISPUESTAS UNIFORMEMENTE SOBRE LA MATRIZ DE PE	166
TABLA 4.14.	RESULTADOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN SOBRE MUESTRAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON TEJIDOS BIDIMENSIONALES	167
TABLA 4.15.	DENSIDAD DE LOS COMPUESTOS FORMULADOS.	170
TABLA 4.16.	VALORES TEÓRICOS DE DENSIDAD DE LOS COMPUESTOS OBTENIDOS POR MEDIO DE LA LEY DE MEZCLAS.	171
TABLA 4.17.	RESULTADOS DE ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE LA DUREZA DE LOS COMPUESTOS.	172
TABLA 4.18.	RESULTADOS DE ENSAYOS DE ABSORCIÓN DE AGUA DE LOS COMPUESTOS.	173
TABLA 4.19.	PROPIEDADES A TRACCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON UN 15% DE FRACCIÓN MÁSCICA DE FIBRAS DE ABACÁ.	175
TABLA 4.20.	PROPIEDADES A TRACCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON UN 25% DE FRACCIÓN MÁSCICA DE FIBRAS DE ABACÁ.	176
TABLA 4.21.	PROPIEDADES A TRACCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON UN 35% DE FRACCIÓN MÁSCICA DE FIBRAS DE ABACÁ.	176
TABLA 4.22.	PROPIEDADES A FLEXIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON UN 15% DE FRACCIÓN MÁSCICA DE FIBRAS DE ABACÁ.	177
TABLA 4.23.	PROPIEDADES A FLEXIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON UN 25% DE FRACCIÓN MÁSCICA DE FIBRAS DE ABACÁ.	177
TABLA 4.24.	PROPIEDADES A TRACCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON UN 35% DE FRACCIÓN MÁSCICA DE FIBRAS DE ABACÁ.	178
TABLA 4.25.	RELACIÓN ENTRE LOS MÓDULOS DE YOUNG A FLEXIÓN Y TRACCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS OBTENIDOS.	182
TABLA 4.26.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES DE ESFUERZO MÁXIMO DE LOS COMPUESTOS OBTENIDOS	183
TABLA 4.27.	PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN OBTENIDAS EN MATERIALES COMPUESTOS OBTENIDOS POR PROCESOS SEMEJANTES AL PRESENTADO EN ESTE ESTUDIO. [PÁEZ]	184
TABLA 4.28.	PROPIEDADES MECÁNICAS A FLEXIÓN OBTENIDAS EN MATERIALES COMPUESTOS OBTENIDOS POR PROCESOS SEMEJANTES AL PRESENTADO EN ESTE ESTUDIO. [PÁEZ]	185

## RESUMEN

En este proyecto de titulación se presenta el proceso de investigación necesario para obtener materiales compuestos de matriz polietilénica reforzados con fibra de abacá en diversas presentaciones mediante moldeo por compresión. En una primera fase se estudió la procesabilidad del polietileno escogido como matriz, preparando con él placas planas de espesores de entre 0,8 y 1,7 mm. En esta fase se caracterizó el material de modo que sean conocidas propiedades como su índice de fluidez y su temperatura de fusión. A continuación, a través del moldeo por compresión, se determinaron los parámetros óptimos para este proceso; estos incluyen temperaturas, aplicación de presión y tiempos en cada fase. De igual manera, se caracterizó el material de refuerzo, de modo que se determinó su comportamiento a la tracción y las condiciones de temperatura del ambiente que lo rodea para reducir su contenido de agua. Esto sirvió no solo para preparar la carga de la mejor manera, sino para evaluar la interacción de las fibras con el polietileno conociendo las expectativas de mejora que tendría uno de estos materiales reforzados con abacá. Para la fase de culminación se buscó los mejores parámetros de fabricación para el desarrollo de estos compuestos. Hallados estos se procedió a fabricar compuestos reforzados con fibras cortas de 10 mm, 20 mm y 30 mm, fibras continuas y tejidos bidimensionales. Variando la orientación de las fibras y la composición másica de fibras en los materiales finales se consiguió algunos tipos de compuestos. Finalmente se ensayó los compuestos obtenidos a flexión y tracción, de modo que se determinó su comportamiento ante estos estados de carga para compararlos con placas sin fibras, de esta manera se estableció las composiciones más efectivas para alcanzar el mejor desempeño mecánico. Se demostró que las fibras continuas soportan mayores cargas de tracción que las cortas, sin embargo se proyecta que un avance en la compatibilidad de fibras y matriz puede incrementar los valores alcanzados.

## PRESENTACIÓN

Este estudio se desarrollo en etapas de la siguiente manera:

En el primer capítulo se presenta parte de la historia del abacá ecuatoriano, sus orígenes y las proyecciones que tiene su cultivo en el país. La idea principal es realzar la importancia de la búsqueda de nuevos usos para la fibra, incluyéndose la generación de materiales compuestos donde ésta participa como refuerzo de polímeros termoplásticos.

El segundo capítulo abarca una reseña concisa de las características principales de la matriz, dando importancia a las características más determinantes a la hora de juntarla con material de refuerzo. Se define también el proceso de manufactura escogido y sus generalidades, dentro de este las características de procesamiento del material de la matriz, y finalmente se detallan las metas y objetivos generales del estudio.

En el tercer capítulo se desarrolla el plan para la obtención de los materiales compuestos, su posterior caracterización y análisis. El diseño experimental del proceso de manufactura y el protocolo de pruebas ulterior queda plenamente definido de modo que la guía del estudio se describe en función de los materiales y métodos usados.

Los resultados finales y su interpretación están enunciados en el capítulo cuarto, comenzando por la determinación de parámetros de fabricación de cada fase del moldeo por compresión, su efecto en el desempeño mecánico de cada opción, hasta la caracterización de cada material.

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones derivadas de los datos presentados en el capítulo anterior y lo observado a través de todo el trabajo de investigación. Se plantean respuestas a las hipótesis levantadas en los objetivos y se explica la aparición de nuevas, recomendando lineamientos para nuevos estudios.

# CAPITULO 1

## FIBRAS DE ABACA

En este capítulo se describe la historia, las características y las oportunidades de uno de los mayores cultivos no tradicionales del Ecuador y que se exporta hacia algunas latitudes con relativo éxito: la fibra de abacá. Ante la necesidad imperiosa de impulsar la industria abacalera, este estudio inicia la búsqueda de una nueva aplicación describiendo en primer lugar, y de forma general, las cualidades del cultivo y procesamiento del abacá en la actualidad. Este conocimiento ha de servir como base para formular cualquier nueva hipótesis.

### 1.1. FIBRAS

Existe una gran cantidad de materiales que se presentan en la naturaleza en forma de fibras, es decir como estructuras unidimensionales, largas y delgadas. Para que sean consideradas como tal, cada fibra debe tener un diámetro no mayor a 0,5 mm y estar orientada a lo largo de un solo eje.

Una de las propiedades más notables en las fibras es su cohesión molecular. Esta cohesión les otorga muy buenas características de resistencia a la tracción, aunque al aplicar cargas de compresión o flexión suelen doblarse fácilmente. Por esta bondad es que se utilizan como refuerzos en materiales para obtener mejores propiedades. Un ejemplo de la edad antigua muy conocido es el de la utilización de paja para la fabricación de adobes por parte de los hebreos mientras eran esclavos en Egipto.

Las fibras se utilizan como refuerzos de materiales para distintas aplicaciones. Una fibra que revolucionó el mundo por su resistencia y aplicabilidad en los productos de fibrocemento es el asbesto; lamentablemente, sus efectos cancerígenos han sido un verdadero problema para su aceptación en muchos lugares del mundo.

Dentro de los tipos de fibras más comunes se puede citar a las textiles, que son cada uno de los filamentos que entran en la composición de los tejidos animales, vegetales o minerales. También existen polímeros útiles como fibras; principalmente los que tienen un alto grado de cristalinidad y fuerte interacción de cadenas adyacentes favoreciendo el incremento de su resistencia a la tracción.

### 1.1.1. CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS

Las fibras pueden clasificarse de algunas maneras. Lo más común es que se las divida según su origen en naturales y químicas; y según su composición química en orgánicas e inorgánicas. Las **fibras naturales** a su vez pueden ser de origen mineral, vegetal o animal. En la figura 1.1 se señala algunas características básicas de cada una y se nombra a las más comunes.

FIBRAS NATURALES		
MINERALES	NATURAL	AMIANTO
	TRANSFORMADAS	FIBRA DE VIDRIO METALES: ORO, PLATA Y COBRE
VEGETALES	DE SEMILLA	ALGODÓN
	DE TALLO	LINO, CÁÑAMO, YUTE
	DE HOJA	ESPARTO Y PITA
ANIMALES (PROTEÍNAS)	LANA SEDA CUERO	
FIBRAS QUÍMICAS		
ARTIFICIALES	CELULÓSICAS	RAYONES (MICROCELULOSA, CUPROAMONIA CAL, VISCOSA, ACETATO, TRICETATO)
	PROTEÍNICAS	ANIMALES (CASEÍNA DE LA LECHE) = FIBROLANA Y LANITEL VEGETALES   ARDIL VICARA
	ALGINIDAS	ALGAS MARINAS (RAYÓN ALGINATO)
SINTÉTICAS	OBTENIDAS POR POLICONDENSACIÓN	POLIAMIDAS POLIÉSTER
	OBTENIDAS POR POLIMERIZACIÓN (POLÍMERO)	ACRÍLICAS POLIVINÍLICAS POLIETILÉNICAS POLIPROPILÉNICAS POLIURETANO

Figura 1.1. Clasificación de las fibras según su origen.

*Fibras de Origen Mineral.*- la fibra de vidrio es una de las pocas de origen mineral que se utiliza a gran escala en los tejidos corrientes. Se obtiene tras la unión de diversos minerales seguida de la fusión de los mismos y se utiliza principalmente para la elaboración de aislantes térmicos y acústicos.

Una fibra muy difundida es el amianto, la misma que se usaba para la fabricación de aislamientos y protecciones ignífugas, hasta que se lo reconoció como precursor cancerígeno. Otra forma de fibras la constituyen algunos metales como el oro y la plata, que pueden ser convertidos en hilos y utilizados para obras artesanales y elaboración de trajes.

*Fibras de Origen Vegetal.*- Las fibras vegetales están constituidas principalmente de celulosa, que, a diferencia de las proteínas de las fibras de origen animal, es resistente a los álcalis. Estas fibras son asimismo resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos, pero los ácidos minerales fuertes las destruyen. La utilización incorrecta de la mayoría de los blanqueadores puede debilitar o destruir estas fibras.

En el algodón, el contenido de celulosa es de aproximadamente el 91,5%. El hilo de algodón es conocido en aplicaciones textiles porque no produce alergias y absorbe con facilidad el sudor. El lino es más resistente pero menos elástico y flexible, es más caro y se emplea en mantelerías o confección de vestidos

Una buena parte de fibras vegetales se usan en la elaboración de papel. Por ejemplo, el algodón y el lino son base de algunos papeles rugosos de calidad, mientras que las gramíneas, el cáñamo y el yute se utilizan para fabricar papeles de embalaje y otros de menor calidad. El papel de los periódicos y el papel de tipo kraft se fabrican con fibra de madera tratada químicamente. Con fibra de madera y de caña de azúcar, y mediante un proceso similar al de la fabricación del papel, se obtienen tableros para la construcción.

*Fibras de Origen Animal.*- químicamente las fibras de origen animal son proteínas complejas resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos, así como también, en ciertas condiciones, a la acción de ciertos ácidos minerales como el ácido sulfúrico. Por el contrario, las bases o álcalis poco agresivos pueden dañar las

fibras proteínicas y los álcalis fuertes como el hidróxido de sodio pueden disolverlas por completo.

El pelaje de diversas especies es utilizado como fibras por sus buenas condiciones de hilabilidad. La lana por ejemplo, que se obtiene del pelaje que recubre el cuerpo de las ovejas, es muy elástica aunque el calor húmedo provoca alteraciones en ella.

La seda es el único filamento continuo producido por gusanos. Esta fibra tiene mayor resistencia que el algodón y su elasticidad es notable. Su principal productor es China.

El cuero es la piel de un animal sometido a un proceso llamado curtido, que consiste en eliminar el pelaje y la epidermis dejando la dermis. Luego se trata químicamente para que gane plasticidad y se vuelva imputrescible.

Las **fibras químicas** a su vez se dividen en artificiales y sintéticas o también llamadas fibras no celulósicas hechas por el hombre.

*Fibras químicas artificiales.*- sus materias primas provienen de la naturaleza, principalmente la celulosa, pero han sido procesadas por el hombre para obtenerlas como producto terminado. Para su obtención se utilizan diversos procedimientos; por ejemplo, las fibras celulósicas se toman de la coagulación de una masa pastosa producto del molido y disolución de celulosa. Suelen tener una gran resistencia cuando están secas, y las más importantes son el rayón (CV), el acetato y las fibras de acetato (CA).

*Fibras químicas sintéticas.*- no dependen de cosechas y su volumen de producción puede ser modificado a voluntad. Las propiedades de las fibras químicas pueden ser modificables; así por ejemplo, puede variar la resistencia, el color o el brillo. Una de sus principales desventajas es la elevada absorción de agua, pero a pesar de esto son las que más se utilizan actualmente por su gran duración y resistencia a los agentes externos.

De las fibras obtenidas por policondensación, en especial de las poliamidas, la fibra más conocida es el *nylon*. Es la más resistente y dura de todas las fibras; además, es estable al calor de modo que puede hilarse por fusión. Es relevante su condición hidrofóbica, lo que le permite secarse con gran rapidez. Gracias a su alta resistencia a la tracción, elasticidad y resistencia a la abrasión, es ideal para aplicaciones como cables, medias y alfombras. Como desventajas se señala que la luz ultravioleta la degrada, por lo tanto puede amarillear con el tiempo. Además, no tiene buena percepción al tacto y produce sensación de frío. Hay dos tipos principales de nylon: nylon 6 y nylon 6,6. Los dos pueden hilarse y se diferencian en su punto de fusión: 215°C y 270°C, respectivamente.

De las fibras acrílicas, la más importante es el *poliacrilonitrilo*, que no puede hilarse fundido porque no es estable al calor. Es por esto que, aunque hace tiempo que se conocía, no se hiló hasta la década de los cincuenta en la que se encontró un disolvente para él. Estas fibras son resistentes a la adición de colorantes, por lo que se deben incluir en su composición otros monómeros. Tienen una apariencia y un tacto parecido a la lana, aunque más barata. Son bastante resistentes y estables a la luz, se lavan mejor que la lana y pueden hacerse pliegues permanentes. Un gran problema es que son inflamables, aunque no son peligrosas porque los fabricantes les añaden retardantes. Se usan principalmente para suéteres, vestidos y calcetería, sobre todo sustituyendo a la lana.

La única fibra de poliéster importante es el *politereftalato de etileno*, que es un polímero estable y puede hilarse por fusión. Las fibras son algo rígidas debido a la reticulación. La mayoría se usa para telas y suele estar mezclada con algodón. También se la usa para la confección de alfombras, tapetes y fundas de almohada. Tiene varias desventajas: baja retención de la humedad, produce sensación de frío, adquiere fácilmente carga estática atrayendo las partículas de suciedad, aceites y grasas.

Entre este tipo de fibras se encuentra una fibra muy importante en los usos industriales e ingenieriles, el *kevlar*, la cual tiene un desempeño muy superior a otras fibras, puesto que compagina la resistencia y el escaso peso con la



comodidad y la protección. El kevlar es aproximadamente cinco veces más resistente que el acero en condiciones de igualdad de peso. Es por esta razón que se utiliza en la industria aeroespacial.

Existen además otras fibras comercialmente conocidas. Así por ejemplo, de las polivinílicas el rhovil, de las polipropilénicas el merklon y de las de poliuretano el nylon. [CEGARRA, SIMBAÑA, INTERNET 16]

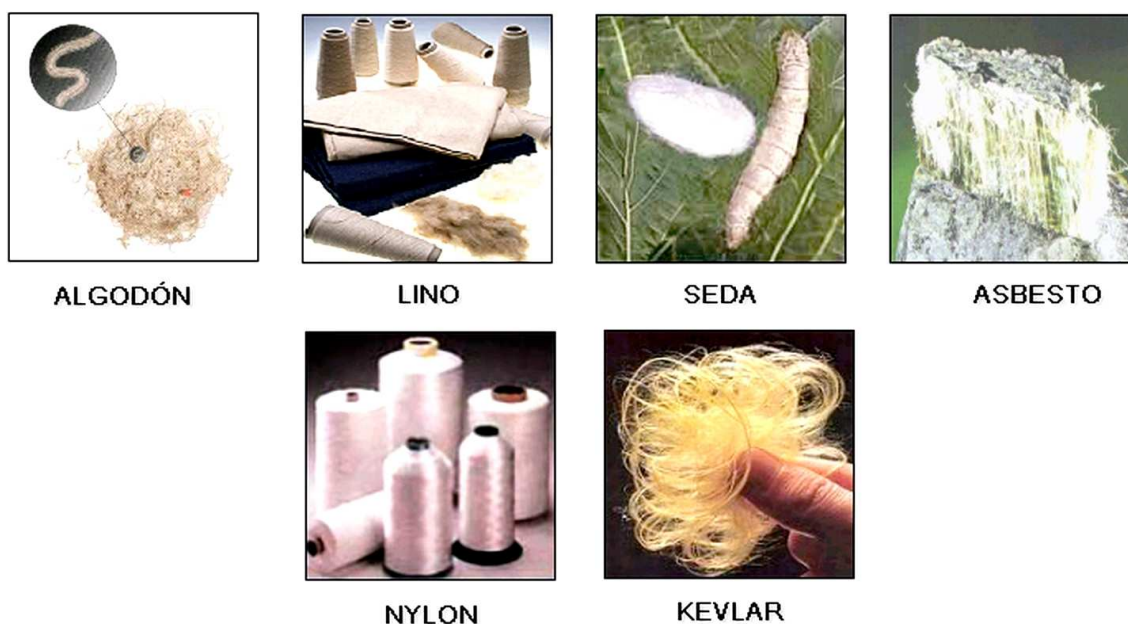


Figura 1.2. Algunos tipos de fibras comerciales.

### 1.1.2. FIBRAS NATURALES DE ORIGEN VEGETAL

Las fibras naturales de origen vegetal se dividen en dos grandes grupos: las blandas, que son básicamente de la corteza o fruto de plantas, como el lino, algodón, coco, damagua, entre otras; las duras, que tienen su origen en las hojas, como la cabuya, abacá, piña, palmas, entre otras.

Los usos de las fibras naturales son legendarios y de alta aplicabilidad dentro de la agricultura, ambiente, farmacéutica, cordelería, empaques, aglomerados, construcción, decoración, artesanías, industria automotriz, textiles, confecciones, papel, aseo y otros usos como combustible, aislante térmico, entre otros. En la

actualidad ha cobrado enorme importancia la investigación sobre el desarrollo de nuevos productos donde se utiliza fibras naturales. Se ha reportado, por ejemplo, la generación de plásticos inteligentes que permiten el paso de gases, así como plásticos biodegradables para proteger el ambiente.

Algunas fibras verdes como el lino, algodón, yute, sisal, kenaf y fibras de plantas aliadas, que han sido usadas desde hace más de 6000 a.c., empiezan ya a utilizarse como materia prima no solamente en la industria textil, sino también como refuerzos de materiales compuestos amigables con el medio ambiente usados en diferentes áreas de aplicación como materiales de construcción, tableros de partículas, tablas de aislamiento, forraje y nutrición, cosméticos, medicinas y recursos para otros bio-polímeros.

El cultivo de plantas de las que se obtienen fibras no causa ningún efecto perturbador en el ecosistema, puede hacerse en zonas climáticas diferentes y permite el reciclaje del anhídrido carbónico para la atmósfera de la Tierra. Plantas verdes, como el lino y el cáñamo, pueden usarse para limpieza de suelo contaminado por los metales pesados, o por la extracción de cadmio, plomo, y cobre. En la figura 1.3 se presenta un resumen de algunos de los usos comunes de fibras usadas industrialmente en la actualidad.

Para el Ecuador y el mundo en general, la revitalización del uso de estas plantas es muy importante porque proporcionan un mejor balance agrícola en la región y reducen el déficit de pulpa celulósica. Un factor importante lo constituyen las expectativas de la población frente al consumo y demanda de fibra natural. El panorama actual obliga a buscar usos alternativos, principalmente productos a base de fibras de buena calidad, precio competitivo y altas prestaciones. El objetivo principal es convertir al cultivo de plantas para la obtención de fibras en una actividad sostenida y sustentable en el tiempo.

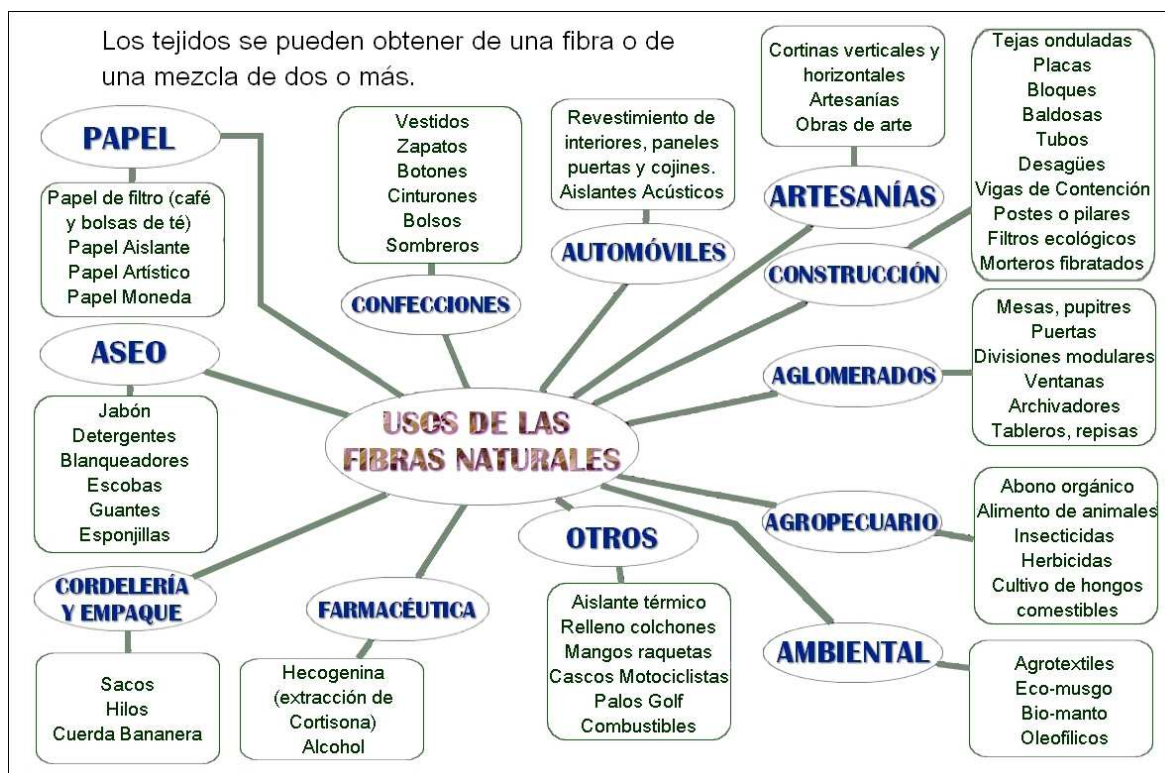


Figura 1.3. Usos de las fibras naturales.

### 1.1.2.1. Características Físico - Químicas

Las fibras naturales de origen vegetal están compuestas de forma general por tres grupos de sustancias, que conforman la pared celular. Estas sustancias en forma de macromoléculas son: celulosa, poliosas (hemicelulosas) y ligninas.

La celulosa es el homo-polisacárido que se encuentra en mayor proporción en los vegetales. Es una estructura básica de las células de las plantas y la sustancia más importante producida por este organismo vivo, siendo el principal componente de la pared celular. En la figura 1.4 se observa la estructura molecular de la celulosa y su característica cristalina.

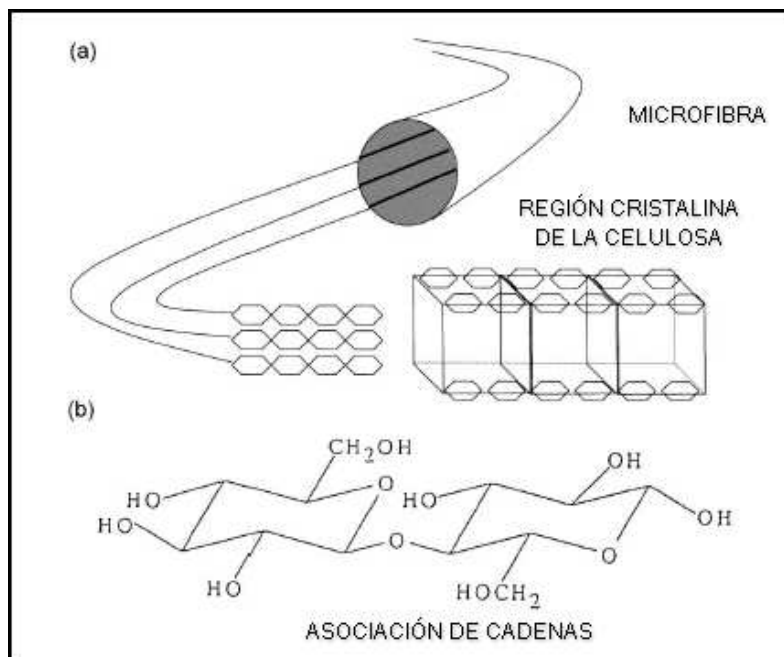


Figura 1.4. Estructura cristalina de la celulosa. [LILHOLT & LAWThER]

La fibra de celulosa es en general una estructura muy firme y poco sensible a la degradación. La cristalinidad de la celulosa se encuentra en función de la gran cantidad de puentes de hidrógeno, hecho que además explica porque la celulosa no es soluble en los sistemas de solventes usuales. Ella es la responsable de determinadas propiedades físicas y mecánicas de las fibras por constituir el material de sostén del vegetal, dándole resistencia y tenacidad.

Las hemicelulosas o poliosas son heteropolisacáridos de alta masa molar, que se encuentran constituidos por diferentes unidades de monosacáridos: pentosas, hexosas y ácidos urónicos, enlazados entre sí por enlaces glicosídicos, formando estructuras ramificadas y en general amorfas. Las hemicelulosas se encuentran asociadas con la celulosa mediante fuertes interacciones polisacárido – polisacárido. El contenido de poliosas varía radialmente aumentando hacia el centro y variando en su composición de azúcares. El tipo y contenido de hemicelulosas presentes varía con la especie, la edad, parte de la planta, y en muchas especies su regularidad está relacionada con criterios taxonómicos. La función de las hemicelulosas parece ser de intermediario entre la celulosa y la lignina, tal vez facilitando la incrustación de las microfibrillas.

La lignina es una macromolécula de naturaleza polimérica especial, formada por la polimerización deshidrogenativa al azar de alcoholes parahidroxicinámicos. Son fracciones no carbohidratadas libres de extraíbles, extremadamente complejas y difíciles de caracterizar. Constituyen un polímero aromático, heterogéneo, ramificado, donde no existe ninguna unidad repetida definidamente. Esta sustancia amorfa es localizada como componente de la lámina media y también en la pared secundaria. Durante el desarrollo de la célula, la lignina es incorporada como último componente de la pared celular interpenetrando las fibrillas y fortaleciendo la pared celular.

Existen numerosos compuestos que pueden tener gran influencia en las propiedades y calidad de la fibra, aunque ellos contribuyan solo en algún porcentaje en la masa total. A este grupo de compuestos se les denomina comúnmente *sustancias extraíbles*. Los componentes químicos aquí presentes son de diferentes clases y pueden ser divididos a su vez, y de forma más simple, en componentes orgánicos y componentes inorgánicos, siendo estos últimos en los que se puede encontrar ciertos iones metálicos que son esenciales para el normal desarrollo de la planta. Entre los compuestos orgánicos se pueden encontrar hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ácidos alifáticos, ceras, glicéridos, y compuestos nitrogenados.

Los componentes inorgánicos o sustancias minerales están en varios contenidos que pueden encontrarse en las hojas, ramas, corteza, raíces. Las condiciones del suelo y la edad influyen en los contenidos de sustancias minerales.

Examinando la constitución de todas las fibras textiles, no se encuentra con un punto común en todas ellas, ya que sus moléculas están agrupadas formando polímeros lineales diferentes. Así, por ejemplo, la lana y la seda son polipéptidos, las fibras vegetales y el rayón son compuestos de policelobiosa, y el nylon es una poliamida, de tal forma que los filamentos fibrilares están orientados por regla general, a lo largo del eje de estas macromoléculas, dependiendo de la forma y magnitud de esta orientación determinadas propiedades físicas. Las dimensiones de las fibras vegetales varían entre ellas sin tener patrones comunes para

relacionar su geometría con su procedencia, como se puede observar en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Dimensiones de fibras vegetales. [LILHOLT & LAWOTHER]

Dimensiones Promedio de Fibras vegetales			
Fibra Vegetal	Longitud [mm]	Diámetro [um]	Razón
<i>Fibras Bastas</i>			
Flax (hebra)	33,0	19,0	1700,0
Cáñamo (hebra)	25,0	25,0	1000,0
Yute (hebra)	3,0	20,0	150,0
<i>Fibras del tallo</i>			
Caña	1,4	15,0	90,0
<i>Fibras de Semillas</i>			
Algodón	18,0	20,0	900,0
<i>Fibras de Hierbas</i>			
Bambú	2,7	14,0	200,0
<i>Fibras de madera</i>			
Suave	3,3	33,0	100,0
Dura	1,0	20,0	50,0

### 1.1.2.2. Propiedades Mecánicas

Las fibras naturales han sido usadas para reforzar materiales compuestos desde épocas pretéritas porque la experiencia ha demostrado que son bastante fuertes y resistentes. Para obtener buenas propiedades mecánicas en estos materiales se debe partir de fibras fuertes, con buena adherencia con la matriz y con una orientación adecuada con respecto a la dirección de la carga a la que va a someterse. En la tabla 1.2 se lista los módulos de elasticidad a diferentes condiciones de humedad mientras en la tabla 1.3 se presentan la composición y la resistencia a la tracción de algunas fibras conocidas.

Tabla 1.2. Constante elástica de fibras vegetales.

<b>Valores Experimentales de Constante Elástica para Fibras Naturales</b>		
<i>Fibra</i>	<i>Condiciones</i>	<i>E exp [GPa]</i>
FLAX	Sin Humedad	80
	Secado bajo tensión	110
	65% de Humedad relativa, descargado	74
CÁÑAMO	Sin Humedad	70
	Secado bajo tensión	87
	65% de Humedad relativa, cargado	83
	65% de Humedad relativa, descargado	93 - 103
YUTE	Sin Humedad	66
RAMIO	Sin Humedad	60 - 70
	Secado bajo tensión	92

La estructura química, principalmente los tipos y la densidad de los enlaces, gobierna en los diferentes materiales o compuestos, y además sobre los valores del esfuerzo teórico máximo, el cual puede ser estimado de acuerdo a los modelos usados a través de los años por algunos autores.

La molécula de celulosa es la base sobre la cual radican las propiedades mecánicas de las fibras naturales de origen vegetal. La celda unitaria de celulosa está compuesta de anillos de glucosa dispuestos a  $180^\circ$  y separados el uno del otro a una distancia de 1,03 nm (Evans, 1948). La celulosa se presenta en dos formas cristalográficas, la primera con cadenas paralelas y la segunda con cadenas antiparalelas.

El cálculo del esfuerzo teórico máximo y de la deformación está basado en una estructura ideal, la cual en la mayoría de los casos es cristalina. Esto quiere decir que las interacciones átomo-átomo y los parámetros estructurales deberían ser tomadas en cuenta. Los parámetros estructurales son la fuerza entre átomos y la densidad de enlaces; es decir, las cadenas, su orientación y su número, y en la mayoría de los casos la dirección de la carga con respecto a las fibras

individuales en un compuesto dado. Algunos valores de fuerza y densidad de enlaces se pueden observar en la tabla 1.4.

Tabla 1.3. Composición química y resistencia a la tracción de algunas fibras vegetales.  
[LILHOLT & LAWOTHER]

Propiedades mecánicas y químicas de algunas fibras naturales						
Fibra/ Atado de fibras	Contenido de Celulosa [%]	Contenido de Lignina [%]	Contenido de Pectina [%]	Esfuerzo a la tracción [MPa]	Rigidez [Gpa]	Observación
LINO	65-85	1-4	5-12	500-900	50-70	Atado de fibras
CÁÑAMO	60-77	3-10	5-14	350-800	30-60	Atado de fibras
YUTE	45-63	12-25	4-10	200-450	20-55	Atado de fibras
KENAF	45-57	8-13	3-5	-	-	Atado de fibras
SISAL	50-64	-	-	100-850	9-22	Atado de fibras
ABACÁ	60	12-13	1	-	-	Atado de fibras
COIR	30	40-45	-	-	-	Atado de fibras
ALGODÓN	85-90	-	0-1	-	-	Altacelulosa
MADERA SUAVE	40-45	26-34	0-1	98-170	10-50	Bajo Costo
MADERA DURA	40-50	20-30	0-1	-	-	Bajo Costo
PAJA DE TRIGO	38-41	12-16	0-1	bajo	bajo	Disponible en material de desperdicio

Tabla 1.4. Densidad de enlaces y esfuerzo teórico último de algunos materiales.  
[LILHOLT & LAWOTHER]

Densidad de enlaces y esfuerzo último teórico de algunos materiales					
<i>Material ( Dirección de Carga)</i>	<i>Area/cadena (nm)<sup>2</sup></i>	<i>Distancia entre cadenas [nm]</i>	<i>Cadenas/Area [10<sup>18</sup> m<sup>-2</sup>]</i>	<i>Fuerza Última [10<sup>-19</sup> N]</i>	<i>Esfuerzo Máximo teórico [GPa]</i>
Diamante (<111>)	0,055	0,23	18,2	6,1	111
Grafito (en el plano de dirección C-C)	0,071	0,27	14	8,3	116
Polietileno	0,182	0,43	5,5	6,1	34
(Cadenas C-C)	0,182	0,43	5,5	3,4 - 3,6	19 - 20
Celoulosa (a lo largo de la cadena)	0,323	0,57	3,1	3,9 - 6,1	12 - 19
Tricetato de Celulosa (a lo largo de la cadena)	0,641	0,8	1,56	3,8 - 6,1	6 - 9,5



La resistencia real de las fibras depende de la orientación de su estructura cristalina. La comparación entre el esfuerzo último estimado para una orientación cristalina perfecta y para una completamente randómica, es decir de un material isotrópico, indica que el del isotrópico es 0,17 el esfuerzo último ideal, mientras que en la práctica el esfuerzo último llega a ser de entre 0,30 y 0,50 del esfuerzo último ideal.

La estructura de la fibra puede contener varias imperfecciones y defectos, mismos que van a convertirse en concentradores de esfuerzos en el momento en que la fibra esté sometida a algún tipo de esfuerzo. La cantidad de estos defectos depende de la anisotropía de la fibra. La concentración de estas fallas en otra dirección que no sea la de la aplicación de alguna fuerza no es decisiva en la resistencia a dicha carga.

El grado de polimerización es inversamente proporcional a la resistencia de una fibra, siempre que se considere que esta posee una estructura ideal. El efecto de la región amorfa incrementa su dependencia y reduce el esfuerzo máximo final. Sin embargo, para un alto grado de polimerización la corrección es del 10%. En la tabla 1.5 se presentan los valores del módulo de elasticidad experimental y teórico de algunas fibras.

Tabla 1.5. Constante elástica teórica y experimental de algunos materiales. [LILHOLT & LAWATHER]

<b>Constantes elásticas experimentales y teóricas</b>			
Material	Cadenas/área [ $10^{18} \text{ m}^{-2}$ ]	E teórico [GPa]	E exp [GPa]
Diamante	18,2	900	1100-1200
Grafito	14		170-700
Polietileno	5,5	182	240-360
Celulosa	3,1	123	130

En suma, los factores que afectan a la variabilidad de la resistencia de las fibras de una misma planta son los siguientes:

- (i) cristalinidad,
- (ii) orientación de cadenas moleculares,
- (iii) imperfecciones, defectos, roturas,
- (iv) grados de polimerización.

No se puede esperar que la deformación en este tipo de fibras sea alta. Es más, los valores de deformación de fibras naturales de origen vegetal son muy moderados con respecto a los de las fibras sintéticas.

## **1.2. EL ABACÁ EN EL ECUADOR**

El abacá o cáñamo de Manila es una planta herbácea originaria de Filipinas y Malasia, principalmente de las islas de Burneo y Sumatra. Este y el banano tienen flores y frutas similares pero se diferencian por la forma de sus hojas; las del banano son redondeadas, mientras que las de abacá son más pequeñas y puntiagudas. Esta planta, que alcanza un promedio de dos metros de altura, tiene una gran importancia económica principalmente por la fibra que se extrae de sus pseudotallos ya que se utiliza para algunas aplicaciones artesanales e industriales. Sus frutos, mostrados en la figura 1.5, no son comestibles.

Los primeros cultivos a gran escala de abacá se realizaron en Sumatra alrededor del año 1925, siguiendo las técnicas utilizadas en Filipinas en el siglo XIX. El Reino Unido, que ocupaba el norte de Burneo, apoyaba de gran manera el cultivo de abacá en estos territorios para su abastecimiento y del resto de Europa; mientras tanto, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos investigaba la posibilidad de cultivarla en algunos países de Centro América. Todo este desarrollo sufrió un gran descenso cuando en 1930, debido a la Segunda Guerra Mundial, el ejército japonés destruyó los campos de Filipinas destinados al cultivo

de abacá, resignando así las posibilidades de crecimiento que se proyectaban para esta actividad en ese país asiático.

Debido a estos problemas se buscó nuevos lugares para el cultivo que cuenten con las condiciones propicias para esta actividad. En la actualidad las plantaciones de abacá a nivel mundial están en un 80% en Filipinas y Malasia (Sumatra), un 15% en Ecuador y el resto en Panamá, Costa Rica, Honduras y Guatemala.



Figura 1.5. Fruto de abacá. [Internet 1]

Se sabe que los mejores resultados para este cultivo se han obtenido en zonas donde se mantenga un clima tropical-húmedo, temperaturas entre los 22 y 28°C, precipitación fluvial entre 1800 y 2500 mm/año, altitud menor de 600 m.s.n.m., donde no existan vientos fuertes, y donde el Sol y la humedad se encuentren en equilibrio. En el Ecuador, todas estas condiciones, incluida una excelente calidad del suelo, las cumple plenamente el valle de Santo Domingo, que comparten las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas, Esmeraldas, Los Ríos y Manabí. La figura 1.6 muestra una plantación de abacá localizada en la capital de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.



Figura 1.6. Plantaciones de abacá en Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador.

En el valle de Santo Domingo existen alrededor de 14000 hectáreas dedicadas a esta actividad y que producen un promedio de 12000 TM de fibra al año para la exportación. Sin embargo, es importante señalar que solamente alrededor del 14% de la planta de abacá se extrae como fibra para exportar. Es decir, el desperdicio llega al 84%-85%. Es por esta razón que se han buscado algunas alternativas para utilizar el resto del vegetal, y de esta manera agregar valor a las exportaciones. [MOREJÓN, NARVÁEZ]

### **1.2.1. MERCADO ACTUAL DEL ABACÁ**

La fibra que se exporta se utiliza en el exterior como materia prima para la fabricación de papel moneda, bolsas de té y como aislante de cables de conducción eléctrica. Existen además prendas de vestir, alfombras, papel, esteras y muebles que se hacen a base de estas fibras (figura 1.7), pero son producidos artesanalmente.

Bajo este marco, la producción de fibra de abacá en el Ecuador ha pasado por diferentes fases. En el año 1999 llegó a constituir un 0,1% del PIB; la producción mantenía un crecimiento sostenido hasta que entre 1995 y 1998 se generó gran demanda a nivel mundial, lo cual incrementó el área cultivada y esto produjo una sobreproducción del cáñamo. A continuación, el Japón y otros países

consumidores, redujeron su demanda, causando así una reducción mayor del precio del producto.



Figura 1.7. Productos artesanales de abacá. [Internet]

El sector abacalero sufrió severamente la crisis económica del Ecuador debido al colapso del sistema bancario y el cambio de moneda experimentados a principios del presente siglo. Todos estos factores derivaron en una dura crisis del sector que depende fuertemente del mercado exterior puesto que no existe aún industria nacional que emplee el abacá como materia prima.

En la actualidad se está buscando mitigar este problema investigando para encontrar nuevos usos del abacá, sobre todo para producir productos elaborados que tengan un valor agregado significativo. Los proyectos tienen como objetivo elevar los volúmenes de exportación de este tipo de productos, que históricamente han sido insignificantes con respecto a los de fibra sin procesar, que se pueden apreciar en la figura 1.8.

Parece ser que el componente de abacá en algunos usos como el papel en general, el papel especial (para billete), o papel para envoltura de bolsas de té, por ejemplo, es muy marginal. Las industrias dedicadas a elaborar este tipo de productos son de número limitado y gran poder mercantil, de modo que pueden controlar el precio y el volumen de demanda de sus insumos como en el caso del abacá.

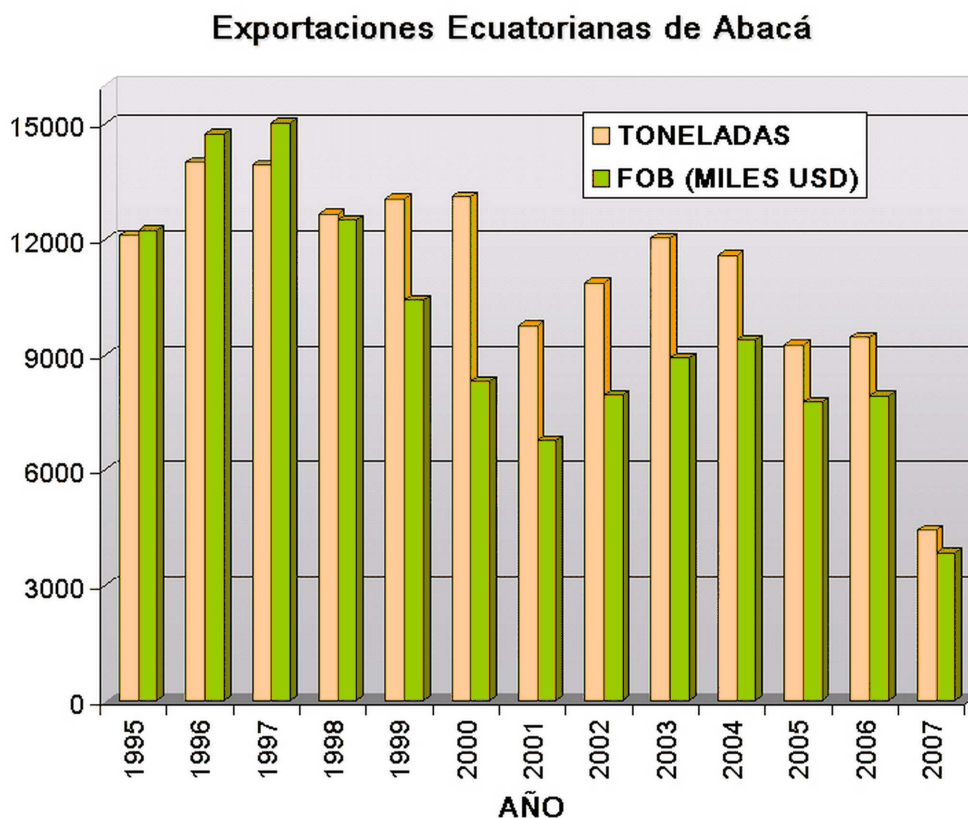


Figura 1.8. Volumen de exportación de abacá en el Ecuador desde el año 1995 hasta 2007. [CORPEI]

### 1.2.2. CARACTERÍSTICAS

El abacá es una planta perenne que nace de rizomas cortos, de los cuales emerge un gran número de hijuelos formando un grupo de tallos de 3 a 6 metros de altura (figura 1.9). Es un vegetal de producción perenne, con un ciclo inicial de 18 a 24 meses, luego de lo cual se realizan cosechas cada 2 o 3 meses. Su periodo de producción es aproximadamente de 15 a 20 años.





Figura 1.9. Pseudotallos múltiples de la planta de abacá, de donde se obtiene principalmente la fibra.

Las fibras se localizan a lo largo de los tejidos carnosos de las hojas grandes o del peciolo. Estas fibras tienen textura dura y rígida, son ligeras de peso, color crema y resistentes al agua salada. La longitud aproximada de cada hebra varía entre los 2 y 4 m, mientras que el diámetro está comprendido entre 0,2 y 1,1 mm. Las características mecánicas y químicas de las fibras dependen del desarrollo de la planta y de la sección de la planta del cual se haya tomado las muestras.

El abacá tiene la siguiente clasificación taxonómica:

Nombre binomial:	Musa Textilis
Reino:	Plantae
División:	Angiosperma (Magnoliophyta)
Clase:	Monocotiledóneas (Liliopsida)
Orden:	Zingiberales
Familia:	Musaceae
Género:	Musa

### 1.2.2.1. Composición Química

La fibra de abacá tiene la siguiente composición: 10% humedad, 63,2% celulosa, 19,6% hemicelulosa, 0,5% pectina, 1,4% extracto aceroso, 0,2% grasa y cera, y 5,1% lignina. [GUERRÓN]

La celulosa es el biopolímero más abundante, biodegradable y renovable de los productos macromoleculares naturales. La característica química más importante de la celulosa es la existencia de uniones 1,4 beta entre las unidades de glucoanhidropiranosas. La estructura molecular consiste de unidades del disacárido, celobiosa, que se repiten formando cadenas macromoleculares, compactadas entre sí por fuertes enlaces hidrógeno inter e intramoleculares (figura 1.10). Estas interacciones son responsables de las excelentes propiedades mecánicas de la celulosa y de su baja solubilidad, lo que afecta la modificación química del polímero. [Internet 7]

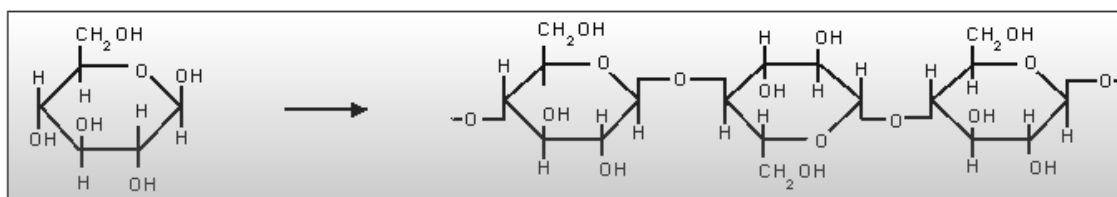


Figura 1.10. Estructura molecular de la celulosa.

Además de su alto contenido en el abacá, la celulosa de esta planta tiene un alto grado de polimerización (1990 unidades de celobiosa). Esto otorga buenas propiedades mecánicas a la fibra, ubicándola entre las llamadas fibras duras. A pesar de que la resistencia mecánica varía con el grado de la fibra, se estima que tiene un valor tres veces mayor que la resistencia del algodón y 1,4 veces la del sisal, henequén y cabuya.

### 1.2.2.2. Variedades

Existen algunas variedades de abacá, pero no todas se cultivan comercialmente. En el país son cultivadas en mayor cantidad la Bungalanón y marginalmente la Tangongón. Las diferencias más notables entre ambas especies se citan en la



tabla 1.6. En este estudio se utilizará las fibras de abacá de variedad bungalanón, puesto que su cultivo es muy superior al de la otra variedad, que está en vías de desaparición.

Tabla 1.6. Diferencias entre los tipos de fibras que se cultivan en el Ecuador.

BUNGALANÓN	TANGONGÓN
Variedad Precoz	Producción de hijuelos limitados
Mayor desarrollo como planta	Tallos de diámetro y longitud mayores
Tallos pequeños y delgados	Ligeramente más resistente al mal de Panamá
Color café en la base y verde brillante en la parte superior	Fibra áspera pero fuerte
Fibras blancas y suaves	

### 1.2.2.3. Grado de la Fibra

Un detalle que no se puede pasar por alto en la fibra de abacá es el grado al cual pertenece. Esta diferenciación se hace en el momento de la clasificación de la fibra y depende exclusivamente del color de esta (figura 1.11). Esta diferencia de coloración tiene que ver con la zona del vegetal de la cual fue extraída: del interior o exterior del pseudotallo. Se denomina a la fibra más clara como de grado uno y a la más oscura de grado cinco, que es la de menor calidad.



Figura 1.11. Fibras de abacá de diferentes grados. El color los diferencia.

Es importante señalar que no solo la calidad sino también las propiedades mecánicas de la fibra, dependerán de su grado, incluso comparadas con las de otra fibra de la misma planta. El registro de esta variación se amplía en los resultados de las pruebas realizadas para este efecto en el Laboratorio de Textiles de la Escuela Politécnica Nacional (Anexo 1).

### 1.2.3. TÉCNICAS PARA EL CULTIVO

En el Ecuador se obtiene una productividad promedio de fibra de 1,1 a 2 TM/ha. Para llegar a este objetivo se lleva a cabo una serie de operaciones antes de la cosecha (figura 1.12), que se describen brevemente a continuación:

*Corona de hacha.*- el fin es eliminar los troncos que no han sido destruidos con la socla y que impiden el desarrollo de la planta. Se realiza de 3 a 4 veces por año.

*Deshije.*- consiste en eliminar los pseudotallos improductivos y disminuir la competencia con los productores de tallos. La densidad de pseudotallos debe estar en un principio entre 20 y 25 por planta hasta disminuirlos a 6 y 8. En la cosecha este número es menor para disminuir costos de producción. El primer

deshije se realiza a los 6 meses, luego se van ampliando los periodos hasta los 18 meses.

*Deshoje.*- se realiza Al mismo tiempo, que el deshije y sirve para eliminar material indeseable que quita la luz y el aire a la plantación.

*Deshierbe.*- hasta que el cultivo se desarrolle adecuadamente es necesario realizar entre 5 y 6 deshiebres hasta la primera cosecha, luego se repetirá esta operación en cada cosecha.



Figura 1.12. Agricultor oriental en plantación de abacá.

#### **1.2.4. TÉCNICAS PARA LA COSECHA**

El procedimiento de cosecha influye en las características finales de la fibra; sobre todo, al final se enfatiza la separación de los diferentes grados. Esta debe realizarse antes de que el tallo florezca porque en esta etapa es más fuerte y resistente. El peso de todo el tallo en base húmeda es de aproximadamente 60 kg y de éste, el peso final de la fibra seca y limpia es de apenas el 2%.

La fibra se obtiene dentro de los tallos falsos de longitud aproximada de 3,5 metros, formados por superposición de vainas foliares. Para su cosecha se debe seguir los siguientes pasos:

*Sunke o deshoje.*- se deshojan y despuntan los pseudotallos que están listos para deshojar.

*Corte de pseudotallos.*- se cortan a 10 cm. del suelo, con un bisel y hacia fuera para evitar la pudrición y el ingreso de enfermedades por la sección cortada.

*Tuxeado.*- en el tallo cortado que se encuentra en el suelo se separan las vainas que le rodean y con la ayuda de un cuchillo se cortan en hilos o “tuxies” de 5 a 8 cm de ancho por 2 a 4 mm de espesor, con la longitud determinada por el tamaño del tallo (figura 1.13). Las vainas de las hojas cambian de color y textura de acuerdo a la posición en el tallo.



Figura 1.13. a) Tuxies de abacá. b) Sunkes o deshojes.

- 1) Vainas del exterior (baba).- son de color café oscuro, con tiras verdes debido a la exposición al sol.
- 2) Vainas cerca del exterior (segunda baba).- son rayadas de verde y violeta leve.
- 3) Vainas del medio.- su color es verde agua o ligeramente amarillas.
- 4) Vainas del interior.- son casi blancas.

*Transporte de tuxie.*- se agrupan los tuxies y se amarran formando bultos o “tongos” para transportarlos hacia la desfibradora (figura 1.14).





Figura 1.14. Transporte animal de la fibra dentro de la finca.

*Desfibrado.*- se deberá hacer entre 8 y 12 horas luego del corte del tallo, caso contrario la fibra se oscurece y su calidad decae. Las máquinas de desfibrado (como la de la figura 1.15) poseen generalmente un motor de entre 8 y 14 hp, acoplado a un rodillo tractor, otro rodillo loco y un juego de cuchillas que se cierra y abre por medio de un mecanismo. Con esto se atrapa la mitad del tuxie y el resto se envuelve en el rodillo.

La tasa promedio de desfibrado de este tipo de máquinas oscila entre los 120 y los 200 kg/día. Este proceso produce jugo tánico que se caracteriza por tener pH ácido. Este residuo debe ser eliminado siguiendo procesos adecuados debido a su toxicidad.



Figura 1.15. Desfibradora, nótese los diferentes grados a la salida de la máquina.

*Secado.*- la fibra tiene aproximadamente un 10% de humedad. Esta se seca en la misma finca de origen en tendales de pambil o caña guadúa (figura 1.16). El tiempo de secado puede ser de horas o días, dependiendo de las condiciones ambientales.



Figura 1.16. Secado de la fibra.

*Clasificación.*- Al mismo tiempo, que se disponen para el secado, se separa las fibras de acuerdo a su color y su posición original en el tallo y de esta manera se separa la fibra en grados.

*Almacenamiento.*- para almacenarse, las fibras de diferentes formas se empaquetan según sea el requerimiento. En la figura 1.17 se puede observar una configuración de empaquetamiento realizada en una finca productora en particular. Luego el almacenamiento se hace en bodegas secas cubiertas y que posean ventilación para evitar el deterioro de las mismas (figura 1.18).



Figura 1.17. (a) Prensa para empaquetar la fibra. (b) Bulto listo para el almacenado.



Figura 1.18. Almacenamiento de la fibra en bodega cerrada.



### 1.2.5. NUEVAS PERSPECTIVAS DE USO DEL ABACÁ

Como se indicó anteriormente, el cultivo del abacá tiene buena acogida en el Ecuador. Sin embargo, solamente alrededor del 14% del abacá se extrae como fibra para la exportación. Este bajo aprovechamiento se debe principalmente a la utilización marginal del producto en su destino final, ya sea para la elaboración de papeles especiales o para reforzar el aislamiento de conductores eléctricos. Parecería entonces que la explotación del “desperdicio” permitiría el desarrollo de industrias nacionales con capacidad de exportar no solo materia prima sino productos terminados con valor agregado.

La búsqueda sistemática de potenciales aplicaciones para las fibras naturales no solo apunta al desarrollo agroindustrial ecuatoriano. Además, ataca problemas graves a nivel mundial como el deterioro del medio ambiente, el cuidado del suelo\*, la dependencia de productos derivados del petróleo (oleofinas como el polipropileno y el polietileno) y el desempleo en regiones rurales. De hecho, la ampliación de mercado permitiría generar puestos de trabajo, no solamente en la fase de producción, sino también en la comercialización y transporte de los productos generados.

En Indonesia, actualmente primer productor mundial de la planta, el desarrollo de la economía tiene un gran apoyo en la industria del papel de abacá. El aprovechamiento del producto va más allá de aumentar los volúmenes de exportación de fibra sin procesar. Es así como el procesamiento del abacá para la obtención del papel y productos afines que se lleva a cabo en la isla aumenta el valor agregado de la fibra y genera puestos de trabajo para los habitantes de ese país asiático. Súmase la investigación para posibles aplicaciones ligadas a este ámbito.

---

\* Algunos estudios añaden que el monocultivo del abacá, así como la de cualquier palmera, protege al suelo de los daños de la erosión. [INTERNET11]



A nivel internacional muchas empresas han mostrado gran interés en la investigación para la utilización de fibras vegetales, en especial el abacá. No solo los productos artesanales, en especial los del área textil, y los relacionados con la industria del papel (figura 1.19) van teniendo gran acogida en el mercado mundial, sino que aparece con cada vez más fuerza una marcada predilección de industrias para procesar materiales de ingeniería usando fibras vegetales como refuerzos de compuestos por sobre las fibras artificiales típicamente usadas.



Figura 1.19. Industria papelera a base de abacá - Indonesia. [INTERNET 15]

Un caso bastante conocido en estas prácticas es el de la gigante automotriz Daimler Chrysler, que con el desarrollo de su llamado “Proyecto Abacá” viene impulsando la fabricación de autopartes partiendo de resinas reforzadas con fibras de abacá (tabla 1.7). La promoción de este proyecto le ha significado a la marca de automóviles un gran número de reconocimientos, no solo de parte de instituciones ecologistas por el uso de materiales biodegradables en sus productos, y por incentivar la siembra y cultivo del abacá en Indonesia, sino por los industriales automotrices que elogian los excelentes resultados conseguidos al elaborar paneles interiores reforzados con fibras largas de abacá (figura 1.20) que presentan mayor resistencia al impacto que los que están hechos a base de materiales convencionales y de impacto ecológico negativo como el PVC.

Tabla 1.7. Industrias automotrices que lideran el uso de materiales biodegradables.

[INTERNET 15]

Industrias Líderes en Áreas Claves					
Uso de Materiales Biodegradables		Calidad del Aire Interior		Reducción de uso de PVC	
TOYOTA	B	FORD	B	HONDA	B
DAIMLER CHRYS	B	TOYOTA	C+	HYUNDAI	C
FORD	B-	NISSAN	C-	TOYOTA	C

El Proyecto Abacá busca principalmente sustituir las fibras de vidrio por esta fibra natural, que tiene excelentes propiedades mecánicas debidas principalmente a su alto contenido de celulosa, en partes interiores y exteriores en vehículos de lujo, obteniendo la materia prima de pequeños agricultores de Malasia. Se estima que el ahorro energético al procesar la fibra de abacá, con respecto al procesamiento convencional de fibra de vidrio en este caso es mayor al 60%. Las investigaciones buscan actualmente mejorar la adhesión de las fibras con matrices principalmente polipropilénicas, principalmente modificándolas químicamente.



Figura 1.20. Autopartes de abacá en vehículos Mercedes Benz Clase 500 construidos por Daimler Chrysler. [INTERNET 15]

Otras empresas de producción automotriz han imitado este tipo de iniciativas, considerando buenas alternativas a estos materiales alternativos. La empresa Ford y el vehículo que se observa en la figura 1.21 es uno de los llamados “abacar”, que son cada vez más populares entre la variedad de marcas de vehículos lujosos de turismo.



Figura 1.21. “Abacar” Ford modelo U concepto.

En el país, las investigaciones tienen diferentes aristas. La Escuela Politécnica del Litoral ha llevado a cabo una investigación para utilizar el abacá como parte estructural de viviendas populares. Por otro lado, en la Escuela Politécnica Nacional se viene investigando acerca de las bondades y aplicaciones del abacá desde la década de los ochenta en convenios con la CADE (Corporación de Abacaleros del Ecuador) y otras instituciones.

En los últimos años se ha trabajado pensando en un enfoque textil de la fibra desarrollando técnicas de hilado, modificación química y tinturación, para lo cual se ha necesitado previamente de una profunda caracterización y reconocimiento de sus propiedades. Conjuntamente con el Centro Textil Politécnico, en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) se vienen desarrollando nuevos materiales reforzados con productos de origen vegetal, como cabuya y abacá, entre los cuales se puede citar compuestos de matrices de polipropileno, etilén-vinil-acetato y polietileno, obtenidas por moldeo por compresión y extrusión.

Adicionalmente, se han desarrollado diferentes investigaciones sobre la utilización de fibras vegetales, resultando trabajos de titulación respecto al teñido de paja toquilla con colorantes dispersos, a temperaturas bajo y sobre el punto de ebullición, procesamiento de abacá para la obtención de tejidos y pruebas de teñido sobre el tejido resultante, así como procesos para la elaboración de no tejidos de abacá y la utilización del jugo del pseudotallo del abacá para su utilización como mordiente en el teñido de algodón.

Un resumen de las aplicaciones actuales del abacá comprende las de base de papeles de seguridad, papel moneda y toda clase de papeles de tipo fiduciario; así como para fundas de té, papel para cigarrillo, telas, gasas quirúrgicas, pañales desechables y cabotaje de barcos. Sin embargo, los límites del abacá no han sido marcados con respecto a la satisfacción de las necesidades actuales del hombre, más bien el presente estudio busca demostrar que las aplicaciones industriales de esta fibra son alcanzables con los recursos técnicos propios de la realidad ecuatoriana. El primer paso en esta búsqueda será reconocer las excelentes características por las que es reconocido el abacá:

- Extremadamente resistente y durable
- Resistente al agua salada
- Costos relativamente bajos de producción
- Hermosa textura formando parte de prendas textiles y artesanías
- Biodegradable y amigable con el medio ambiente

## CAPITULO 2

### COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA REFORZADA CON FIBRAS NATURALES

Este segundo capítulo trata acerca de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales, sus limitaciones y ventajas respecto a otro tipo de materiales. Además se exponen las características físico - químicas y de procesabilidad de la matriz termoplástica, y el proceso de manufactura utilizado para esta investigación, que es el moldeo por compresión. Finalmente, en este marco se enuncian las metas y objetivos del estudio.

#### 2.1. MATERIALES COMPUESTOS

Un material compuesto puede definirse como la combinación de dos o más materiales a nivel macroscópico, tal que ninguno es soluble en el otro, y que dan como resultado una combinación única de propiedades, que es mejor que las de los materiales primarios. Entre los componentes de un compuesto se puede distinguir fácilmente dos fases: una que se conoce como *matriz* y que es generalmente continua y otra que está cubierta por la primera y que se conoce como de *refuerzo*.

La necesidad de la tecnología moderna de contar con materiales con propiedades diferentes a las de metales típicamente usados como son el acero y aluminio, de los cerámicos y de los polímeros con sus diferentes variantes, ha impulsado el desarrollo de materiales que cuenten con las más notables propiedades de cada grupo. Los requerimientos más exigentes se ubican en la industria aeroespacial y en aplicaciones de transporte, donde se necesitan materiales estructurales con alta resistencia mecánica pero Al mismo tiempo, con bajas densidades. Si adicionalmente la resistencia a la abrasión, al impacto y al deterioro por las condiciones ambientales o la exposición a químicos son

condiciones para el material buscado las posibilidades de encontrarlo “solo” en la naturaleza son muy reducidas.

El uso de materiales compuestos para elaborar productos de uso cotidiano no es tan reciente como se pensaría; es así como la utilización de fibras de alta resistencia para fortalecer otro material es posiblemente anterior al invento de la rueda. Uno de los primeros indicios de este tipo de materiales se puede encontrar en el antiguo Egipto, cuando en el tiempo de la esclavitud de los hebreos, éstos elaboraban adobes hechos de arcilla reforzados con paja (figura 2.1). Incluso en una historia bíblica se relata como el gobernante de ese tiempo dificultó el trabajo de los esclavos ordenando que ellos mismos recojan la paja para la elaboración de los bloques (Éxodo 5:7). Se debe observar que ni la arcilla ni la paja por sí solas, pueden emular el comportamiento del material compuesto que se conforma de su combinación. Esta fue la razón por la cual hubo molestias en los esclavos al suspenderse el suministro de paja por parte de los egipcios. Otro ejemplo histórico de material compuesto elaborado por el hombre son láminas de metales para conformar espadas forjadas.

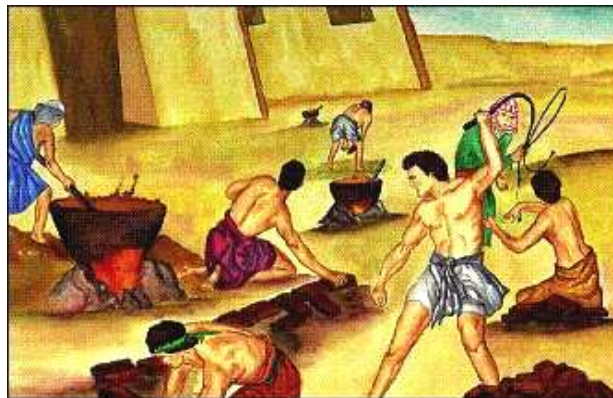


Figura 2.1. Esclavos hebreos elaborando adobes de arcilla y paja.

Por el lado de la naturaleza se pueden encontrar una gran cantidad de ejemplos; uno muy conocido es la madera, que está principalmente constituida por fuertes y flexibles fibras de celulosa circundadas y juntadas por un material rígido conocido como lignina. Otro ejemplo lo constituyen los huesos, en los cuales las placas óseas están hechas de calcio reforzado con iones de fosfato unidos con colágeno.

Los compuestos poseen características especiales que los convierten en la mejor elección, con respecto a los materiales tradicionales, para las aplicaciones más exigentes. Las características más importantes son las siguientes:

- Proveen capacidad de integración de partes. Varios conjuntos de componentes metálicos pueden ser reemplazados por un solo componente compuesto.
- Las estructuras hechas a base de compuestos pueden ser monitoreadas en pleno servicio por medio de sensores incluidos en el material. Estos son los llamados materiales inteligentes.\*
- La resistencia mecánica específica (es decir, el cociente de la resistencia y la densidad del material) de los compuestos es muy alta con respecto a la de los materiales tradicionales. Por ejemplo, existen compuestos que ofrecen la misma resistencia que el acero pero con una quinta parte del peso.
- Los metales como el aluminio y el acero son susceptibles al ataque de la corrosión; sin embargo, los compuestos hechos a base de polímeros y cerámicos ofrecen una muy buena resistencia al ataque químico y a las condiciones ambientales.
- Las partes con formas y acabados de geometría complicada son fácilmente fabricadas con materiales compuestos en reducido número de pasos. Esto permite eliminar procesos de maquinado y además reduce el ciclo de producción y por tanto los costos.
- Se pueden alcanzar buenos niveles de dureza y de absorción de vibraciones y ruido con respecto a los de la mayoría de los metales.
- El costo de equipo y herramientas requeridos para el procesamiento es bastante reducido con respecto a los usados en procesos de materiales tradicionales. [MAZUMDAR, KAW, ASHBY, CALLISTER]

---

\* Ejemplos de aplicación de esta característica es el monitoreo de daños por fatiga en estructuras aéreas y el flujo de resina en un proceso de moldeo por transferencia de resina (RTM). [MAZUMDAR]

A pesar de todas estas ventajas no se puede dejar de lado las desventajas que tienen los compuestos, la mayoría ligadas a un tardío desarrollo a nivel industrial. Algunas de ellas se escriben a continuación:

- Los procesos comunes de fabricación de compuestos fueron diseñados para bajos volúmenes de producción, además la mayoría eran manuales. Esto encarecía el proceso con respecto al de otros materiales. En la actualidad se han desarrollado procesos automatizados en base a los procesos utilizados en la producción de plásticos, y de esta manera se puede proveer a industrias muy competitivas como la automotriz.
- La forma clásica de diseñar productos depende del uso de maquinaria, manuales, prontuarios y bases de datos. En el caso de los metales estos recursos están al alcance del diseñador, mientras que en el caso de los compuestos no se ha alcanzado aún este nivel de desarrollo; por lo tanto, la experimentación se vuelve necesaria para iniciar un proceso de diseño.
- Las temperaturas de trabajo de los compuestos dependen de los materiales que están involucrados en éstos. Muchos de los compuestos basados en polímeros están es desventaja con respecto a los metales.
- Algunos compuestos son susceptibles a la absorción de humedad, la misma que afecta su estabilidad dimensional y algunas propiedades mecánicas.
- Reparar compuestos no es una tarea fácil, sobre todo comparada con la reparación de piezas metálicas. Fallas y roturas pueden no ser detectadas.

Las nuevas generaciones de compuestos involucran materiales cotidianos, mejorados con refuerzos del tipo sintético o natural. Las posibles combinaciones son grandes en números, y los limitantes tecnológicos para llevar a cabo ciertas posibilidades de combinación se van superando rápidamente con el transcurso del tiempo. Parece ser que la “edad de los compuestos” está en su apogeo. Así por ejemplo, las llamadas “maderas plásticas” se han desarrollado con gran éxito, obteniéndose por medio de diferentes procesos diversos materiales de este tipo. Materiales novedosos como concretos reforzados con fibras naturales o materiales polares, dan como resultado un espectro mucho más grande y con



posibilidades eficientes para el sector de la vivienda. En la figura 2.2 se puede ver la aceptación que han ido teniendo ciertos productos a base de materiales compuestos reforzados con madera o fibras vegetales.

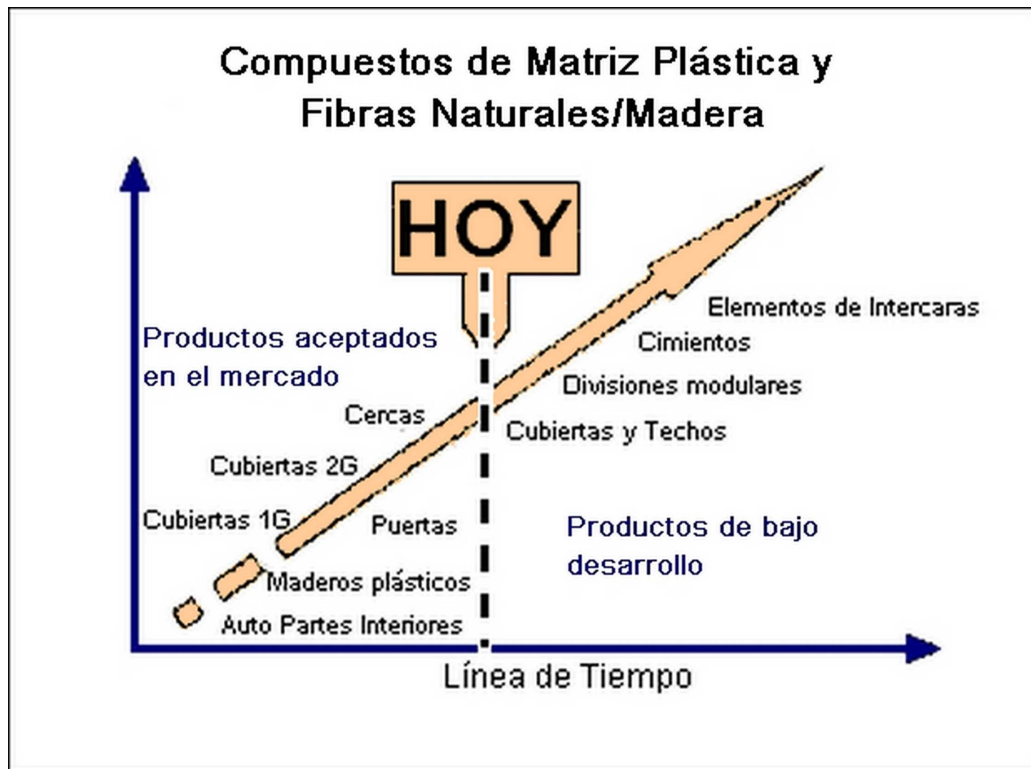


Figura 2.2. Compuestos de polímeros reforzados con madera/ fibras vegetales. [SMITH&WOLLCOT]

Como ya se mencionó anteriormente, la mayor parte de compuestos están constituidos por dos fases: la matriz y la fase dispersa o refuerzos. Las propiedades de los compuestos son una función de estos dos constituyentes, su porcentaje de participación y de la geometría y orientación de los refuerzos. En la figura 2.3 se puede distinguir las variaciones de estos parámetros.

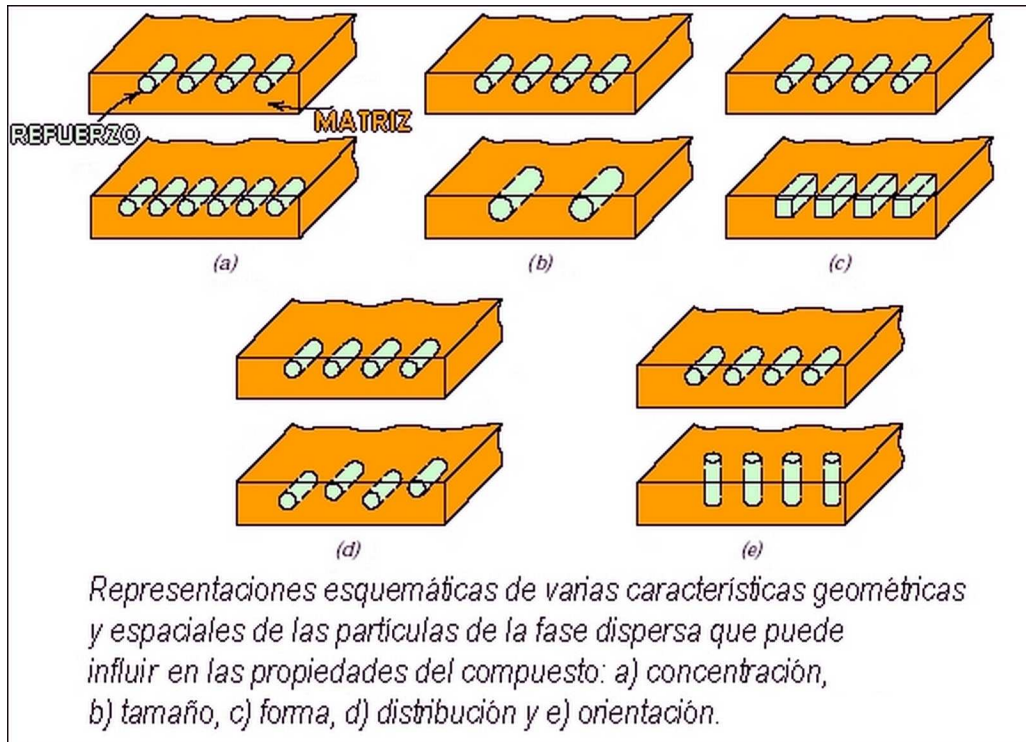


Figura 2.3. Variación de la forma, distribución, tamaño, concentración y orientación de las partículas del refuerzo en una misma matriz. [CALLISTER]

Una clasificación simple de los compuestos puede llevarse a cabo por medio de las características de los refuerzos que lleva (figura 2.4). Principalmente los compuestos pueden ser de tres tipos: reforzados por partículas, por fibras y para aplicaciones estructurales.

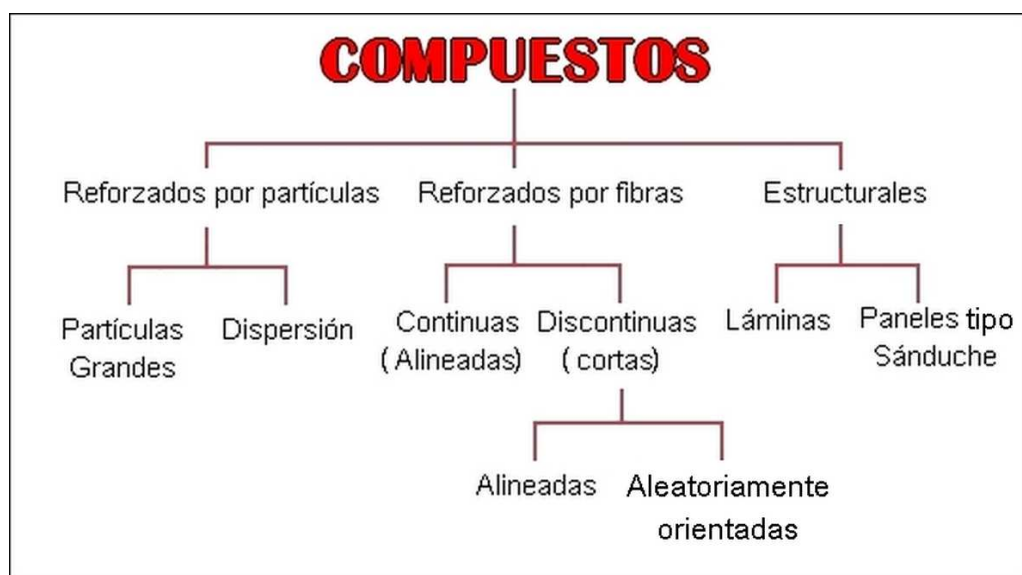


Figura 2.4. Clasificación de los compuestos según su el tipo de refuerzo. [CALLISTER]

Cuando se habla de partículas hay que distinguir dos tipos: las grandes, que están en orden de magnitud superior al de las moléculas y átomos y por lo tanto se someten a las leyes de la mecánica clásica, y las que se consideran una dispersión de partículas que tienen diámetros que están en el orden de entre los 10 y 100 nm. Ejemplos de materiales reforzados por partículas grandes son los compuestos de metales reforzados con partículas cerámicas de carburo de tungsteno o titanio, mientras que de dispersión de partículas se puede mencionar el óxido de aluminio utilizado como refuerzo en ciertos metales.

Los compuestos más importantes son los que se hallan reforzados por fibras. Las metas de los diseñadores de este tipo de materiales suele ser el obtener altas resistencias y esfuerzos últimos a la rotura sobre una base de peso (es decir altos resistencia y módulo específicos). Los compuestos de este tipo que han alcanzado el mejor desempeño son los hechos con matrices y refuerzos de más baja densidad.

Las propiedades mecánicas finales de este tipo de materiales dependen de la orientación de las fibras. De materiales reforzados con fibras largas orientadas en una sola dirección lo que se va a obtener son materiales anisotrópicos; es decir, que tienen propiedades mecánicas diferentes en distintas direcciones. Por otro lado, si se utiliza fibras cortas se obtendrá materiales cuasisotrópicos.

Los compuestos estructurales son una combinación de compuestos y material homogéneo. Un compuesto laminar está constituido por varios paneles de modo que se varíe la orientación de las direcciones de mayor resistencia. Las hojas adyacentes de madera en los tablones de madera contrachapada son un ejemplo de estos materiales. Los de tipo sánduche, por su parte están conformados por dos tapas, generalmente de aluminio o madera contrachapada, separadas por una capa de material menos denso o que tiene propiedades mecánicas inferiores. Las tapas soportan las cargas en el plano y también cualquier esfuerzo transversal (ver figura 2.5). Existe además compuestos reforzados con materiales en forma de hojuelas, las cuales típicamente son de vidrio, mica, aluminio y plata, pero no gozan de gran popularidad a pesar de que si mejoran algunas propiedades mecánicas.

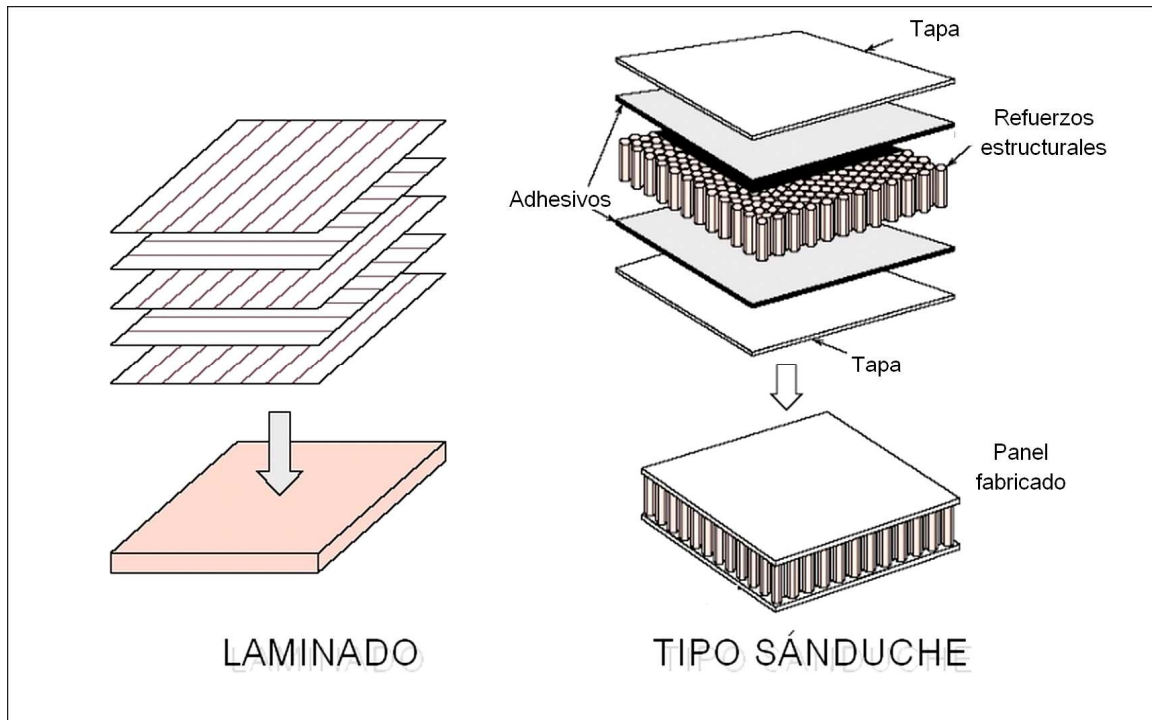


Figura 2.5. Compuestos estructurales. [CALLISTER]

### 2.1.1. FUNCIONES DE LA MATRIZ Y LOS REFUERZOS

Los compuestos pueden formularse para solventar diferentes necesidades. En el caso de los que están reforzados con fibras, esta necesidad suele ser la de mejorar las propiedades mecánicas. Bajo este objetivo es necesario que la matriz y los refuerzos cumplan con lo siguiente:

*Funciones de los Refuerzos.*- en el caso de fibras, la principal función es la de soportar la carga aplicada al material, tal como se puede apreciar en la figura 2.6 (se estima que las fibras soportan entre el 79 y el 90% de las cargas de tracción). Además, deben proveer propiedades estructurales tales como resistencia mecánica y estabilidad térmica, y otras como las de conductividad eléctrica o aislamiento dependiendo del tipo de fibra usada.

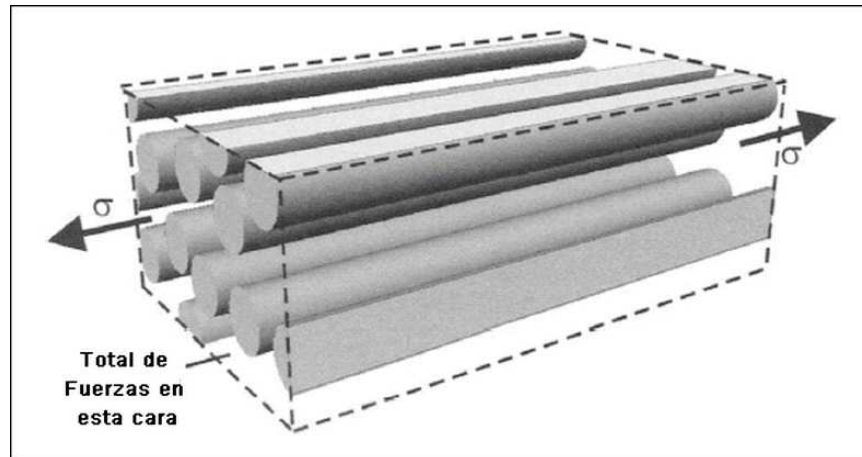


Figura 2.6. Carga de tracción aplicada al compuesto y soportada por los refuerzos. [MILLIS]

*Funciones de la matriz.*- el material de la matriz es decisivo para alcanzar las propiedades finales del compuesto. Los refuerzos, por sí solos, no son suficientes; es por esto que deben estar alojados en una matriz que cumpla con las funciones detalladas a continuación:

- Sostener a las fibras y transmitir la carga aplicada sobre ella hacia las fibras. Esto provee rigidez y da la forma de la estructura.
- Aislar una fibra de otra de tal modo que estas puedan actuar separadamente. Esta característica permite detener o retardar la propagación de una fractura.
- Brindar un buen acabado superficial y ayudar en la producción de piezas que no necesiten maquinado sino que tengan la forma requerida con menos operaciones.
- Proveer la protección necesaria cubriendo a las fibras contra el ataque químico y el daño mecánico.
- Dependiendo del tipo de material, la matriz puede ofrecer ductilidad o resistencia al impacto. Una matriz dúctil puede incrementar la tenacidad del compuesto. Para altos requerimientos de tenacidad es recomendable utilizar matrices de materiales termoplásticos. [MAZUMDAR]
- La compatibilidad con la fibra a usarse así como el modo de falla es influenciado fuertemente por la matriz.

## 2.1.2. DISEÑO DE MATERIALES COMPUESTOS

Los compuestos han ganado gran espacio en la industria en tanto en cuanto los materiales típicamente usados no han sido capaces de proveer todas las características necesarias para ciertas aplicaciones, sobre todo en la industria aeroespacial. La manufactura de compuestos involucra altos requerimientos, siendo los más comunes los de baja densidad, tenacidad, alta dureza, resistencia mecánica, conductividad eléctrica, baja absorción de agua, resistencia a la corrosión, resistencia al impacto, entre otras.

Todo tipo de material posee ventajas y desventajas en particular; por lo tanto, todos tienen su campo de aplicación en específico. En la figura 2.7 se puede observar algunos parámetros que se debe tomar en cuenta antes de elegir un material para una aplicación.

<i>Tipo de Material</i>	<i>Bueno</i>	<i>Deficiente</i>
<b>Metales</b> Alto E, K <sub>ic</sub> Bajo $\sigma_y$	Deformable (E=100 GPa) Dúctil ( $\epsilon_f=20\%$ ) formable Tenaz (K <sub>ic</sub> >50MPa m <sup>1/2</sup> ) Alto punto de fusión (T <sub>f</sub> =1000°C)	Fluencia (pura, $\sigma_y=1\text{MPa}$ ) Aluminio Dureza (H=3 $\sigma_y$ ) Aluminio Esfuerzo último a la fatiga ( $s_f=1/2\sigma_y$ ) Resistencia a la corrosión
<b>Cerámicos</b> Alto E, $\sigma_y$ Bajo K <sub>ic</sub>	Deformable (E=200GPa) Fluencia muy alta, dureza ( $\sigma_y>3\text{Gpa}$ ) Alto punto de fusión (T <sub>f</sub> =2000°C) Resistencia a la corrosión Densidad moderada	Muy baja tenacidad (K <sub>ic</sub> =2 MPa m <sup>1/2</sup> ) Formabilidad Método de polvos
<b>Polímeros</b> Adecuado $\sigma_y$ , K <sub>ic</sub> bajo E	Dúctiles y formables Resistencia a la corrosión Baja densidad	Baja resitencia a la tracción (E = 2 GPa) Fluencia ( $\sigma_y=2-100\text{ MPa}$ ) Baja temperatura de cristalización (T <sub>g</sub> =100°C) Tenacidad frecuentemente baja (1MPa m <sup>1/2</sup> )
<b>Compuestos</b> Alto E, $\sigma_y$ , K <sub>ic</sub> Problemas con el costo	Resistencia a la tracción (E>50 GPa) Fuertes ( $\sigma_y=200\text{ MPa}$ ) Tenaz (K <sub>ic</sub> >20 MPa m <sup>1/2</sup> ) Resistencia a la fatiga Resistencia a la corrosión Baja densidad	Formabilidad Costo

Figura 2.7. Parámetros de selección de materiales. [ASHBY]

En el proceso de diseño, luego de haber determinado las condiciones que se debe cumplir y las solicitaciones a las que se va a someter el compuesto, se debe escoger los materiales que cumplirán los roles de matriz y de refuerzos puesto que estos le otorgarán las características finales y determinarán la selección del proceso de producción a usar en su manufactura. Es importante destacar que en el caso de los refuerzos, su forma causa efectos diversos en el compuesto. Por ejemplo, la utilización de un material en forma de partículas proporcionará características diferentes que el mismo material en forma de fibras o como un tejido bidimensional.

Para garantizar un compuesto con “mejores propiedades” que sus materiales precursores, se debe verificar la compatibilidad de fibras y matriz. Es decir, se debe garantizar que ambas fases puedan trabajar conjuntamente para alcanzar los requerimientos, una vez que están incluidas en el compuesto.

Seleccionados los materiales se procede a seleccionar entre las opciones de procesamiento, tomando generalmente como base los que comúnmente se usan con la matriz. Factores como el volumen de producción, las propiedades finales, formas y acabados superficiales, la distribución de los refuerzos sobre la matriz, abrasión de las fibras sobre las herramientas, entre otros, definirán de mejor manera el método de obtención del compuesto en base a su materia prima.

Ya en la parte práctica, debido a la relativa ausencia de literatura y experimentación documentada sobre los materiales compuestos mencionada anteriormente, y para optimizar la utilización de los refuerzos y de los parámetros de procesamiento, se prueban sistemáticamente varias formas y configuraciones de la fase dispersa. En cada intento se trata de reducir al máximo la energía involucrada en el proceso de obtención del material, hasta que finalmente se alcanza el objetivo.

## 2.2. EL POLIETILENO COMO MATRIZ

Los compuestos vienen siendo masivamente utilizados para resolver problemas tecnológicos por largo tiempo, y desde 1960 han capturado la atención de la industria debido a la introducción de compuestos basados en polímeros. Desde allí ha sido común el empleo de la ingeniería de materiales para el diseño y manufactura de varias aplicaciones incluyendo componentes automotrices. [MAZUMDAR]

Los compuestos de matriz polimérica (CMP) consisten generalmente en un polímero, por ejemplo epóxico, poliéster o uretano, reforzado con fibras de diámetro muy pequeño, tales como fibras de grafito, boro o aramiditas. Los compuestos de epóxico reforzado con fibras de grafito son aproximadamente cinco veces más fuertes que el acero comparándole con muestras del mismo peso. Este tipo de compuestos son muy usados porque tienen valiosas ventajas como son: bajos costos de fabricación, alta resistencia última a la tracción y relativamente sencillos procesos de manufactura. [KAW]

Además de los materiales citados, existe una gran variedad de polímeros que pueden cumplir el papel de matrices en un compuesto. Muchos de los elementos poliméricos vienen siendo reemplazados por compuestos a base del mismo polímero pero reforzados con otros materiales que le otorgan propiedades superiores. El polietileno y el polipropileno son usados en altos volúmenes comúnmente en algunas industrias; es por esto que muchas investigaciones apuntan a convertirlos en materiales compuestos.

Existen algunas desventajas de los CMP tales como: baja temperatura de operación de los materiales obtenidos, altos coeficientes de expansión térmica, expansión debido a la absorción de humedad de algunos compuestos, y bajas propiedades elásticas en algunas direcciones. En la figura 2.8 se detallan las máximas temperaturas de operación de materiales compuestos, en función del tipo de matriz que estos poseen.



Compuesto	Máxima Temperatura de Operación (°C)
Matriz Polimérica	400
Matriz Metálica	1000
Matriz Cerámica	1300

Figura 2.8. Temperaturas límite de operación de compuestos de diferentes matrices. [MITCHELL]

### 2.2.1. TIPOS DE MATRICES POLIMÉRICAS Y SUS APLICACIONES

Mientras que el hombre viene usando metales, sobre todo a raíz de la revolución industrial, la naturaleza está hecha en base a polímeros. En efecto, casi todos los sistemas biológicos están constituidos por polímeros no solo cumpliendo funciones mecánicas (como en la madera, huesos, cartílagos y cuero) sino conteniendo y regulando reacciones químicas (venas, hojas y células).

En el último siglo se ha desarrollado procesos sintéticos de obtención de polímeros con diferentes características, pero a pesar de todo tienen menor rigidez que los metales e incluso algunos polímeros naturales como la madera o los huesos. Esto se debe a que estos materiales tienen la configuración de un compuesto; es decir, realmente están constituidos por fibras rígidas o partículas embebidas en una matriz polimérica simple.

Con esta idea, el horizonte tecnológico ha sido el desarrollar nuevos materiales que sean más rígidos, duros y livianos. Sin embargo, es un error pensar que los componentes metálicos pueden ser reemplazados simplemente por componentes hechos a base de materiales compuestos sin haber repensado el diseño. Los polímeros son menos rígidos, menos fuertes y menos resistentes que la mayoría de los metales; por lo tanto se requiere un cuidadoso rediseño. Los CMP suelen ser anisotrópicos y debido a su matriz suelen variar sus propiedades radicalmente con un pequeño cambio en la temperatura.

Existe un número grande de polímeros con configuraciones variadas y este número incrementa cada año. Para poder clasificarlos se los puede encasillar dentro de cuatro grupos genéricos de modo que se pueda identificar fácilmente ciertas características mecánicas, de proceso y de compatibilidad para su utilización como matrices dentro de un compuesto. Estos cuatro grupos genéricos son:

- a) *Termoplásticos*, tales como el polietileno, que se ablandan con el calor.
- b) *Termoestables o resinas*, tales como el epóxico, y que se endurecen cuando dos componentes (una resina y un endurecedor) se calientan juntos.
- c) *Elastómeros o cauchos*.
- d) *Polímeros naturales*, tales como la celulosa, lignina o proteínas, las cuales proveen la base mecánica de la mayoría de las plantas y animales.

Si bien las propiedades difieren mucho, la mayor parte los polímeros están conformados de largas moléculas con una columna vertebral de enlaces covalentes de átomos de carbono. Estas moléculas largas están unidas por débiles fuerzas de Van der Waals y enlaces secundarios de hidrógenos o enlaces covalentes cruzados. El punto de fusión debido a los enlaces débiles es bajo, superior a la temperatura ambiente. Para este caso se debe contemplar una temperatura de utilización que es una fracción de la temperatura de fusión debida a los enlaces débiles (aunque en el caso de tener enlaces covalentes, la temperatura de fusión no es muy superior). [ASHBY]

Las propiedades mecánicas de los polímeros se especifican por medio de los mismos parámetros utilizados en el caso de los metales. Esto es, módulo de elasticidad ( $E$ ), esfuerzo de rotura o resistencia a la tracción ( $TS$ ) y esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ). El cálculo del módulo y de la ductilidad en porcentaje de elongación son determinados de la misma manera. En la figura 2.9 se presentan algunas propiedades de varios polímeros.

Polímero	Costo (\$US) ton <sup>-1</sup>	Densidad (Mg m <sup>-3</sup> )	Módulo de Young (20°C 100 s) (GPa)	TS (MPa)
<b>Termoplásticos</b>				
<i>Polietileno de baja densidad, LDPE</i>	(780)	0.91–0.94	0.15–0.24	7–17
<i>Polietileno de alta densidad, HDPE</i>	(700)	0.95–0.98	0.55–1.0	20–37
<i>Polipropileno, PP</i>	(950)	0.91	1.2–1.7	50–70
<i>Politerafluoretileno, PTFE</i>	–	2.2	0.35	17–28
<i>Poliestireno, PS</i>	(910)	1.1	3.0–3.3	35–68
<i>Polivinil clorato, PVC (no plastificado)</i>	(595)	1.4	2.4–3.0	40–60
<i>Polimetilmetacrilato, PMMA</i>	(1550)	1.2	3.3	80–90
<i>Nylons</i>	(3300)	1.15	2–3.5	60–110
<b>Resinas o Termoestables</b>				
<i>Epoxis</i>	(1600)	1.2–1.4	2.1–5.5	40–85
<i>Poléster</i>	(1300)	1.1–1.4	1.3–4.5	45–85
<i>Fenolformaldeidos</i>	(1050)	1.27	8	35–55
<b>Elastómeros (cauchos)</b>				
<i>Polisopropeno</i>	(850)	0.91	0.002–0.1	≈10
<i>Polibutadieno</i>	(850)	1.5	0.004–0.1	
<i>Policloropreno</i>	(2050)	0.94	≈0.01	
<b>Polímeros Naturales</b>				
<i>Fibras de Celulosa</i>		1.5	25–40	≈1000
<i>Lignina</i>		1.4	2.0	–
<i>Proteína</i>		1.2–1.4	–	–

Figura 2.9. Propiedades de algunos polímeros de los cuatro grupos. [ASHBY]

La gráfica esfuerzo deformación es también usada para la caracterización de estos parámetros. Según la forma típica de esta gráfica se puede diferenciar entre tres tipos de polímeros que reaccionan de diferente forma a solicitaciones mecánicas, según se puede observar en la figura 2.10. La curva A ilustra el comportamiento característico de un polímero frágil, puesto que éste se fractura cuando aún está deformándose elásticamente, característica mecánica de la mayor parte de los termoestables. La curva C caracteriza a un material que se comporta de forma análoga a un material totalmente elástico, con grandes deformaciones recuperables ocasionadas por bajos niveles de esfuerzo. Los polímeros con esta característica son los elastómeros. Por otro lado, los termoplásticos se comportan generalmente como lo indica la curva B, similar en característica esfuerzo - deformación a la de la mayor parte de los metales. La deformación inicial es elástica hasta llegar al punto de fluencia y desde ahí en adelante ingresa en una región de deformación plástica. En la figura 2.11 se

observa como se determina la resistencia a la tracción y el esfuerzo de fluencia en un polímero con comportamiento elasto-plástico.

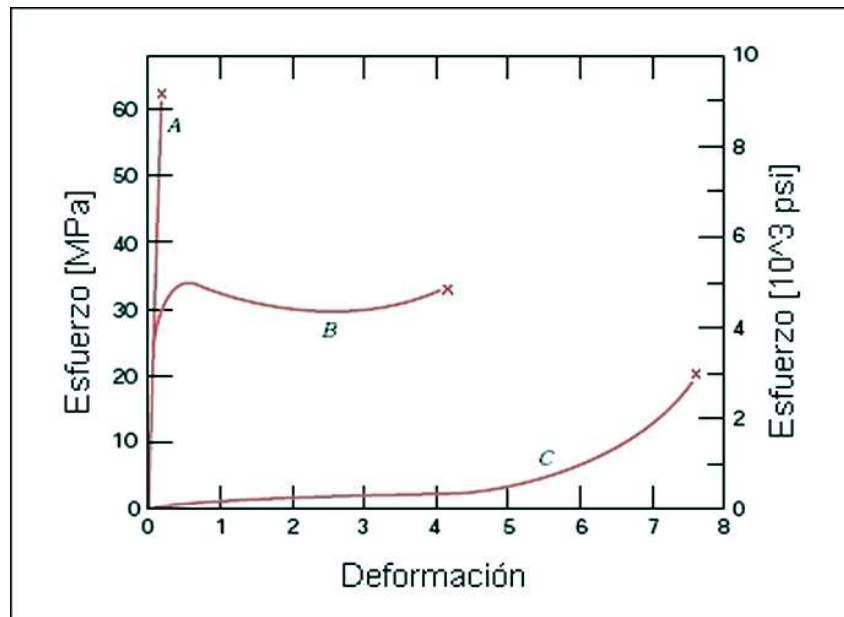


Figura 2.10. Curvas típicas esfuerzo vs. deformación de polímeros frágiles (A), plásticos con zona elástica (B), y totalmente elásticos o elastómeros (C). [CALLISTER]

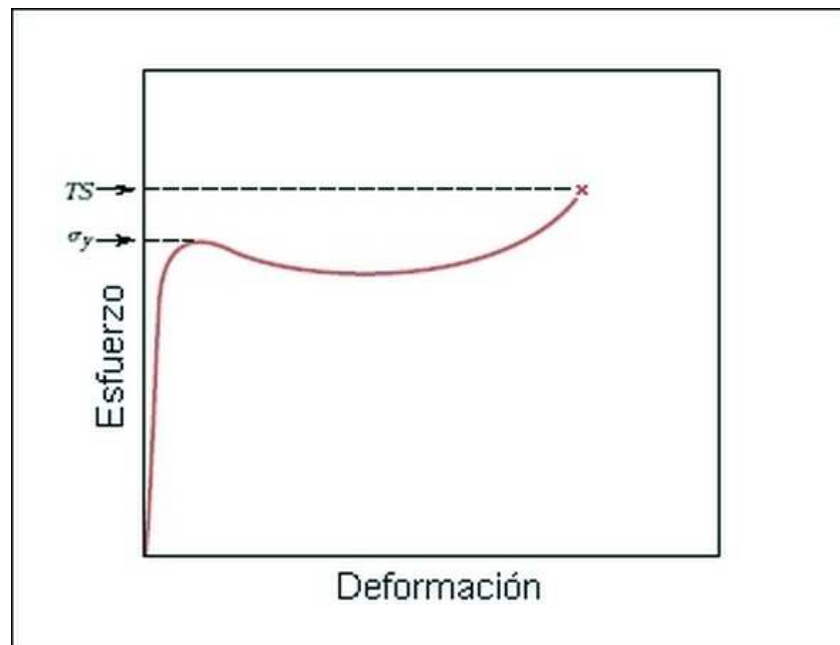


Figura 2.11. Esfuerzo último a la tracción (TS) y esfuerzo de fluencia en un polímero con comportamiento plástico y elástico. [CALLISTER]

A nivel macroscópico, la deformación que se observa en polímeros termoplásticos está esquematizada en la figura 2.12. En un ensayo de tracción se puede

observar como se forma un cuello dentro de la zona más delgada de la probeta cuando se alcanza el esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ). De ahí adelante ese cuello seguirá estirándose y el esfuerzo necesario para seguir deformando subirá, debido a un reordenamiento de las moléculas, hasta que se llegará al esfuerzo de rotura (TS).

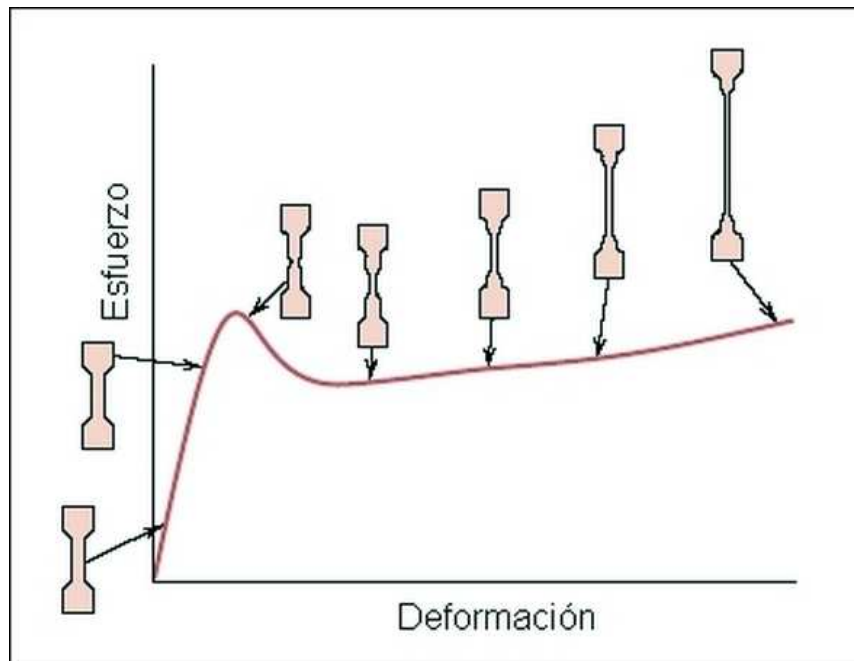


Figura 2.12. Deformación macroscópica de un espécimen de un polímero en las zonas elástica y plástica. [CALLISTER]

Las matrices termoestables se han popularizado en el mercado de los compuestos. Incluso se podría decir que la fibra de vidrio reforzando una matriz termoestable es uno de los materiales más usados en la industria. Además, existen un sinnúmero de compuestos hechos a base de estos materiales que suelen estar presentes en aplicaciones no estructurales. Los elastómeros ya han sido introducidos en la industria de los compuestos. Un ejemplo muy conocido es el de los neumáticos para vehículos que se elaboran en matriz elastomérica reforzada con partículas de negro de humo. Recientemente se ha vuelto la mirada hacia estos materiales con resultados alentadores. Algunos cauchos se refuerzan actualmente con fibras naturales para obtener artículos decorativos artesanales, debido a su relativa facilidad de procesamiento por las menores temperaturas que estos necesitan.

Los termoestables tienen apreciables ventajas con respecto a los demás tipos de polímeros, tanto en su procesabilidad como en sus características mecánicas y se espera que en un futuro, por las investigaciones que se vienen llevando a cabo, sea una de las matrices favoritas para los materiales poliméricos.

Finalmente, los polímeros naturales son el derrotero que se ha impuesto la ciencia para alcanzar a mitigar los efectos de la contaminación por materiales no biodegradables. Si a esto se suma las excelentes características mecánicas que alcanzan, se convierten en los materiales ideales para cualquier tipo de diseño.

### **2.2.2. MATRICES TERMOPLÁSTICAS**

El polietileno es el más común de los termoplásticos. Estos son frecuentemente descritos como polímeros lineales puesto que sus cadenas no tienen enlaces cruzados (aunque estos pueden ramificarse ocasionalmente). Como se indicó anteriormente, los termoplásticos se ablandan cuando se les somete al calor, pero también pueden solidificarse cuando se retira el mismo. Este ablandamiento sucede porque los enlaces secundarios que unen unas moléculas a otras se debilitan y esto provoca un flujo similar al de un líquido viscoso.

Las moléculas en un polímero lineal tienen un rango de pesos moleculares y se empaquetan juntas en una variedad de configuraciones. Algunos termoplásticos, como el poliestireno, son amorfos; otros, como el polietileno, son parcialmente cristalinos. Este rango de pesos moleculares y empaquetamientos variables indican que los termoplásticos no tienen un punto de fusión definido. Por otro lado, su viscosidad disminuye ante el aumento de temperatura de forma similar al vidrio.

Algo que se debe señalar es la variación de las características mecánicas y de la respuesta del material ante la aplicación de cargas por efecto de la adición de calor. En la figura 2.13 se puede observar el cambio en la característica esfuerzo versus deformación del polimetilmetacrilato a diferentes temperaturas. Nótese que a 50°C el PMMA tiene ya zona plástica y a 4°C es un material frágil.

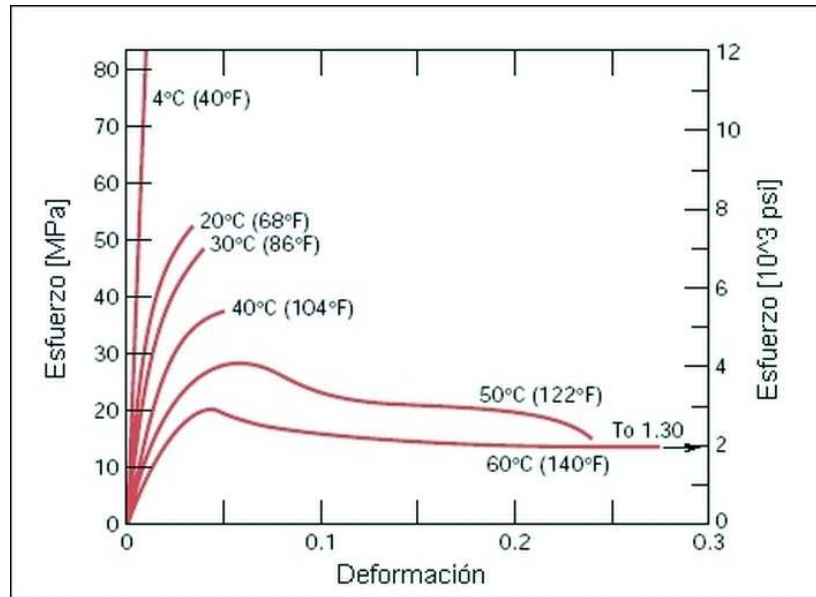
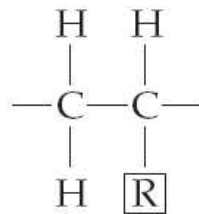


Figura 2.13. Influencia de la temperatura sobre la característica esfuerzo vs. deformación del pPolimetilmetacrilato. [CALLISTER]

Los termoplásticos se forman por la polimerización de subunidades o monómeros que forman largas cadenas. La mayor parte de ellos se forman de la repetición de la unidad:



En donde el radical R puede ser simplemente hidrógeno (como en el caso del polietileno),  $-\text{CH}_3$  (polipropileno) o  $-\text{Cl}$  (PVC). En la figura 2.14 se puede observar algunos de los más comunes termoplásticos con sus características.

<i>Termoplástico</i>	<i>Composición</i>	<i>Usos</i>
Polietileno, PE	$\left( \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ -\text{C}- \\   \\ \text{H} \end{array} \right)_n$ Parcialmente cristalino	Tuberías, películas, botellas, aislamiento eléctrico, envolturas.
Polipropileno, PP	$\left( \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C}- & \text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$ Parcialmente cristalino	Los mismos usos que el PE, pero es más transparente, y más resistente a la tracción y la luz del sol.
Politetrafluoretileno, PTFE	$\left( \begin{array}{c} \text{F} \\   \\ -\text{C}- \\   \\ \text{F} \end{array} \right)_n$ Parcialmente cristalino	Teflón. Buena resistencia a altas temperaturas con muy baja fricción y adhesión. Sartenes, rodamientos y sellos.
Poliestireno, PS	$\left( \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C}- & \text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$ Amorfo	Objetos moldeados baratos. Endurecido con butadieno para hacer poliestireno de alto impacto (HIPS). Burbujeado con CO <sub>2</sub> para hacer envolturas.
Polivinilclorito, PVC	$\left( \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C}- & \text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right)_n$ Amorfo	Usos arquitectónicos (marcos de ventanas). Tuberías. Plastificados para hacer cuero artificial, ropa.
Polimetilmetacrilato, PMMA	$\left( \begin{array}{cc} \text{H} & \text{CH}_3 \\   &   \\ -\text{C}- & \text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{COOCH}_3 \end{array} \right)_n$ Amorfo	Perspex, translúcido. Hojas transparentes y moldeadas. Ventanas para aviones, láminas anti-impacto.
Nylon 66	$(-\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}-)_n$ Parcialmente cristalino cuando se alarga	Textiles, ropa, moldeados.

Figura 2.14. Algunos de los termoplásticos más comunes. [ASHBY]

### 2.2.3. PROCESOS DE MANUFACTURA DE MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ TERMOPLÁSTICA

La industria del procesamiento de polímeros permite crear en la actualidad al menos un 30% de los objetos de uso cotidiano. Entre estos hay una gran probabilidad de que estos objetos hayan sido fabricados directamente por uno de



los tres métodos de más alto volumen de producción que son: extrusión, moldeo por inyección y moldeo por compresión. [ADVANI]

De todo el universo de CMP, los de matriz termoestable dominan el mercado. Los de matriz termoplástica representan apenas un 25% del mercado total de aplicaciones estructurales. El uso de matrices termoplásticas está siendo popular dentro de la industria aeroespacial y de la automotriz a causa de su alta tenacidad, alta tasa de producción y mínimo impacto ambiental. [MAZUMDAR]

Existe una gran diferencia entre el procesamiento de termoplásticos y de termoestables. En los termoplásticos el procesamiento puede tomar lugar en cuestión de segundos puesto que se trata de una operación netamente física, donde no se produce ninguna reacción química como en el caso de los termoestables. A pesar de las diferencias, muchos de los procesos de manufactura de los termoestables son muy similares a los utilizados para procesar termoplásticos. En la figura 2.15 se observan algunas ventajas y desventajas del procesamiento de termoplásticos y termoestables.

VENTAJAS y DESVENTAJAS DE PROCESAMIENTO		
TERMOPLÁSTICOS	TERMOESTABLES	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO
	X	<i>Estado inicial líquido</i>
	X	<i>Facilidad para cubrir las fibras</i>
	X	<i>Menores requerimientos de presión y calor</i>
	X	<i>Bajo costo de herramientas</i>
X		<i>Menor duración del ciclo de manufactura</i>
X		<i>Facilidad para deformar la pieza final</i>
X		<i>Reciclabilidad de los materiales involucrados</i>

Figura 2.15. Diferencias en el procesamiento de termoplásticos y termoestables.

#### 2.2.4. EL POLIETILENO

Cuando se habla de polietileno (PE) se debe comenzar diciendo que es la más simple y básica estructura entre los polímeros y el de mayor tonelaje de

producción. Las características más atractivas del polietileno son su bajo precio, es buen aislante eléctrico, su muy buena resistencia química, buena procesabilidad, alta tenacidad, flexibilidad, baja densidad y, en ciertos espesores de película, la transparencia.

El IUPAC recomienda que se denomine a este polímero como polimetileno o diazometano, mientras que en el Reino Unido se lo conoce como politeno. Estas diferentes denominaciones corresponden a diferentes métodos de obtención del PE, que en un principio no se fundamentaban precisamente en el etileno. Su definición virtual si parte del monómero etileno; es decir, de la polimerización por adición de polímeros lineales con la fórmula  $(CH_2)_n$  (ver figura 2.16) que también puede ser preparada por reacciones de condensación.

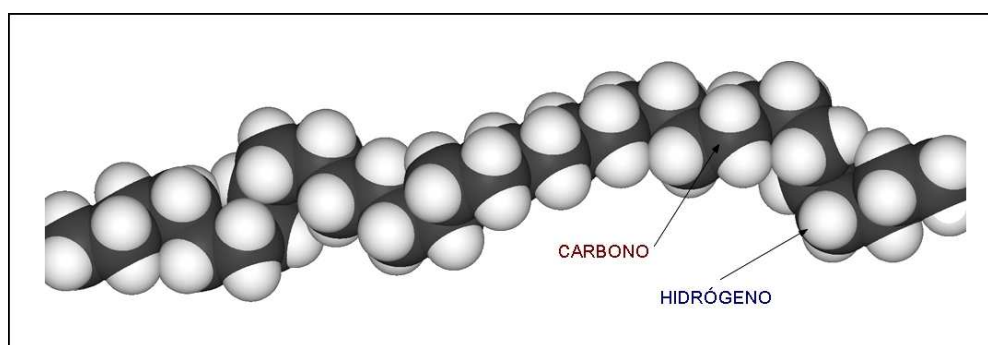


Figura 2.16. Esquema del polietileno en tres dimensiones.

#### 2.2.4.1. Tipos de Polietileno

En la actualidad, los métodos comerciales de obtención parten del etileno para obtener su producto final por medio de una de las cinco rutas más conocidas de preparación de altos polímeros de etileno que son: procesos de alta presión, proceso Ziegler, proceso Phillips, proceso Indiana y proceso Metalloceno. Todo ha sido un proceso largo que inició desde el apareamiento del polietileno y que a lo largo del tiempo ha ido dando paso a nuevos polietilenos según los requerimientos tecnológicos de la época. De esta manera se han obtenido polietilenos de alta densidad (HDPE), de baja densidad (LDPE), lineales de baja

densidad (LLDPE) y de muy baja densidad (VLDPE). En la figura 2.17 se presentan algunas características de tres diferentes tipos de polietileno.

<b>Material</b>	<b>Estructura de Cadenas</b>	<b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Cristalinidad [%]</b>	<b>Proceso de obtención</b>
<b>LDPE</b>	Ramificado	0,9120-0,94	50	Alta presión
<b>LLDPE</b>	Lineal/ poco Ramificado	0,92-0,94	50	Baja Presión
<b>HDPE</b>	Lineal	0,958	90	Baja Presión

Figura 2.17. Propiedades de diferentes tipos de PE. [CHANDA &ROY]

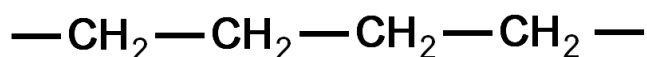
Para mediados de la década de los noventa la capacidad de producción mundial de polietileno estuvo alrededor de 50 000 000 de toneladas, de las cuales alrededor de un 40% fue de HDPE, 36% de LDPE y cerca de un 24% LLDPE. Hoy en día el orden de uso de LLDPE es similar al de los otros dos tipos de polietileno más usados. Se estima que un 75% del HDPE y LLDPE producidos son usados para aplicaciones en películas delgadas y cerca del 60% de HDPE para moldeo por inyección y soplado.

Actualmente existen cientos de grados de polietilenos, los cuales difieren en sus propiedades de una forma u otra. Estas diferencias dependen principalmente de los siguientes factores:

- Variación en el grado de cadenas ramificadas cortas en el polímero
- Variación en el grado de cadenas ramificadas largas
- Variación en el peso molecular promedio
- Variación en la distribución del peso molecular (la cual depende en gran parte de las cadenas ramificadas largas)
- Presencia de pequeñas cantidades de residuos de comonomeros
- Presencia de impurezas provenientes de residuos de polimerización, algunos de los cuales pueden estar combinados con el polímero

### 2.2.4.2. Propiedades Mecánicas y Físico-Químicas

Considerando que las propiedades de los polímeros dependen fuertemente de su estructura, se comienza señalando que al polietileno se lo puede considerar como una larga cadena alopática de hidrocarburos del tipo:



La flexibilidad de los enlaces entre carbonos hace esperar bajos valores de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). Esta está asociada con la movilidad de segmentos comparativamente largos que es típica en la materia amorfa y baja en un polímero cristalino puesto que hay solamente un pequeño número de cada segmento en esta configuración. La  $T_g$  tiene poca importancia física; es más, en la literatura se puede encontrar diversos valores que van desde los  $-130^\circ\text{C}$  hasta incluso los  $60^\circ\text{C}$ , lo que indica el poco acuerdo que existe en la determinación de esta característica física.

Mucho más importante es la temperatura de fusión de los cristales ( $T_m$ ), la cual se encuentra generalmente dentro del rango desde los  $108$  a los  $132^\circ\text{C}$ , y el valor exacto dependerá de la estructura molecular detallada de cada tipo. La estructura con enlaces flexibles y la ausencia de fuerzas intermoleculares fuertes dan lugar a estos valores relativamente bajos.

El polietileno, puesto que en esencia es un alcano de alto peso molecular (parafina), tiene una buena resistencia al ataque químico. Su oxidación puede ocasionarse incluso a temperatura ambiental ante la presencia de luz ultravioleta. Además, posee una baja densidad de energía cohesiva que le permite ser resistente a solventes con parámetros de solubilidad mayores de  $18,5 \text{ MPa}^{1/2}$ . A elevadas temperaturas la solubilidad es más favorable y el polímero se disuelve en varios hidrocarburos de similar parámetro de solubilidad. Cuando tiene un alto grado de pureza, se espera que se transforme en un excelente aislante eléctrico de alta frecuencia debido a su naturaleza no polar.

El flujo del polietileno líquido es no newtoniano. La velocidad disminuye a medida que aumenta la presión y con ésta, la velocidad de paso. Por la sensibilidad de la viscosidad de la masa fundida al peso molecular, y en virtud de que el polietileno se maneja normalmente en estado fundido en operaciones de extrusión, moldeo o vaciado, los diferentes polímeros comerciales se caracterizan por la viscosidad del producto fundido. En el intervalo 20000-30000 g/mol del peso molecular, un aumento de 10% del peso molecular dobla aproximadamente la viscosidad del producto fundido, mientras que disminuye a medida que aumenta la temperatura; se reduce aproximadamente a la mitad por un aumento de 25°C en la temperatura. [INTERNET 4]

Cuando el polietileno fluye por un orificio, como durante la extrusión o el moldeo, existe una orientación apreciable de las moléculas, que pasan al estado no orientado si el material se mantiene en el estado líquido, pero permanecen orientadas en el sólido si, como es normal en la fabricación, el material fundido se enfría rápidamente. El grado de esta orientación es una función de la longitud media de la cadena y del grado de ramificación. Los polietilenos de alto peso molecular o alta densidad muestran más orientación que los materiales de peso molecular bajo, y la orientación disminuye a medida que sube la temperatura.

En la tabla de la figura 2.18 se detalla el valor de algunas propiedades de un PE con peso molecular aproximado de 25000 g/mol. Algunas de las propiedades no varían demasiado con el peso molecular, entre ellas la densidad, el punto de fusión, el calor específico, la dureza y el módulo de elasticidad; otras, como la resistencia a la tracción y al impacto, el alargamiento en la rotura por tracción y la flexibilidad a temperaturas bajas, son muy sensibles a la variación del peso molecular. En la figura 2.19 se compara algunas propiedades de los HDPE, LDPE y LLDPE.

**PE en estado Líquido**

Densidad a T=120 °C	0,80.
Coefficiente de dilatación cúbica	0,0007 por °C.
Calor específico	0,70 (aprox.)

**PE en estado Sólido**

Peso molecular medio	25.000
Viscosidad intrínseca ( en tetrahidronaftaleno a 75 °C), dlts/gr	1
Punto de fusión, °C	110
Densidad	
a 20 °C	0,92
a 50 °C	0,9
a 80 °C	0,87
a 110 °C	0,81
Coefficiente de dilatación lineal entre 0 y 40 °C, por °C	0,0002
Aumento de volumen por calentamiento desde 20 a 110 °C,	14
Compresibilidad a 20 °C, por atm.	5,5 x 10-5

**Propiedades del PE de alto peso molecular**

Calor específico	
a 20 °C	0,55
a 50 °C	0,7
a 80 °C	0,9
Índice de refracción	1,52
Módulo de Young ( 0-5% de extensión), Kg/cm2	1.600
Resistencia a la tracción a 20 °C., Kg/cm2	150
Resistencia al impacto ( barra con muesca de 0,5 plg. en cuadro),Kgm	2,07
Dureza Brinell ( bola de 2 mm de diám., 3 Kg	2
Conductividad térmica, cal/ (seg.) (cm2) ( °C/cm)	0,0007
Alargamiento en la rotura	500

Figura 2.18. Efecto de la temperatura sobre la curva esfuerzo - deformación del LDPE.

<b>Propiedad</b>	<b>LDPE</b>	<b>LLDPE</b>	<b>HDPE</b>
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	0,92-0,93	0,922-0,926	0,95-0,96
Resistencia a la tracción x 1000 psi	0,9-2,5	1,8-2,9	2,9-5,4
Elongación, %	550-600	600-800	20-120
Cristalinidad, %	65	....	95
Rigidez dieléctrica, V/mill.	480	....	480
Máxima temperatura de uso, °C	82-100	480	80-120

Figura 2.19. Propiedades físico-químicas de algunos tipos de polietileno.

Como ya se indicó en 2.2.2, la característica mostrada en la curva general de esfuerzo-deformación depende principalmente de la temperatura y de la rapidez de aplicación de carga. En la figura 2.20 se puede observar la influencia de la

temperatura en una prueba de tracción con control en la velocidad de aplicación de la carga, sobre PE de baja densidad.

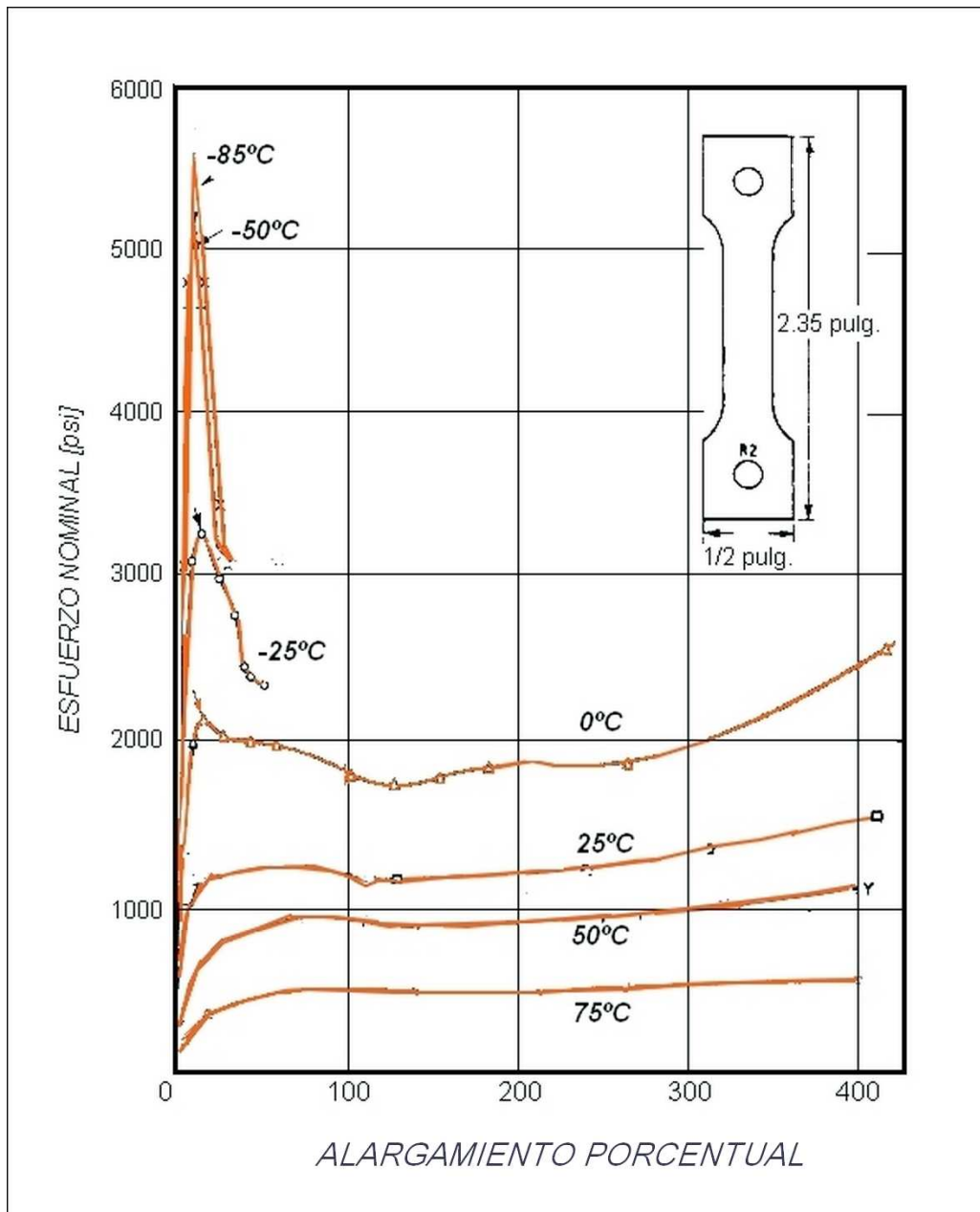


Figura 2.20. Efecto de la temperatura sobre la curva esfuerzo - deformación del PEBD (Publicación "Plastics Materials").

A medida que aumenta la temperatura disminuye el esfuerzo de fluencia; mientras que un aumento en la rapidez con que se aplica la tracción da como resultado un aumento del esfuerzo de fluencia y de la resistencia a la rotura, y también en la orientación del ejemplar estirado en frío. A medida que se reduce la

temperatura por debajo de las temperaturas ordinarias, se reduce el alargamiento en la rotura y se alcanza una temperatura en la cual no se produce estirado en frío, rompiéndose el ejemplar bruscamente con solo un alargamiento de 10%.

Todas las propiedades mecánicas del polietileno son sensibles a la historia térmica del ejemplar. Si el material se enfría rápidamente desde el estado fundido, el sólido tiene densidad y cristalinidad menores, por consiguiente es más blando y más flexible. En este caso, por lo menos al principio, es más resistente al agrietamiento a bajas temperaturas, aunque es probable que contenga más esfuerzos internos. El enfriamiento lento partiendo del estado fundido o el recocido de la muestra da un producto más cristalino, más duro y algo más quebradizo, pero el sólido puede estar sometido a menores esfuerzos y es menos probable que se produzcan cambios lentos en las dimensiones al elevarse después la temperatura.

A temperaturas inferiores a 60°C, el polietileno, si se exceptúan las muestras de peso molecular muy bajo, es muy poco soluble en los disolventes, pero a temperaturas más altas es fácilmente soluble en hidrocarburos e hidrocarburos halogenados, aunque sigue siendo muy poco soluble en líquidos más polares, como alcoholes, ácidos, ésteres, aminas, fenoles y nitrocompuestos. La solubilidad del polietileno depende hasta cierto punto del peso molecular. Las variedades más solubles son las de peso molecular más bajo, pero a temperaturas inferiores a 110°C, tiene también mucha importancia el grado de ramificación de la cadena y, por consiguiente, la capacidad del polímero sólido para cristalizar. De dos polímeros con el mismo peso molecular, pero con diferentes grados de ramificación, el más soluble es el más ramificado. [INTERNET 4]

El polietileno es insoluble en agua y solo absorbe ésta en un grado muy limitado. La absorción de agua aumenta con la temperatura. Una propiedad importante del polietileno es su reducida permeabilidad al vapor de agua. Por otro lado, el polietileno tiene una permeabilidad elevada a los vapores orgánicos y al oxígeno. La permeabilidad aumenta con la temperatura.



En ausencia completa de oxígeno, el polietileno es estable hasta 290°C. Entre 290 y 350°C, se descompone y da polímeros de peso molecular más bajo, que son normalmente termoplásticos o ceras, pero se produce poco etileno. A temperaturas superiores a 350°C, se producen productos gaseosos en cantidad creciente, pero el producto principal no es el etileno, sino el 1-buteno. En presencia de oxígeno, el polietileno es mucho menos estable. Se han observado cambios en las propiedades físicas y químicas que indican oxidación y degradación de las moléculas del polímero a 50°C, y en presencia de la luz se produce una degradación incluso a las temperaturas ordinarias.

La oxidación térmica del polietileno es importante en el estado fundido, porque influye sobre el comportamiento en los procesos de tratamiento, y en el estado sólido porque fija límites a ciertos usos. Los principales efectos de la oxidación del polietileno son variaciones en el peso molecular que se manifiestan primero por cambios en la viscosidad y, cuando son más intensos, por deterioro en la resistencia mecánica, variación en las propiedades eléctricas (especialmente aumento en el factor de potencia), desarrollo de olor rancio y cambio de color al amarillo, pardo y, en casos extremos, al negro. Una oxidación intensa, especialmente a temperaturas elevadas, conduce a la degradación de la cadena y a la pérdida de productos volátiles: monóxido de carbono, agua y ácidos grasos, y el producto se hace quebradizo y parecido a la cera. [INTERNET 4]

#### **2.2.4.3. Usos del Polietileno**

El polietileno es materia prima para la elaboración de varios productos tales como: tuberías, fibras, películas, aislamiento eléctrico, revestimientos, envases, utensilios caseros, aparatos quirúrgicos y juguetes. Las primeras aplicaciones del polietileno utilizaron como punto de partida sus excelentes propiedades eléctricas. Es así como hasta 1945 su uso como aislante en los cables submarinos y otras formas de recubrimiento de conductores absorbió la mayor parte del material fabricado. Recientemente han adquirido mayor importancia los usos que se basan en su resistencia al agua y líquidos con pH neutro, y hoy se usa el polietileno en grado cada vez mayor para hacer botellas y otros envases, tuberías para agua y

película para envolver, usos que consumen más del 50% del polietileno producido.

La forma de suministro de este polímero se hace generalmente en forma de gránulos (granzas) de unos 3 mm de diámetro, ya sea en su estado natural o con un antioxidante o un pigmento. La mayor parte de los artículos terminados hechos con PE se fabrican por extrusión, la misma que suele llevarse a cabo sobre alambres para la fabricación de cables; en forma de tubos de pared gruesa para instalaciones de abastecimiento de agua o transporte de productos químicos; en monofilamento para tejidos; en película, ya como lámina plana, como tubo ancho de pared delgada o como lámina plana sobre una hoja de papel. En general, se usan máquinas de extrusión del tipo de husillo y los gránulos se introducen en frío.

En el moldeo por inyección pueden usarse velocidades elevadas de moldeo en virtud del elevado punto de solidificación del polietileno. Para la fabricación de artículos huecos, como botellas, se usa un procedimiento parecido al de soplado del vidrio. Se usan también el moldeo por compresión y la conformación de láminas previamente formadas. [INTERNET 4]

El polietileno en forma de láminas o tubos puede soldarse usando una corriente de nitrógeno a 200°C y una barra de polietileno. Puede usarse metal perforado para reforzar una junta soldada. Algunos productos comunes a base de polietileno de alta y baja densidad se detallan en la figura 2.21.

<b>POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD</b>	<b>POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD</b>
Película termocontraíble	Tubería
Envasamiento automático	Envases soplados
Bolsas industriales	Botellas
Film para agro	Bidones
Bolsas de uso general	Contenedores industriales
Cables eléctricos (aislantes)	Cajones
Tuberías para riego	Bolsas de supermercado
Tubos y pomos	Bolsas tejidas
Autopartes	Macetas

Figura 2.21. Productos comunes hechos a base de LDPE y HDPE. [CHANDA & ROY]

### 2.3. COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES

En el capítulo 1 se indicó las propiedades de algunas fibras vegetales que suelen usarse típicamente como refuerzos en materiales compuestos. Las propiedades mecánicas de estas fibras suelen tener valores relativamente altos y si a esto se suma la capacidad que tienen de biodegradarse y su relativamente bajo costo, se tienen muchas ventajas al momento de elegir las como el refuerzo ideal de una matriz dada. Sin embargo, se debe tomar en cuenta la variabilidad que presentan en cuanto a su diámetro y contextura, por lo tanto en sus propiedades, lo que vuelve complicado el determinar un aporte exacto al compuesto que se está conformando.

### 2.3.1. EFECTOS DE UTILIZAR FIBRAS DELGADAS COMO REFUERZOS

Las fibras que se usan como refuerzos suelen ser las de menor diámetro. Esto puede justificarse por las siguientes consideraciones:

- i. El esfuerzo máximo real de la mayoría de los materiales es mucho menor que el teórico. Esta diferencia está relacionada con las fallas inherentes en la estructura y microestructura de estos. Debido a que las fibras pueden llegar a tener diámetros muy pequeños, la posibilidad de fallas se ve reducida. En la gráfica mostrada en la figura 2.22 se puede observar este comportamiento con fibras de carbono.

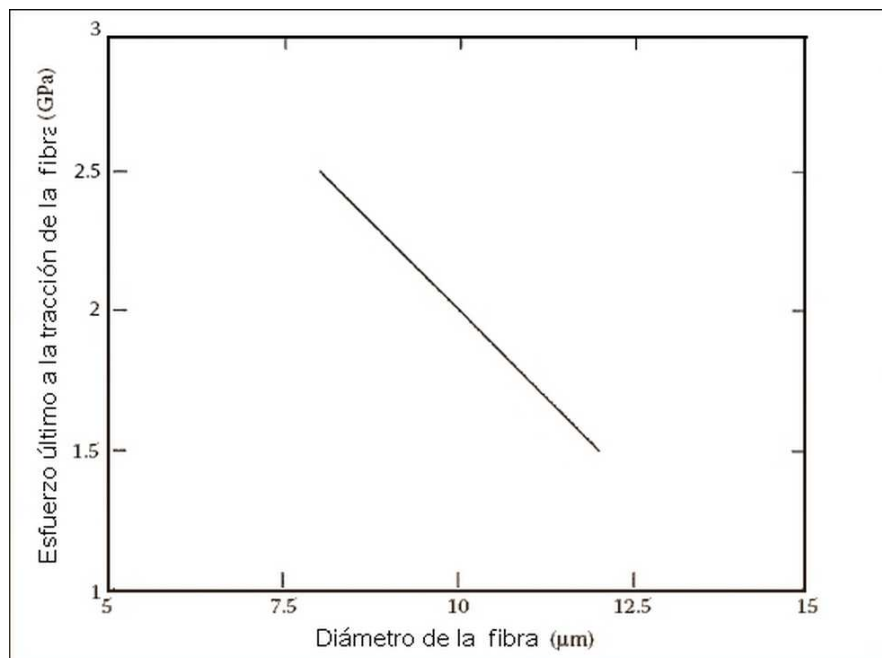


Figura 2.22. Relación de la resistencia última a la tracción de fibras de carbono con respecto a su diámetro. [KAW]

- ii. Para alta tenacidad y una mejor transferencia de carga desde la matriz hacia las fibras, los compuestos necesitan una superficie de intercara fibra - matriz grande. Para la misma fracción de volumen de fibras en un compuesto, el área de intercara entre fibras y matriz es inversamente proporcional al diámetro de las fibras. Esto puede demostrarse por medio del siguiente análisis matemático:

Si se asume que una lámina consiste en N fibras de diámetro D y largo L, el área de la intercara fibra matriz es:

$$A_i = N\pi DL \quad (2.1)$$

Si se reemplaza las fibras de diámetro D por unas de diámetro menor d, aumentando el número de ellas por n para que se mantenga el mismo volumen, se debe cumplir que:

$$n = N \left( \frac{D}{d} \right)^2 \quad (2.2)$$

Luego el área de la intercara fibra – matriz en la lámina resultante debería ser:

$$A_{ii} = n\pi dL = \frac{N\pi D^2 L}{d} = \frac{4(\text{Volumen de las fibras})}{d} \quad (2.3)$$

Esto implica que para un volumen de arreglo de fibras en un volumen dado de compuesto, mientras menor sea el diámetro d, el área Aii será mayor y por tanto habrá mayor transferencia de carga de la matriz hacia las fibras cuando ésta sea aplicada.

- iii. Otra de las propiedades que mejora cuando las fibras son más delgadas es la flexibilidad, siendo ésta muy importante cuando se requiere obtener tejidos bidimensionales o tridimensionales. La flexibilidad se define como el inverso del esfuerzo de fluencia y es proporcional al inverso del producto del módulo elástico de la fibra y la cuarta potencia de su diámetro.

$$\text{Flexibilidad} \propto \frac{1}{Ed^4} \quad (2.4)$$

Por lo tanto, mientras menor sea el diámetro, la flexibilidad aumentará con su cuarta potencia. El módulo no cambia apreciablemente con su diámetro.

En compuestos de todo tipo de matriz son muy usadas fibras muy delgadas y de alta resistencia mecánica, entre las que resaltan las fibras minerales tales como las de carbono (grafito), kevlar, vidrio\* y boro. En la figura 2.23 se puede observar las fotos en un microscópico electrónico de algunas fibras naturales, donde se puede apreciar el espesor de cada una, mientras que en la figura 2.24 se detalla la resistencia última y el módulo a la tracción con respecto a su respectiva densidad.

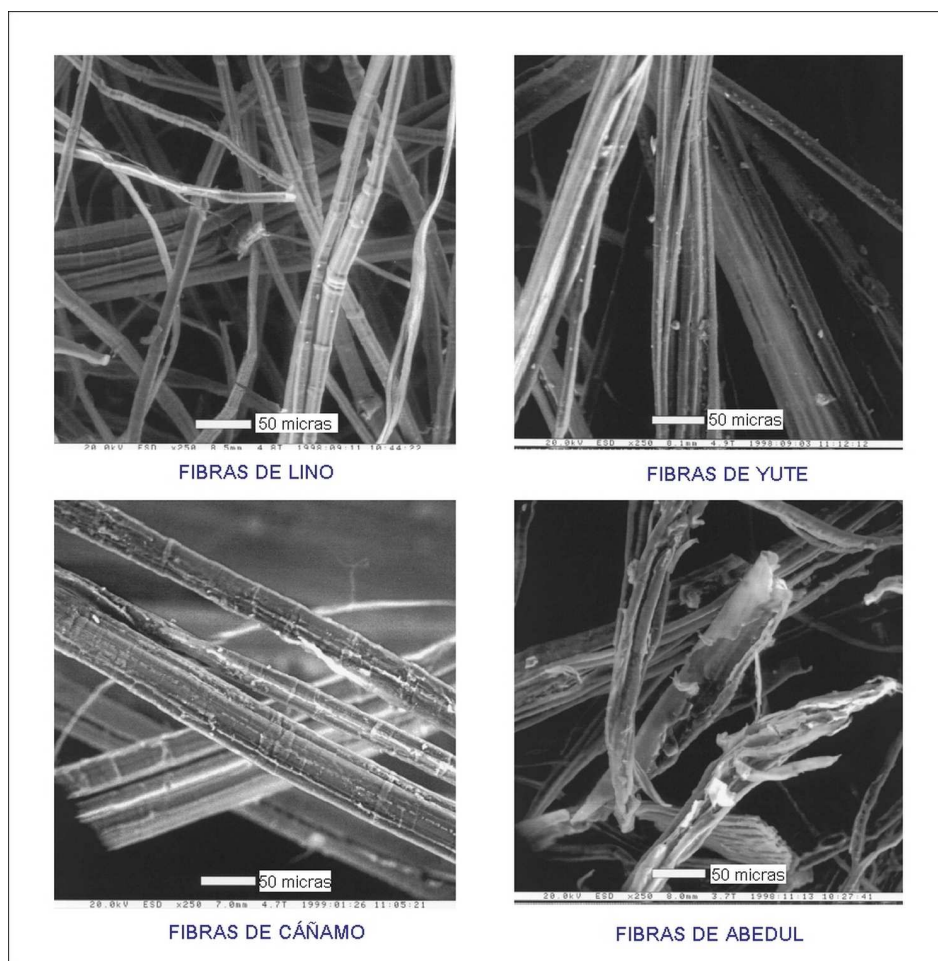


Figura 2.23. Fotos por medio de microscopio electrónico de algunas fibras naturales y sus diámetros. [LILHOLT &LAWTHER]

\* Comúnmente se conoce al vidrio tipo E como fibra de vidrio, pero existen más fibras obtenidas de este material según su requerimiento. El tipo S, por ejemplo tiene alto contenido de sílice, por lo tanto resiste altas temperaturas y tiene una resistencia mayor a la fatiga que el tipo E. Otros tipos son el C (resistente a la corrosión química), D (dieléctrico) y A (buena apariencia). [KAW]

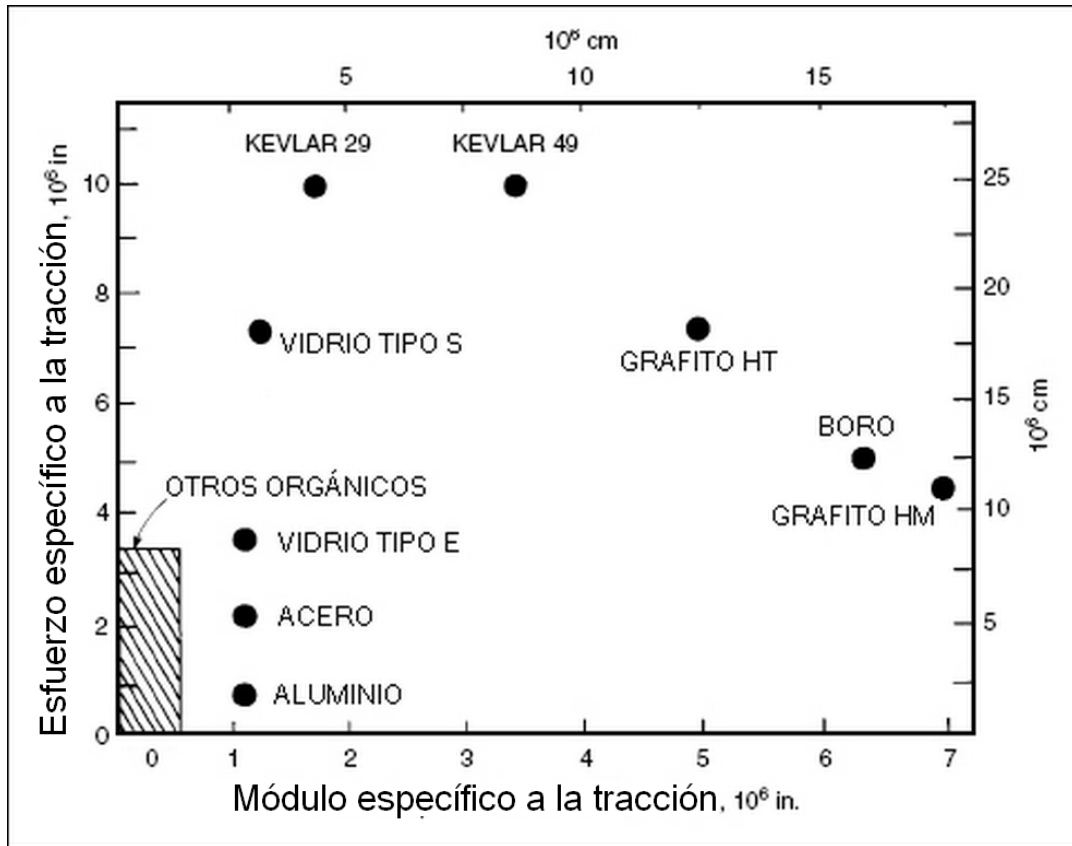


Figura 2.24. Esfuerzo último específico a la tracción y módulo de tensión específico de algunas fibras usadas como refuerzo y de algunos materiales estructurales típicamente utilizados. [MITCHELL]

Estos valores de diámetros tendrán por otro lado un límite inferior en un solo tipo de fibra que será el que mayor esfuerzo pueda alcanzar únicamente en condición de filamento. Con diámetros menores a los del pico máximo de resistencia mecánica el esfuerzo último a la tracción podría ser aún menor, como se puede ver en el caso de la figura 2.25.

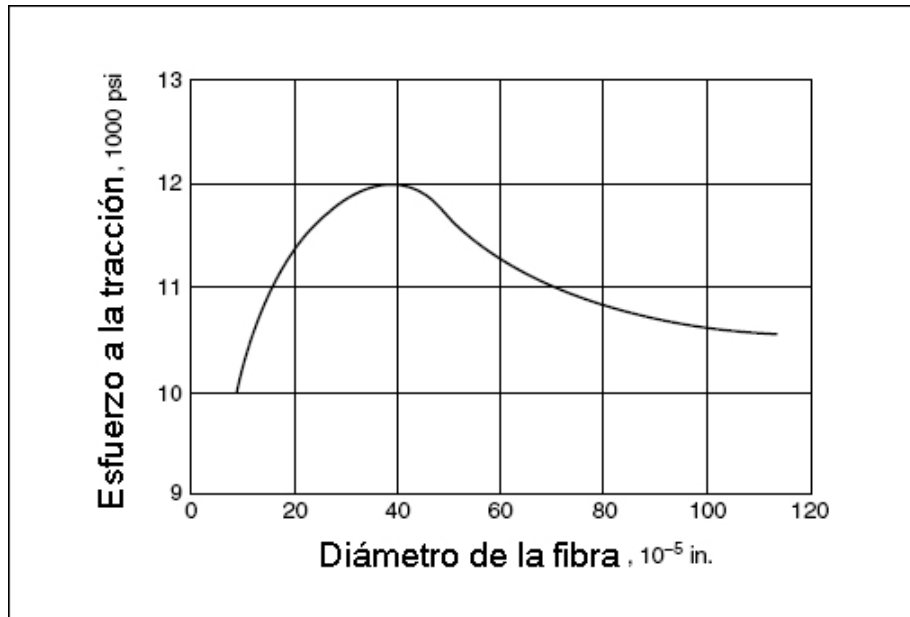


Figura 2.25. Efecto del diámetro de una fibra de vidrio sobre el esfuerzo último a la tracción de un poliestireno reforzado. [MITCHELL]

### 2.3.2. PREDICCIÓN DE PROPIEDADES DEL COMPUESTO – LEY DE LAS MEZCLAS

Una de las propiedades más importantes para utilizar un material para el diseño mecánico es el módulo de elasticidad. Cuando dos materiales elásticos (con módulos de elasticidad diferentes) se combinan el resultado es un nuevo material también elástico.

Si se supone que el módulo de un compuesto reforzado con fibras, cuando éste se encuentra cargado a lo largo de la dirección de las fibras, es una combinación lineal del módulo de las fibras,  $E_f$ , y el de la matriz es  $E_m$ , se puede determinar que el módulo del compuesto para estas condiciones  $E_{c||}$  será:

$$E_{c||} = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (2.5)$$

Donde  $V_f$  es la fracción de volumen de fibra que interviene en el compuesto. Por otro lado, cuando la carga se aplica perpendicular al sentido de las fibras, el



módulo elástico de este material  $E_{c\beta}$  se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$E_{c\perp} = \left\{ \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m} \right\}^{-1} \quad (2.6)$$

Los módulos  $E_{c\alpha}$  y  $E_{c\beta}$  para un compuesto con un 50% de composición de fibras difieren grandemente en su valor. Así por ejemplo, un compuesto uniaxial (en el cual todas las fibras están orientadas en una sola dirección) tiene alta anisotropía. Si se usa una configuración de tejido biaxial como el de la figura 2.26 (c) el módulo en las direcciones de los ángulos  $0^\circ$  y  $90^\circ$  pueden ser semejantes, pero a  $45^\circ$  son muy bajos con respecto a los dos primeros.

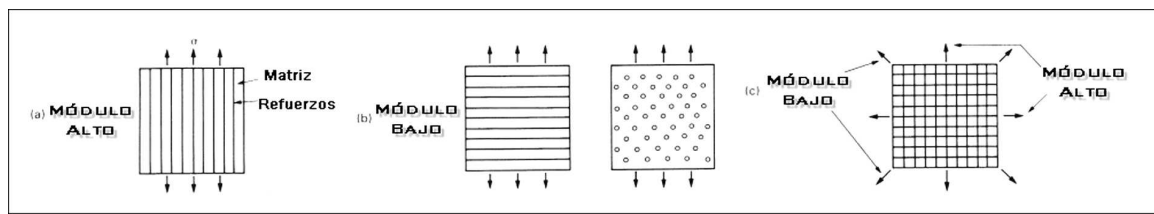


Figura 2.26. Módulo de un compuesto reforzado con fibras en función de la orientación de las mismas. [ASHBY]

La mayor parte de los CMP están hechos de fibras bastante fuertes, frágiles y quebradizas embebidas en una matriz polimérica dúctil. En la figura 2.27 se puede observar como la combinación de las propiedades de ambos materiales dan como resultado un módulo y un esfuerzo de fluencia intermedios.

En el pico máximo de la curva, las fibras están justamente en el punto de rotura y la matriz se encuentra en la zona plástica. Es decir, ya se ha sobrepasado el esfuerzo de fluencia, de manera que el esfuerzo máximo que alcanza el compuesto está dado por el esfuerzo de fluencia de la matriz,  $\sigma_y^m$ , y esfuerzo de fractura de las fibras  $\sigma_r^f$ , a través de la *ley de las mezclas*:

$$\sigma_{TS_c} = V_f \sigma_r^f + (1 - V_f) \sigma_y^m \quad (2.7)$$

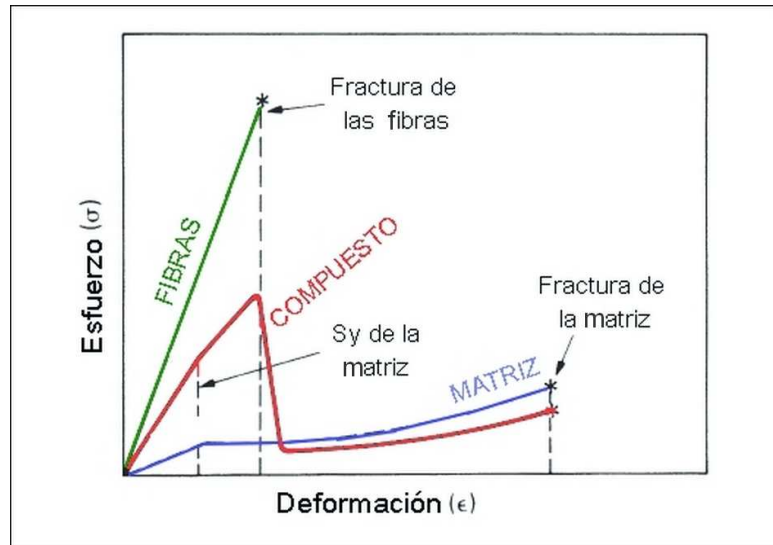


Figura 2.27. Módulo de un compuesto reforzado con fibras en función de la orientación de las mismas. [ASHBY]

Una vez que se las fibras se han fracturado, se espera que el comportamiento del compuesto sea semejante al de la matriz, es decir que corresponda al descrito por la ecuación:

$$\sigma_{TS_c} = (1 - V_f) \sigma_r^m \quad (2.8)$$

Donde  $\sigma_r^m$  es el esfuerzo de rotura de la matriz. En la figura 2.28 se puede observar el comportamiento de las ecuaciones 2.7 y 2.8 en cada fase de la curva esfuerzo deformación de un compuesto.

El volumen crítico de fibras mostrado en la figura 2.28 debería ser superado para asegurar que el esfuerzo máximo del compuesto sea superior al de la matriz. Si fuera menor se espera que la fractura llegue antes del pico y por lo tanto el esfuerzo obtenido sea más bajo.

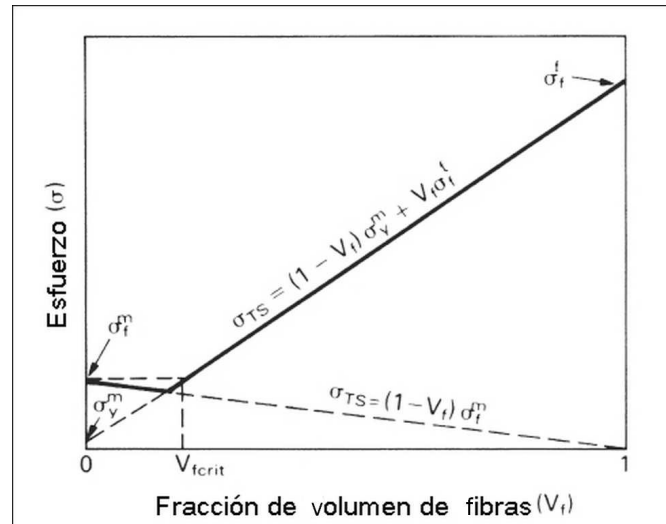


Figura 2.28. Módulo de un compuesto reforzado con fibras continuas unidireccionales en función de la orientación de las mismas. [ASHBY]

Para algunas aplicaciones (especialmente de moldeo) las fibras continuas son un inconveniente para el procesamiento del compuesto. Si se usa fibras cortas se espera que las propiedades obtenidas sean mucho más bajas con respecto a las obtenidas con fibras continuas. El promedio de la carga soportada por las fibras cortas es apenas la mitad que la soportada por las fibras largas; es decir,  $\sigma_r^{f/2}$ , y el esfuerzo en el pico será entonces

$$\sigma_{TS_c}(\text{fibras cortas}) = \frac{V_f \sigma_r^f}{2} + (1 - V_f) \sigma_y^m \quad (2.9)$$

Es decir, el esfuerzo a la rotura es un poco más de la mitad que el obtenido por fibras largas, si es que estas fibras cortas estuvieran alineadas en una sola dirección. Por supuesto esto no es verdad en un compuesto de fibras cortas. Por ejemplo, en el panel de un automóvil las fibras están dispuestas aleatoriamente en el plano del panel. Por ende, solamente una fracción de estas estarán orientadas en dirección de la carga (aproximadamente una cuarta parte de ellas) y su contribución en aumentar el módulo y los esfuerzos máximo y de fluencia del compuesto serán menores. La figura 2.29 muestra los límites que se observan en el módulo de elasticidad de un compuesto reforzado con fibras.

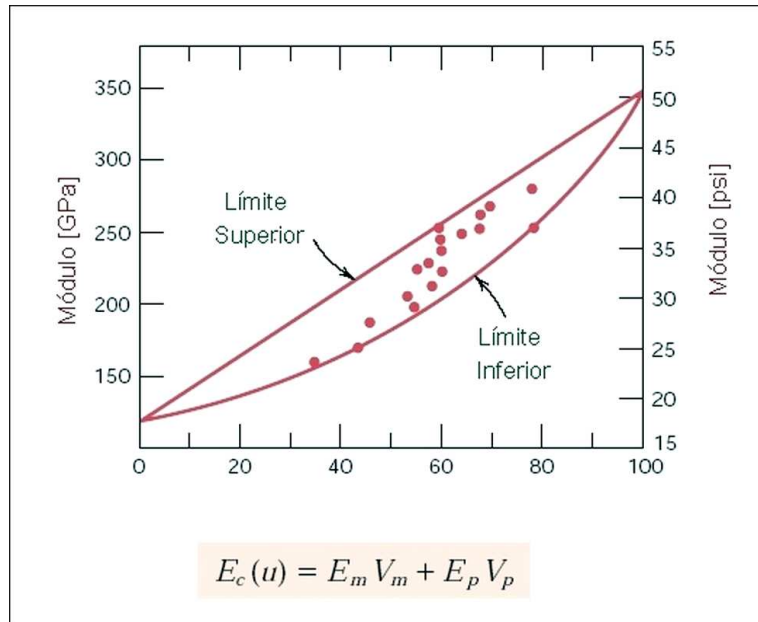


Figura 2.29. Límite superior e inferior aplicando la ley de las mezclas para un compuesto reforzado con fibras. [CALLISTER]

Para determinar el efecto del tamaño de las fibras cortas sobre las propiedades se puede acudir a la figura 2.30, donde se puede observar como la fuerza axial transmitida a la fibra de diámetro  $\delta$  sobre el segmento diferencial  $dx$  de este largo es igual a:

$$\partial F = \pi d \sigma_s^m \partial x \quad (2.10)$$

Tomando en cuenta esto, la fuerza total sobre la fibra desde cero hasta alcanzar el valor final será:

$$F = \int_0^x \pi \phi \sigma_s^m dx = \pi \phi \sigma_s^m x \quad (2.11)$$

Por lo tanto, la fuerza de rotura se puede determinar mediante la siguiente relación matemática:

$$F_r = \frac{\pi \phi^2}{4} \sigma_r^f \quad (2.12)$$

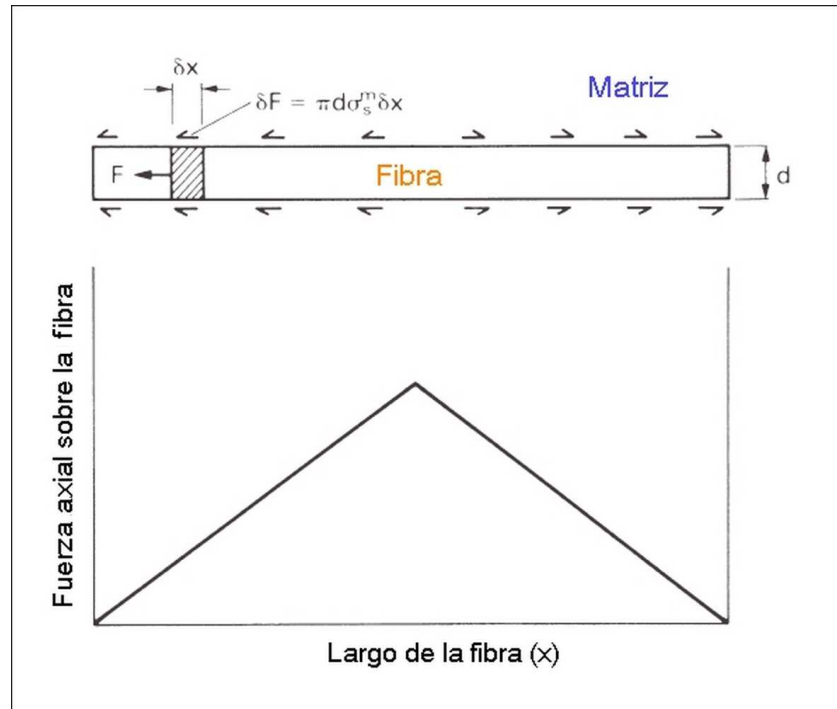


Figura 2.30. Carga transferida desde la matriz a la fibra que causa de un esfuerzo de tracción que se eleva a la altura del centro de la fibra. Si el pico es excedido la fibra se romperá. [ASHBY]

Igualando estas dos fuerzas se puede determinar la distancia a la cual se romperá la fibra, es decir:

$$x_r = \frac{\phi \sigma_r^f}{4 \sigma_s^m} \quad (2.13)$$

Si el largo de la fibra es menor que  $2x_r$ , las fibras no se romperán pero no podrán soportar, como sería deseable, la carga a la que está sometido el compuesto. Si fuese más largo que  $2x_r$  no hay ganancia por el largo adicional. El desempeño óptimo en lo que tiene que ver con el esfuerzo máximo transmitido se consigue cuando el largo de la fibra es igual a  $2x_r$ .

Es importante señalar que las propiedades a compresión serán mucho menores que a tracción. Esto se debe a la respuesta de las fibras a este tipo de esfuerzo. Mientras que los cerámicos son mejores sometidos a compresión, los compuestos son mejores sometidos a tracción. En el caso de la tenacidad  $G$ , se puede

extrapolar la ley de las mezclas, por lo tanto será el valor de la tenacidad el siguiente para un CMP reforzado con fibras continuas:

$$G_c = V_f G_f^f + (1 - V_f) G_f^m \quad (2.14)$$

Donde  $G_f^f$  es la energía absorbida por las fibras por unidad de área fracturada, así como cuando comienza la fractura  $G_f^m$  se refiere a esta propiedad en la matriz.

### 2.3.3. CONFIGURACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LAS FIBRAS EN EL COMPUESTO

El arreglo u orientación de las fibras una con respecto a otra y su distribución dentro de un compuesto tiene una significativa influencia en la resistencia mecánica y en otras propiedades del compuesto reforzado por fibras. Con respecto a la dirección de las fibras, dos extremos son posibles: a) alineación paralela al eje longitudinal de las fibras en una sola dirección, y b) totalmente aleatoria. Las fibras continuas se usan generalmente alineadas, mientras que las cortas se disponen aleatoriamente.

Los tejidos hechos a base de fibras refuerzan materiales que tienden a ser cuasisotrópicos, puesto que lo que se busca con su utilización es obtener propiedades parecidas en otra dirección. Existen varias configuraciones como las que se puede observar en la figura 2.31, mas no todas son fáciles de elaborar, todo depende de la rigidez de la fibra para que se pueda confeccionar alguna de estas configuraciones.

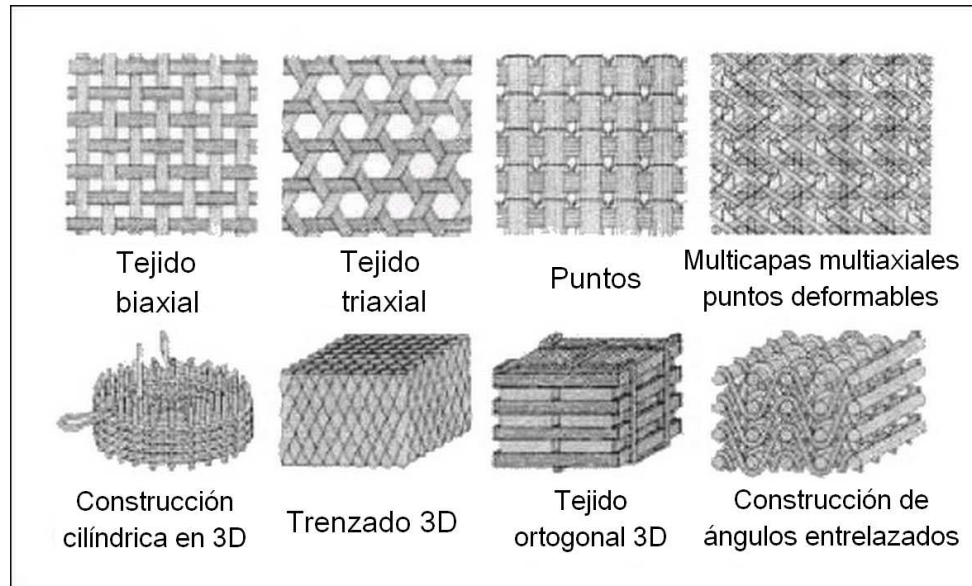


Figura 2.31. Configuraciones comunes de fibras que refuerzan CMP. [ADVANI]

### 2.3.3.1. Variación de propiedades

Pueden existir grandes cambios debido a la orientación de las fibras y debido a su tamaño. En la figura 2.32 se puede observar la respuesta de diferentes compuestos ante cargas con diferentes direcciones a las de orientación de las fibras. En la práctica, la eficiencia del reforzamiento es menor, por lo tanto se suele introducir los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  en las expresiones que permiten estimar las propiedades mecánicas del compuesto.

$$\sigma_{TS_c} = k_1 V_f \sigma_r^f + (1 - V_f) \sigma_y^m \quad (2.15)$$

$$E_{cll} = k_2 V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (2.16)$$

En el caso de tejidos bidimensionales o biaxiales los valores de  $k_1$  y  $k_2$  son comúnmente 0,3 y 0,65 respectivamente. En la tabla 2.1 se listan las eficiencias de reforzamiento de fibras orientadas de distintas formas.

En flexión, compresión y corte, los compuestos formados por fibras cortas son probablemente mejores que los que están formados por fibras continuas. Esto se

debe a que la orientación aleatoria de los primeros indica que al menos alguna de las fibras estará correctamente alineada para resistir la deformación por este tipo de esfuerzos.

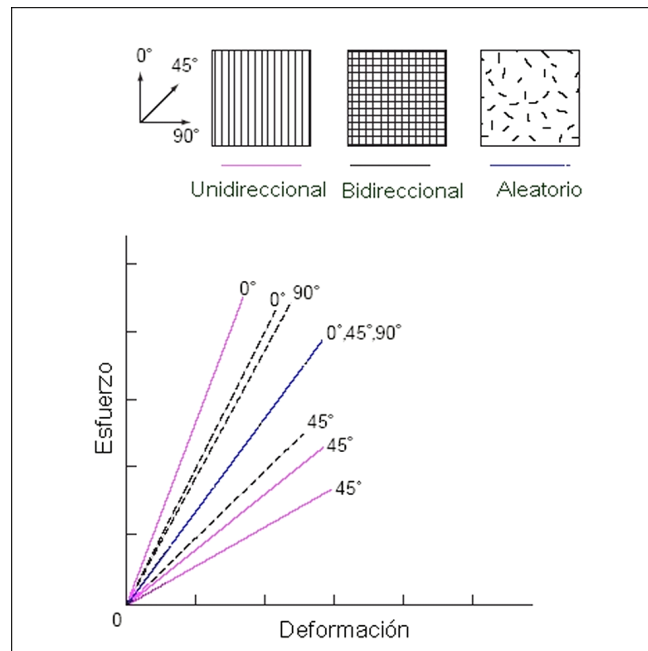


Figura 2.32. Configuraciones comunes de fibras que refuerzan CMP. [CHANDA & ROY]

Tabla 2.1. Eficiencia de reforzamiento en compuestos reforzados por fibras para algunas orientaciones de fibras y direcciones de la carga aplicada [CALLISTER]

ORIENTACION DE FIBRAS	DIRECCIÓN DEL ESFUERZO	EFICIENCIA DEL REFUERZO
Todas las fibras paralelas	Paralelo a las fibras	1
	Perpendicular a las fibras	0
Fibras randómica y uniformemente distribuidas en un plano específico	En cualquier dirección en el plano de las fibras	3/8
Fibras randómica y uniformemente distribuidas en tres dimensiones en el espacio	En cualquier dirección	1/5



### 2.3.3.2. Limitantes de los procesos de manufactura

Los procesos de moldeo son los preferidos para elaborar materiales compuestos reforzados por fibras cortas. Esta elección tiene que ver con la facilidad de adaptar los equipos y herramientas destinadas a obtener productos poliméricos, aunque es importante señalar que los componentes de las máquinas disminuirán la vida útil por el desgaste acelerado que provocará el trabajar con elementos de mayor dureza que los polímeros.

En el caso del moldeo por extrusión, será el tornillo extrusor el que sufra este deterioro. En el moldeo por inyección, el molde metálico sufrirá los rayones y en el moldeo por compresión las tapas del molde se rayarán pero con menor rigurosidad debido a las relativamente bajas velocidades de flujo del material polimérico y de la carga. La distribución de la fibra en la matriz estará dada por un método adecuado de alimentación de carga tal que pueda estar lo más uniformemente distribuido.

De acuerdo a la dirección del flujo del polímero fundido se puede obtener distribuciones diferentes de las fibras cortas; en esto va a tener influencia, entre otras cosas, la velocidad del proceso, la presión y la disposición inicial de la carga. Obtener fibras cortas orientadas en una sola dirección es un proceso bastante complejo; lo más habitual es la distribución aleatoria.

El trabajo con fibras continuas es mucho más complicado, más aún considerando que en este caso se debe alinear las fibras de tal modo que el refuerzo tenga una configuración unidireccional, bidireccional o de otro tipo. La facilidad del procesamiento es inversamente proporcional al desempeño relativo del compuesto en la curva esfuerzo deformación, como se puede observar en la figura 2.33.

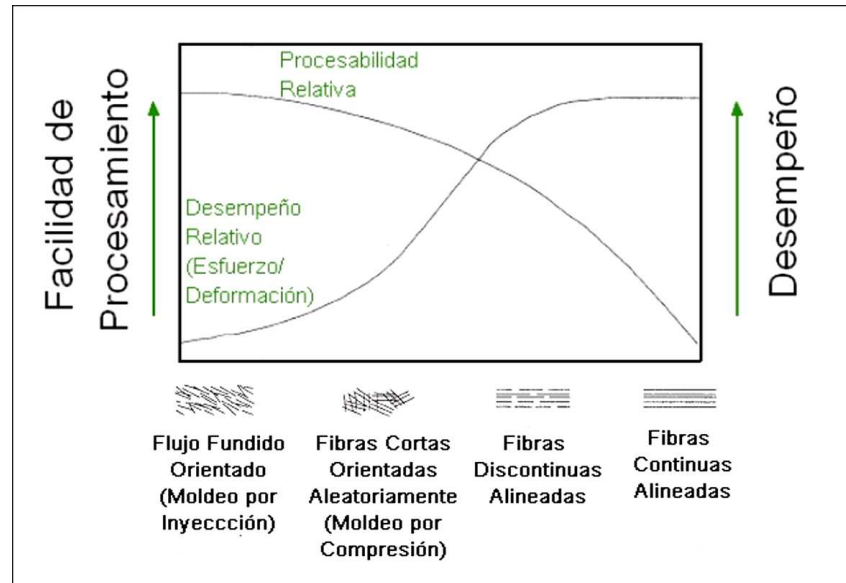


Figura 2.33. Rol esquemático de la configuración de la fibra sobre el desempeño y la facilidad de procesamiento. [ADVANI]

#### 2.3.4. INTERCARA FIBRA – MATRIZ

Una fuerte adhesión entre las fibras y la matriz mejorará la resistencia interlaminar al corte, la resistencia a la delaminación, las propiedades de fatiga y la resistencia a la corrosión del compuesto. Por otro lado, una adhesión débil es útil para el cambio de tolerancias y la absorción de energía. [ADVANI]

En la adhesión juega un papel fundamental el área de la interfaz fibra – matriz. Esta área está dada por aproximadamente cuatro veces la fracción de volumen de las fibras dividida para el diámetro de las fibras.

Una fuerte unión entre la fibra y la matriz está dada por un excelente mojado de las fibras por el material de la matriz. La termodinámica del estado de mojado señala que los líquidos de baja energía mojan los sólidos de alta energía. La energía superficial de los polímeros generalmente está en valores cercanos a 35 dinas/cm<sup>2</sup>.

Si bien la presencia de fibras como refuerzos aumenta las propiedades de esfuerzo y módulo del material base, estos también causan una distribución compleja de los esfuerzos en estos materiales. Por ejemplo, bajo una carga

simple de tracción, un sistema triaxial de esfuerzos es establecido desde la presencia de las fibras que restringen la contracción lateral de la matriz, incrementando las posibilidades de falla frágil en el material. El tipo de fractura ocurrirá dependiendo de las condiciones de carga y de la adherencia entre las fibras y la matriz. Con un refuerzo a través de fibras continuas es necesario que éstas fallen antes de que toda la fractura ocurra. Los dos tipos de fractura ocurrida por cargas de tracciones pueden observar en la figura 2.34.

Es interesante observar que cuando una sola fibra se rompe en un compuesto hecho a base de fibras continuas, esta no deja de contribuir a la resistencia del material, debido a que la fibra rota actúa ahora como dos o más fibras cortas, y éstas seguirán soportando parte de la carga externa aplicada al compuesto mientras este no falle definitivamente. El estado de la superficie de rotura de un material de este tipo puede observarse en la foto de la figura 2.35 donde se puede notar esta característica de las fibras.

En compuestos con fibras cortas no es un prerrequisito la rotura de la fibra para completar la fractura del compuesto, especialmente cuando la adherencia es débil, puesto que las fibras pueden estar simplemente embebidas en la matriz fuera de la región de propagación de la fractura.

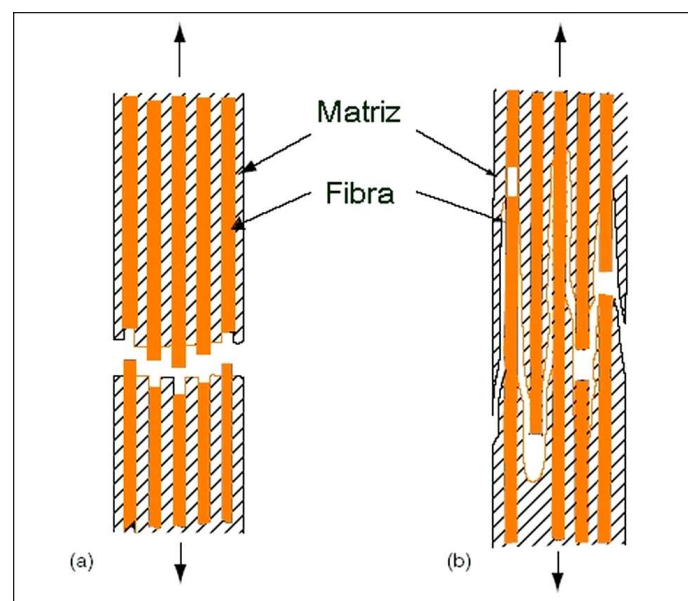


Figura 2.34. Modos típicos de fractura en plásticos reforzados por fibras: a) con una fuerte adherencia, y b) con una adherencia débil entre los elementos. [CHANDA & ROY]

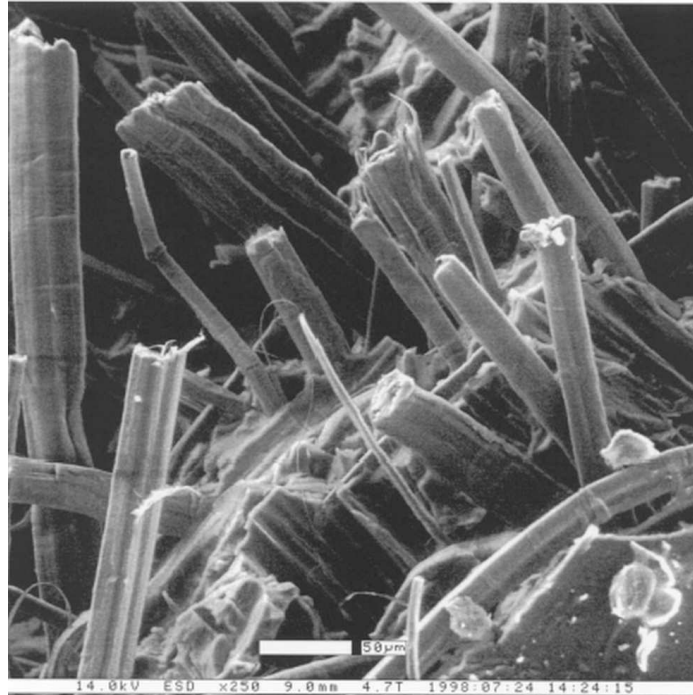


Figura 2.35. Compuesto de fibras de lino con PP, la zona de fractura da la información acerca de la adhesión de fibras y matriz. [LILHOT]

### **2.3.5. COMPUESTOS CON FIBRAS VEGETALES FRENTE A COMPUESTOS REFORZADOS CON OTRO TIPO DE FIBRAS**

Los biocompuestos amigables con la naturaleza que están conformados de plásticos derivados de plantas (bioplásticos) y biofibras (fibras naturales) son los materiales hacia los cuales apunta el desarrollo tecnológico del siglo XXI. No solamente porque son una solución a la creciente amenaza medio ambiental sino porque responden a la incertidumbre del abastecimiento futuro de petróleo [CHANDA & ROY]. La figura 2.36 muestra como se ha incrementado la capacidad de producción de materiales biodegradables durante los últimos años y como se espera que crezca hasta el 2010.

Los compuestos naturales están emergiendo como una alternativa viable para reemplazar los compuestos de matriz polimérica reforzados por fibra de vidrio (GFRP), especialmente en aplicaciones automotrices. Pueden llegar a ser entre un 25 y 30% más fuertes que los GFRP en una base de pesos iguales y pueden entregar el mismo desempeño con pesos menores. Además, son menos

quebradizos y tienen mayor resistencia al impacto, lo cual es un requerimiento importante para el uso en un compartimiento para transportar pasajeros.

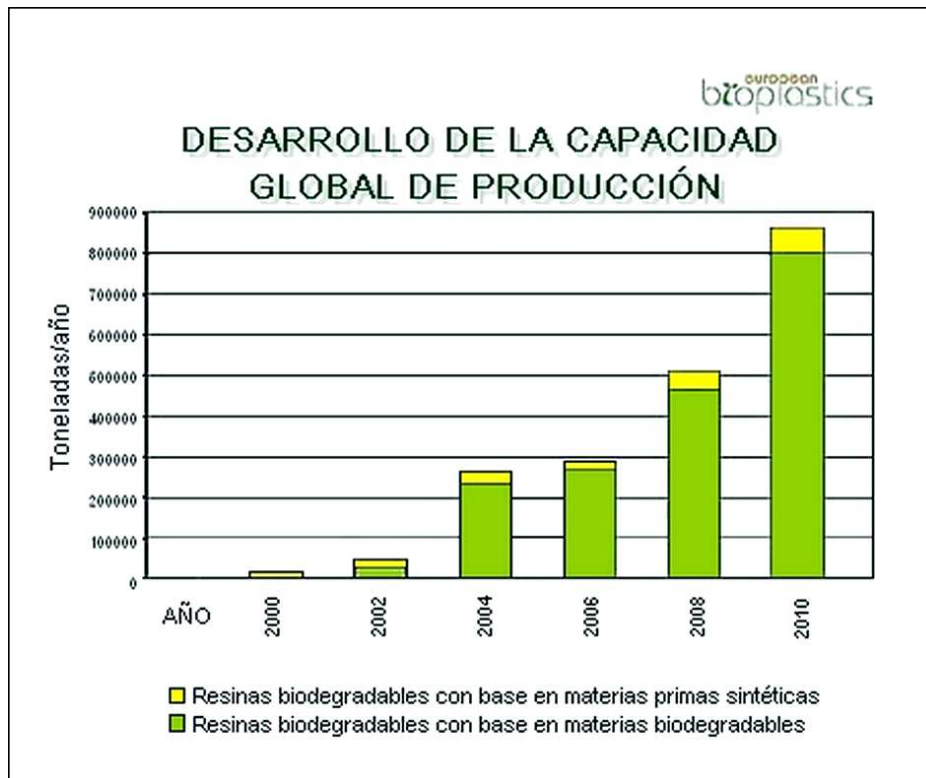


Figura 2.36. Producción de materiales biodegradables. [INTERNET14]

Las compañías automotrices se encuentran buscando materiales que posean una buena absorción de ruidos, que no se tricen y sean livianos para reducir el consumo específico de combustible de los automóviles. Las fibras naturales poseen una excelente capacidad para absorber ruido y sus compuestos son mucho más resistentes a quebrarse que los GFRP. Una característica competitiva radica en la baja energía de procesamiento que tienen los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales con respecto a los de fibra de vidrio. Este ahorro se traduce obviamente en costos menores de fabricación. En efecto, en autopartes, los biocompuestos reducen la masa de los componentes y pueden disminuir hasta un 80% el total de energía consumida al producir este material.

Las fibras naturales de kenaf y abacá que reemplazan a la fibra de vidrio tienen una tercera parte del costo que la fibra de vidrio tipo E y aproximadamente un

medio de la densidad, aceptables propiedades mecánicas e intensificada biodegradabilidad. Las partes interiores y paneles de tapicería en las puertas de automóviles hechos a base de compuestos de polipropileno y fibras naturales, y partes exteriores hechas de resinas de poliéster y fibras naturales son actualmente muy utilizadas en la industria.

Los compuestos derivados de fibras naturales y polímeros sintéticos tales como el polietileno, polipropileno, epóxicos y poliéster son casi siempre no suficientemente amigables con la naturaleza a causa de los polímeros sintéticos basados en el petróleo, cuya naturaleza es no biodegradable. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el volumen de fibra que refuerza este tipo de compuestos está reemplazando un volumen de polímero en el material final. Por tanto existe un significativo ahorro en el uso de los polímeros no biodegradables y se obtiene a cambio materiales con características mecánicas superiores. He ahí la importancia de asegurar un alto contenido de fibra en este tipo de materiales.

Las fibras naturales con mayor acogida son las obtenidas de: abacá, piña, kenaf, henequén, coco, cáñamo, maíz y plantas de hojas grandes. Por otro lado, los biopolímeros con aceptables propiedades mecánicas son el acetato de celulosa, almidón plástico y plásticos basados en soya [CHANDA & ROY]. La figura 2.37 lista los materiales más comunes que se emplean como matrices y fibras de refuerzos en compuestos.

## **2.4. PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN**

Existen algunos tipos de moldeo utilizados para obtener compuestos dependiendo del tipo de aplicación que se desea. Para conseguir procesar compuestos que estén hechos de fibras cortas o largas impregnadas en un material polimérico, los dos métodos más usados son el moldeo por compresión y el moldeo por inyección

El moldeo por compresión es una de las más antiguas técnicas de procesamiento de polímeros y es el candidato natural para la manufactura de productos con

forma cercana a la forma final, es decir, aquellos que no necesitan de más operaciones para alcanzar la forma final del producto en fabricación. Asimismo, este proceso es adecuado para la fabricación de partes de pared delgada a bajo costo.

MATRICES Y REFUERZOS EN COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA	
MATRIZ	REFUERZO
<b>Termoestables:</b> Epóxica Fenólica Poliamida Bismaleimida Poliéster  <b>Termoplásticos</b> Polieteretquetona "PEEK" Polisulfona "PSU" Polipropileno "PP" Polietileno de Alta Densidad "PEAD"  <b>Elastómeros</b> Etc.	<b>Fibras animales</b> Seda <b>Fibra de semilla</b> Bonote del Coco Algodón <b>Fibra de hojas</b> Abacá Sisal Piña <b>Fibra de la corteza del tallo</b> Lino Cañamo Yute Chiqui - Chiqui <b>Fibras sintéticas</b> Vidrio E Vidrio S Aramida (K49) Carbono Alto <b>Esfuerzo</b> Carbono Alto <b>Módulo</b> Boro

Figura 2.37. Combinaciones de matrices poliméricas y refuerzos de de fibras naturales comunes. [INTERNET13]

Para elaborar una parte a través de moldeo por compresión, las cuatro necesidades principales de este proceso son:

- Materia prima
- Herramientas /molde
- Calor
- Presión

Existen algunos tipos de moldeo por compresión que se han popularizado en la elaboración de compuestos reforzados por fibras, por su versatilidad para producir materiales en procesos continuos de fabricación de diferentes formas. Los más conocidos por sus siglas en inglés son el SMC (Moldeo por compresión de

láminas de hasta 6 mm de espesor, con sus variantes SMC-R cuando las fibras están dispuestas aleatoriamente, SMC-CR cuando contienen fibras continuas unidireccionales y XMC cuando son un mezcla de los tipos de proceso), TMC (Moldeo por compresión para películas gruesas de hasta 50 mm) y BMC (se usa para obtener productos en forma de tochos, sogas o pasta, se lo conoce también como DMC). La figura 2.38 ilustra el proceso básico de obtención de SMC y su uso en la fabricación de una pieza automotriz.

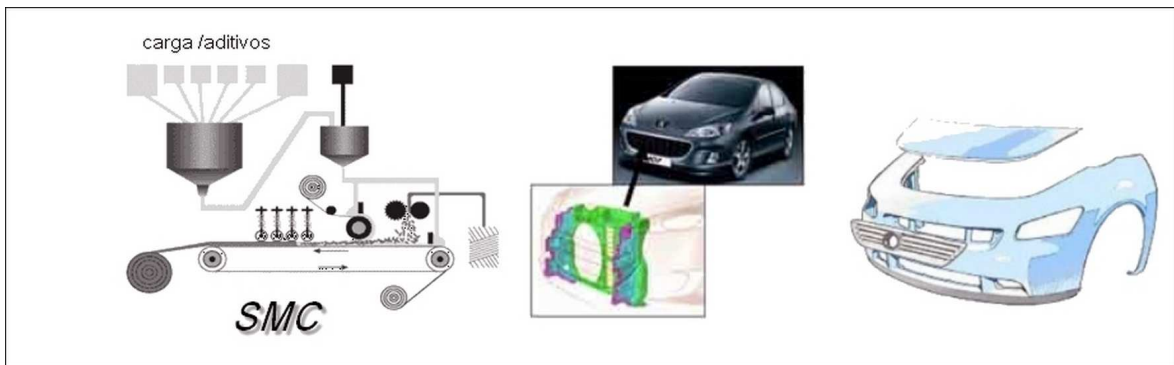


Figura 2.38. SMC, proceso básico y aplicaciones en la industria automotriz.

#### 2.4.1. MATERIA PRIMA

Como ya se indicó anteriormente, del lado de la matriz es común trabajar con materiales poliméricos en forma de granzas o esferas pequeñas, siendo la primera la más popular. Con esta forma del material, el transporte y manejo es bastante simple. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que se trata de formas irregulares que no tienen un área de contacto uniforme con las tapas del molde ni consigo mismas. Por lo tanto, el proceso de transferencia de calor necesario para fundir el material de la matriz es complejo. No se suele realizar ningún trabajo previo sobre el polímero que será utilizado en el proceso, solo se comprueba que este no esté contaminado con otras sustancias.

Las fibras utilizadas para reforzar los compuestos pueden tener diferentes configuraciones y tamaños, según sean las características que se busca alcanzar en el compuesto. Si se trabaja con fibras naturales es importante advertir que el contenido de humedad que éstas mantienen puede deteriorar al compuesto,



desmejorar la adhesión de fibras y matriz, disminuir las propiedades mecánicas (debido a su alto contenido de celulosa) y degradar a las propias fibras en el transcurso del tiempo. Por estas razones es imprescindible secar las fibras naturales antes de que se proceda a unir las con un material base cualquiera. De igual manera, se debe asegurar que las fibras se dispongan de modo que una vez concluido el proceso de manufactura, se encuentren distribuidas a lo largo del compuesto como se espera. La figura 2.39 muestra la resistencia a la tracción y la elongación máxima de algunos tipos de fibras, ya sean secas o húmedas.

Material	Resistencia a la tracción [MPa ]		Elongación última [%]	
	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo
<i>RAMIO</i>	900	1060	2.3	2.4
<i>ALGODÓN</i>	200-800	200-800	12.-16	6.-13
<i>LINO</i>	824	863	1.8	2.2
<i>RAYÓN VISCOZO</i>	200-400	100-200	8.-26	13-43
<i>ACETATO DE CELULOSA</i>	150-200	100-200	21-30	29-30

Figura 2.39. Propiedades mecánicas de algunos materiales a base de celulosa, secos y húmedos. [CHANDA & ROY]

Existen algunas técnicas para ubicar a las fibras dentro del molde de modo que se obtenga la orientación deseada. Esto dependerá del molde que se usa, del tipo de fibra, de su tamaño y obviamente de la orientación que se busca. En la figura 2.40 se muestran algunas formas en las que las fibras se distribuyen a nivel comercial y que influyen en el procesamiento de compuestos.

El procesamiento de fibras naturales cuenta con dificultades intrínsecas que tienen que ver con el manejo de materiales biodegradables. Es por esto que tanto las condiciones de almacenamiento, así como los parámetros de temperatura y presión con los que se va a trabajar, deben garantizar que las fibras no van a perder sus propiedades durante estas operaciones.

Dependiendo del caso se puede incluir el uso de desmoldantes en el proceso, y de este modo se puede beneficiar la operación de retirar la pieza del molde una vez que esta ya haya sido procesada. Estos se aplican generalmente en el molde y deben soportar las condiciones de operación del moldeo por compresión. Nunca deben incorporarse al material de la matriz o a los refuerzos.



Figura 2.40. Presentación de diferentes materiales utilizados como refuerzo. Fibra de vidrio, carbono y fibras naturales. [CHANDA & ROY]

#### 2.4.2. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

Para poder procesar el material mediante moldeo por compresión son necesarios tres elementos principales: una fuente de calor para fundir el material polimérico, una fuente de presión para moldear la mezcla fundida y un recipiente o molde en donde se realice el proceso para dar la forma y los acabados finales al producto.

El primer y segundo elementos pueden combinarse fácilmente utilizando prensas con elementos calefactores que permitan dar un flujo de calor al molde mientras se está aplicando la presión indicada (Figura 2.41). Debido a la forma de la materia prima, que en el caso de la matriz suele estar en forma de granzas o gránulos, la presión sobre éstos permitirá que las caras y aristas en contacto con las tapas del molde reciban el flujo de calor garantizando el contacto de estas superficies. Mientras el material se funde, esta área de flujo aumentará gracias a

la deformación gradual que proporciona la presión sobre las tapas del molde y garantizará una buena transferencia de calor. (Figura 2.42)



Figura 2.41. Prensa calefactora para moldeo por compresión

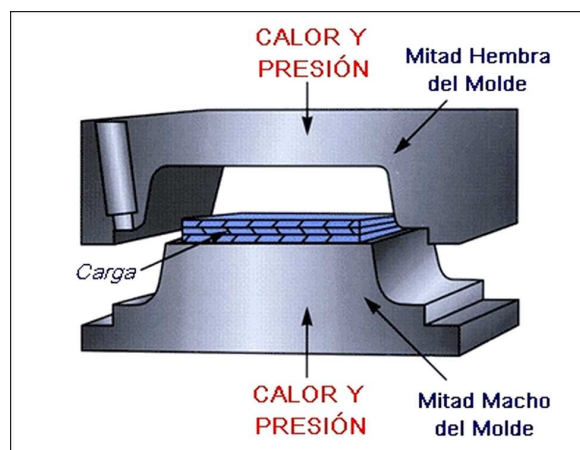


Figura 2.42. Molde tipo hembra-macho para moldeo por compresión.

El tercer elemento o molde, como ya se indicó anteriormente, suele tener la forma del componente que se desea obtener, para evitar operaciones posteriores al moldeo. Suele ser metálico, generalmente de acero, por su buen coeficiente de conducción de calor y dureza superficial aceptable que le permite no deformarse fácilmente por golpes y rayarse menos que metales más dúctiles como el aluminio. Su forma y configuración debe asegurar un desmolde fácil. En la figura 2.43 se muestra un molde tipo caja, muy común en las operaciones de moldeo por compresión.

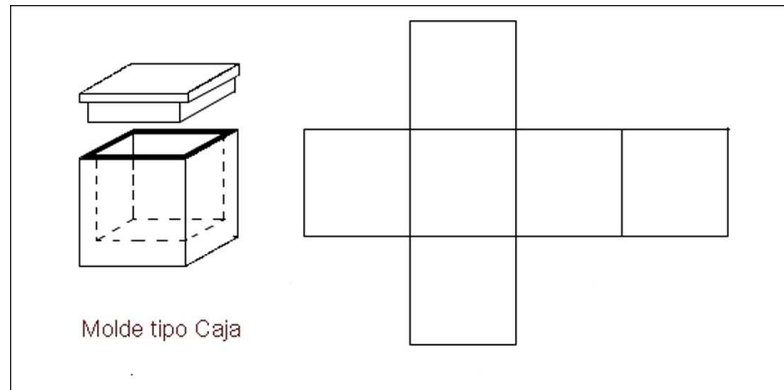


Figura 2.43. Molde metálico típico, tipo caja, para moldeo por compresión. [ADVANI]

### 2.4.3. FASES DEL PROCESO

Para realizar moldeo por compresión hay que tener en cuenta que la materia prima deberá estar sometida a tres estados físicos durante el proceso de manufactura. Debido a estas diferencias en las condiciones es necesario asignar una etapa a cada estado dentro del proceso total de moldeo por compresión. Cada una tiene su importancia particular en el desarrollo del producto final, y los parámetros de procesamiento dependerán de la fase en la que se encuentre la materia prima.

Estas fases son tres: precalentamiento del molde, moldeo y finalmente enfriamiento. Cabe señalar que el proceso comienza antes con la carga de material en el molde y la preparación de este para introducirlo en la prensa calefactora u otra maquinaria que le permita sumar calor y presión al contenido del molde. Además, puede haber preparación de los materiales antes de ser procesados, lo cual no se tomaría en cuenta dentro de las fases para el moldeo por compresión. La figura 2.44 ilustra una secuencia básica de operaciones de moldeo por compresión.

Para la definición de las fases del proceso es importante conocer la temperatura de fusión del material de la matriz y su temperatura de cristalización. En la gráfica de la figura 2.45 se puede observar la curva de calentamiento para un molde dado donde se está procesando PE. Nótese los límites de las tres fases y que la curva

corresponderá a cada molde dependiendo de sus propiedades de conducción térmica.

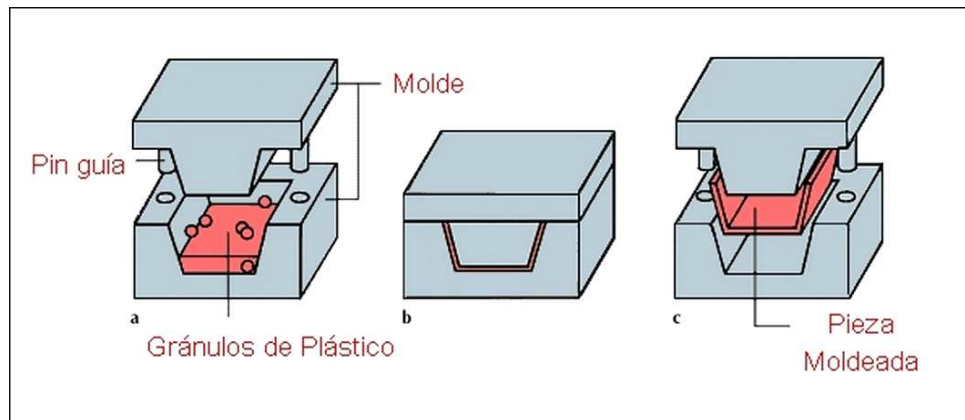


Figura 2.44. Operaciones del moldeo por compresión. a) carga del material, b) moldeo del material bajo condiciones de temperatura y presión dadas, y c) desmolde.

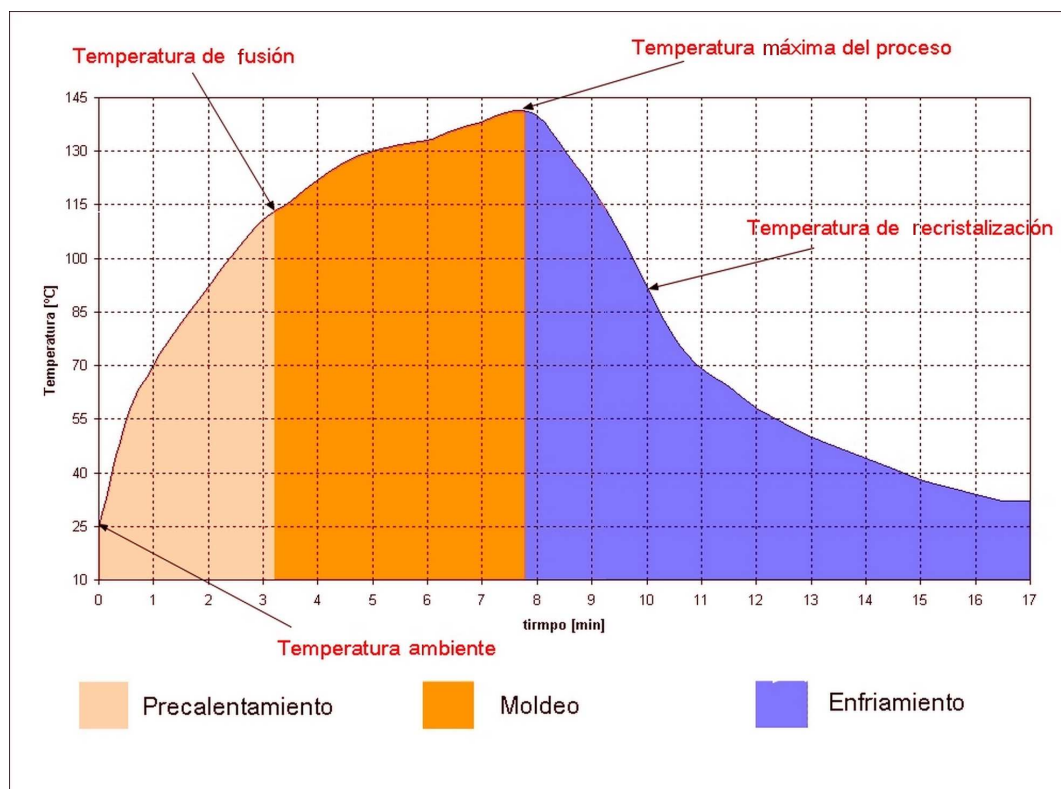


Figura 2.45. Fases del proceso de moldeo por compresión para un molde de acero con una forma determinada donde se procesa polietileno Venelene 2213.

Los parámetros de presión y temperatura aplicados sobre el molde no solo tienen que ver con el valor de la fuerza sobre las tapas del molde o de la temperatura de las placas calefactoras, sino en su variación en el transcurso del tiempo, con

características tipo escalón, sostenida creciente o decreciente en forma de rampa, entre otras.

Dependiendo del tipo de molde, de las herramientas disponibles y de la materia prima, se deberán establecer, por medio de experimentación, los parámetros con los cuales se trabajará en cada una de las fases. Se buscará por sobre todo obtener los mejores resultados con la menor cantidad de energía invertida, con el afán de optimizar el proceso. En esto intervendrá irremediablemente el tiempo que llevará cada fase del procesamiento.

#### **2.4.3.1. Fase de Pre calentamiento del Molde**

Una vez que se ha dispuesto el o los materiales en la cantidad y orientación requerida, se procede a cerrar el molde y se lo ubica en la prensa calefactora, de modo que el calor comience a elevar la temperatura superficial del molde, y se produzca un flujo de calor hacia el interior. En el caso de moldeo por compresión de polímeros, este flujo viajará a través de las tapas del molde para fundir los granzas de material polimérico que se encuentran encapsulados entre las paredes de este recipiente.

Para definir el principio de esta fase se debe tomar en cuenta las condiciones iniciales del proceso de moldeo por compresión, es decir, las condiciones ambientales en las cuales se está elaborando el producto. Estas serán las condiciones de inicio de esta parte en lo que tiene que ver a la temperatura, mientras que la presión sobre el molde cambiará dependiendo de la materia prima, de las características del equipo utilizado y de la naturaleza del proceso mismo.

El pre calentamiento habrá terminado cuando el molde alcance la temperatura de fusión del polímero que se está procesando. De ahí en adelante el material fundirá desde los gránulos que están en contacto directo con las tapas del molde hacia el centro, alcanzándose un estado pastoso del material.

#### **2.4.3.2. Fase de Moldeo**

En esta fase el material comienza a fundirse y de allí la necesidad de una mayor presión que permita mantener la transferencia al resto de material que está pasando a un estado menos viscoso. El tiempo de moldeo debe asegurar que el 100% del material, polimérico en este caso, haya fluido y que esto haya permitido que todos los gránulos y el material de refuerzo se hayan vuelto un solo cuerpo sin imperfecciones internas o en la superficie.

Son frecuentes muestras de falta de presión por ejemplo, el apareamiento de burbujas en el material final. Cuando la temperatura es deficiente se puede observar fácilmente gránulos deformados incrustados en el material continuo.

Esta fase es la que más recursos suele utilizar, no solo para completar el proceso de fusión del material de la matriz, sino para mantener este estado mientras los materiales involucrados reacomodan su posición para dar paso a la pieza final.

#### **2.4.3.3. Fase de Enfriamiento**

Inmediatamente luego de que se ha conseguido moldear el o los materiales dentro del molde, se pasa a la etapa de enfriamiento. Esta puede comenzar cuando al material le falta disminuir algunos grados en su temperatura antes de que comience a solidificarse, puesto que en la fase de moldeo se superó la temperatura de fusión para asegurar que todo el material disminuya su viscosidad y llene todas las cavidades del molde como una masa uniforme que se desplaza.

En el caso de los materiales poliméricos se debe tener en cuenta la temperatura de recristalización del material para asegurar que el patrón cristalino del material de la matriz no ha sufrido cambios que perjudiquen las propiedades mecánicas que se desea obtener. Si se hace un enfriamiento rápido las moléculas del polímero pueden no reacomodarse adecuadamente y se puede presentar el fenómeno de fatiga térmica, creando imperfecciones que mermarán el desempeño del material sometido a sollicitaciones mecánicas.

Se debe garantizar, en efecto, que las propiedades del material no decaigan a causa de un enfriamiento inadecuado, además se debe revisar la conveniencia o no de aplicación de presión en esta parte del proceso. En este punto se deberá seleccionar la prolijidad del control sobre los parámetros de modo que se garantice un desenlace exitoso del moldeo por compresión de una pieza. Todo esto debe ser analizado tomando en cuenta los objetivos de optimización de todo el proceso de manufactura, es decir, sin encarecerlo innecesariamente.

#### **2.4.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN**

El moldeo por compresión ha sido por décadas el método estándar para el procesamiento de termoestables. Siendo reemplazado parcialmente por el moldeo por inyección debido a la posibilidad que éste último ofrece de automatizar el proceso de manufactura. Esta predilección se debe principalmente a que el principio de moldeo por compresión es muy simple: se coloca un material o carga dentro de un molde al cual se le aplica presión y temperatura, y luego de haberse moldeado se expulsa la pieza formada.

Este proceso ofrece una serie de ventajas; por ejemplo, comparado con el moldeo por inyección, el material sufre deformaciones muy pequeñas y no existen regiones concentradoras de esfuerzos. Asimismo, como el molde no tiene barreras para el flujo de las fibras de refuerzo, éstas no son dañadas mientras el material fluye, pudiéndose utilizar en este método ambos tipos de fibras, largas o continuas y cortas.

Otras ventajas del proceso son su relativa facilidad, ciclos de tiempo relativamente rápidos, su reproducción es excelente, altos volúmenes de producción son fácilmente obtenidos, y partes con estrechas tolerancias pueden ser obtenidas. Además, una característica importante para la elaboración de compuestos es que la mezcla de polímeros y fibras antes de la compresión permite un mejor control sobre la química y composición del producto final.

Una de las mayores desventajas radica en la necesidad de desarrollar una larga investigación inicial sobre moldes y presiones. Se debe tomar en cuenta además



que un gran número de factores pueden influenciar en la calidad del producto final. Por ello se requiere de un minucioso procedimiento de afinamiento antes de conocer los parámetros definitivos de procesamiento. Otras desventajas son el almacenamiento de la materia prima, que debe darse bajo ciertas condiciones ambientales y la dificultad de procesamiento con ciertos termoestables que no fluyen fácilmente. Algunos defectos menores pueden ser: esfuerzos residuales pequeños, delaminación, orientación errónea de las fibras.

#### **2.4.5. COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES OBTENIDOS A TRAVÉS DE MOLDEO POR COMPRESIÓN**

Las partes generadas con el moldeo por compresión son usadas generalmente en la industria automotriz, donde los altos volúmenes de producción de piezas con moderada resistencia mecánica, tenacidad mediana, buena resistencia a la corrosión y de bajo peso son muy comunes. Existe una gran variedad de autopartes donde la matriz es generalmente un termoestable y los refuerzos son fibras naturales que dan a los componentes un aspecto rústico, como la llamada “madera plástica”. Estos compuestos aparecen generalmente como paneles de automóviles y cumplen dos funciones principales: una suntuaria por su acabado y detalles, y otra por su excelente absorción de vibraciones. La figura 2.46 muestra algunos de los paneles y partes de un vehículo que pueden fabricarse usando compuestos.

Por ejemplo, el frente del Ford modelo Galaxy y el Volkswagen Sharan están hechos por SMC en matriz polimérica, los baldes de las camionetas se hacen por este mismo proceso pero usan como matriz vinil éster. La primera aplicación estructural en automóviles se dio en 1979, usando fibras de vidrio unidireccionales como refuerzo. En la actualidad incluso algunos elementos de las transmisiones automáticas suelen elaborarse por este método de trabajo de compuestos y polímeros.



Figura 2.46. Paneles hechos a base de compuestos obtenidos con moldeo por compresión.

Existen algunos tipos de compuestos con matriz polimérica reforzados con fibras naturales obtenidos a través de moldeo por compresión. Uno de ellos es el obtenido en el proyecto de titulación de Juan Carlos Páez, un compuesto de base polipropilénica reforzada con fibras de abacá de diferentes tamaños y configuraciones del refuerzo.

## **2.5. ALCANCE Y OBJETIVOS**

### **2.5.1. ALCANCE**

En este proyecto de titulación se estudia la obtención de materiales compuestos formados por una matriz termoplástica de polietileno y refuerzos de fibra de abacá, por medio de la técnica de moldeo por compresión. Se establecen y se optimizan cada uno de los parámetros necesarios así como los procedimientos utilizados para obtener los materiales indicados.

Además, se caracteriza cada uno de los materiales derivados de la variación de algunos parámetros, tales como el tamaño de las fibras y su distribución dentro de la matriz, así como la fracción de las mismas en la masa del compuesto. Se determinan las propiedades mecánicas de cada material, por medio de pruebas estandarizadas de flexión y tracción y dureza, y se determinan características

importantes para el uso del producto terminado, tales como densidad y absorción de agua.

En lo que tiene que ver con la materia prima, el polietileno que se utiliza como matriz es un polietileno 1-buteno lineal de baja densidad grado inyección, con un índice de fluidez (con un peso de 2,16 kg. a 190°C, según ASTM D 1238) de 42  $\frac{9}{10}$  min, denominado comercialmente como PE Venelene 2213. Las fibras de abacá que se usan como refuerzo fueron extraídas de una plantación en Santo Domingo de los Tsáchilas y son de grado tres, continuas, cortadas a 10, 20 y 30 mm de largo, y en un tejido biaxial.

El procedimiento para establecer los parámetros adecuados de procesamiento comienza con la búsqueda de las condiciones de procesabilidad de la matriz, y de su optimización, de modo que se domine la técnica para obtener placas continuas y sin defectos de material polimérico. Una vez que estén plenamente definidas las fases del moldeo por compresión del polietileno en el molde fijado, se determina y optimiza los parámetros de procesamiento de un compuesto con un solo tipo de fibra en una fracción dada. Finalmente, se varía el tamaño de la fibra, su orientación, configuración y fracción másica en la masa total del compuesto. El desempeño de cada material se analiza y compara en términos de sus propiedades mecánicas.

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.

Este estudio intenta abrir el espectro de utilización de las fibras de abacá revelando la gran contribución que éstas pueden dar a un material como el polietileno, que por sus características es muy usado en algunas ramas de la industria. Las ventajas no solo atañan el mejor desempeño mecánico de estos materiales sino que incluyen la posibilidad de disminución de uso de un material no biodegradable como el polietileno reemplazándole por un material natural

como el abacá, tras del cual aparecerían muchas más oportunidades de trabajo en la zona rural ecuatoriana para su cultivo masivo y cosecha.

### **2.5.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

El objetivo general de este trabajo consiste en definir el proceso de moldeo por compresión para obtener compuestos de polietileno reforzado con fibras continuas, cortas y en tejidos biaxiales de abacá para alcanzar su mejor desempeño mecánico bajo condiciones de optimización de los parámetros involucrados.

Los objetivos específicos incluyen:

- Caracterizar física y mecánicamente los materiales base empleados en la elaboración de los materiales compuestos.
- Determinar la procesabilidad del polietileno mediante moldeo por compresión definiendo para esto los parámetros óptimos del proceso, que son: temperatura, tiempo y presión durante el precalentamiento, el moldeo y el enfriamiento.
- Determinar los parámetros óptimos de procesamiento mediante moldeo por compresión de paneles formados por polietileno y una fracción másica fija de fibras de abacá de un tamaño dado y con una configuración y orientación preestablecidas.
- Estudiar los efectos de variación de la longitud, la fracción másica, la orientación y la configuración de las fibras sobre las propiedades mecánicas de diferentes compuestos.
- Caracterizar cada uno de los materiales obtenidos mecánica y físicamente.
- Comparar los compuestos obtenidos y presentar los mejores resultados correspondientes a cada tipo de material.

## **CAPITULO 3**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

Una vez que se ha descrito las características de los materiales compuestos, del moldeo por compresión, del polietileno como matriz termoplástica y de las fibras de abacá como refuerzos, en este capítulo se cubre lo referente al tratamiento de los materiales y a los métodos utilizados para cumplir los objetivos propuestos en el capítulo 2. Se parte de las materias primas, sus características originales y preparación para el procesamiento, y se concluye con los pasos necesarios para el desarrollo del material compuesto, su posterior caracterización y análisis. Todo el diseño experimental del proceso de manufactura se detalla a continuación, mientras que de los resultados de la aplicación del mismo se ocupará el capítulo posterior.

#### **3.1. TÉCNICAS, EQUIPOS E INSUMOS UTILIZADOS**

Para comenzar el proceso de elaboración de compuestos se debe limitar las opciones en cuanto a técnicas, equipos e insumos utilizados. De la literatura revisada y de los objetivos del estudio se toman los criterios básicos para la selección de materia prima y el equipamiento. Sin embargo, se debe mencionar que la adaptación de ciertas máquinas es ineludible, más aún cuando generalmente no se dispone de dispositivos exclusivos para el manejo y procesamiento de compuestos. Como se indicó anteriormente, la mayor parte de equipos utilizados para la obtención de CMP son los mismos usados para procesar plásticos, con ciertas modificaciones.

##### **3.1.1. TÉCNICAS UTILIZADAS**

El método escogido para la obtención del compuesto es el moldeo por compresión manual, llevado a cabo por medio de una prensa dotada de placas calefactoras. La materia prima se ubica dentro de un molde metálico cerrado del

tipo hembra-macho. El molde y los instrumentos utilizados sirven para desarrollar materiales compuestos dentro del ámbito experimental y no para producción masiva del mismo. Si se quisiera automatizar la producción se debería contar con equipos que permitan un flujo continuo de material, así como un ciclo de desmolde corto.

Debido a que este estudio busca obtener resultados experimentales del proceso de obtención del compuesto, no será necesario llegar a obtener tiempos cortos entre pieza y pieza. Es más bien necesario definir los parámetros óptimos para la obtención de una sola pieza, tal que esta sea repetible y con los mejores desempeños mecánicos en cada configuración.

La materia prima está conformada de dos componentes principales: uno es un polietileno de baja densidad que constituye el material de la matriz, y los refuerzos están conformados por fibras de abacá, dispuestas en diferentes configuraciones, tamaños y fracciones volumétricas. El método que se desarrolla en este estudio encara, en primera instancia, la procesabilidad de la matriz con el molde y los equipos predeterminados. Luego de que se ha definido los parámetros requeridos para el procesamiento de la matriz se procede a trabajar con los compuestos. Finalmente se caracteriza los nuevos materiales obtenidos.

El determinar las características de procesamiento de la matriz es el pilar para las operaciones subsiguientes puesto que se parte de estas características para incorporar al material moldeado las fibras de abacá. En este trabajo se formulan compuestos que incorporan diferentes fracciones volumétricas de fibras cortas de 10, 20 y 30 mm de largo dispuestas al azar, así como fibras continuas unidireccionales y como fibras entrelazadas en tejidos bidimensionales. Para definir los parámetros adecuados de procesamiento del compuesto se parte de una composición y tipo de fibra fijas, y se optimiza el proceso. Finalmente se elaboran materiales con temperatura y aplicación de presión optimizadas, variando la configuración, tamaño y fracción de los refuerzos y se dirime entre las opciones ensayadas para saber cuál de todas es la que da como resultado las mejores propiedades mecánicas. Los resultados obtenidos en los ensayos

mecánicos también se comparan con los que predice la ley de mezclas descrita en el apartado 2.3.2.

Como se puede ver en la tabla 3.1, la mayor parte de los ensayos realizados sobre los materiales corresponden a los descritos en las normas ASTM, tanto para la determinación de propiedades mecánicas como para la determinación de las propiedades físico-químicas, cuando éstas son requeridas, mientras que otros ensayos han sido adaptados para trabajar con compuestos.

Tabla 3.1. Normas y procedimientos usados en este estudio.

<b>OBJETO A DETERMINAR CON EL ENSAYO</b>	<b>ELEMENTO SOMETIDO A ENSAYO</b>	<b>NORMA / PROCEDIMIENTO</b>	<b>DENOMINACIÓN DE LA NORMA / ENSAYO</b>
Comportamiento a la tracción	Polietileno y materiales compuestos	ASTM D - 638 [2003]	Método de ensayos estandarizados para propiedades a tracción de plásticos
Comportamiento a la flexión	Polietileno y materiales compuestos	ASTM D - 5943 [1996]	Método de ensayos estandarizados para determinación de propiedades a la flexión de plásticos
Comportamiento a la tracción	Fibras de abacá	ASTM D - 3822 [1996]	Método de ensayos estandarizados para propiedades a tracción de fibras textiles
Temperatura de fusión	Polietileno	Procedimiento interno del CIAP	Calorimetría diferencial de barrido
Temperatura de secado	Fibras de abacá	Procedimiento interno del CIAP	Termogravimetría
Índice de fulidez	Polietileno	Procedimiento interno del CIAP	Ensayo para la determinación del MFI
Absorción de Agua	Polietileno y materiales compuestos	ASAE Paper Number: MB04-305	Método de ensayos estandarizados para propiedades a tracción de plásticos
Determinación de la densidad	Materiales compuestos	ASTM D - 792 [1991]	Método de ensayos estandarizados para propiedades a tracción de plásticos
Determinación de la dureza	Polietileno y materiales compuestos	ASTM D - 2240	Método de ensayos estandarizados para propiedades a tracción de plásticos

En la figura 3.1 se muestra un diagrama de flujo, en el que se puede distinguir, de manera condensada, los pasos que se siguieron para fabricar los materiales compuestos propuestos en este trabajo.

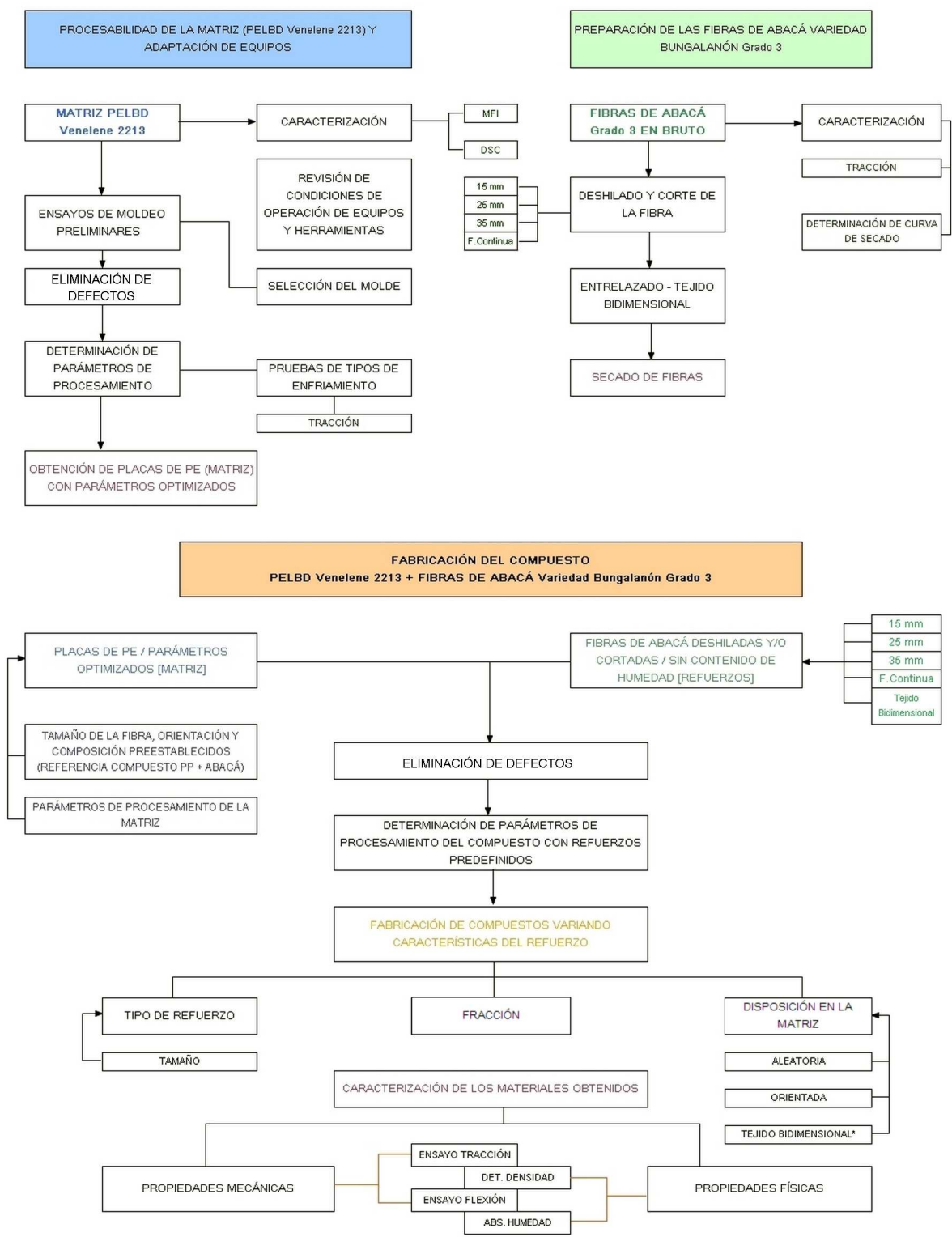


Figura 3.1. Diagrama de flujo del diseño experimental para la obtención del compuesto.



### 3.1.2. EQUIPOS E INSUMOS

De entre los equipos que se utilizaron en esta investigación, se diferencian dos tipos de acuerdo con su uso: (1) para el procesamiento y herramientas, que sirven para transformar la materia prima; y (2) para ensayar los materiales, que sirven para cuantificar ciertas características y propiedades de los materiales.

Los equipos y herramientas de procesamiento incluyen el molde metálico, una prensa calefactora (ver esquema en figura 3.2), una estufa para el secado de la fibra, las herramientas de desmolde, entre otras. Mientras tanto, los que sirven para determinar propiedades son: una máquina universal de ensayos, un medidor de espesores y una troqueladora con matrices adecuadas para extraer probetas normalizadas. En la tabla 3.2 se detallan las características de los equipos que se usaron para desarrollar este estudio, mientras que en el mosaico de la figura 3.3 se puede observarlos.

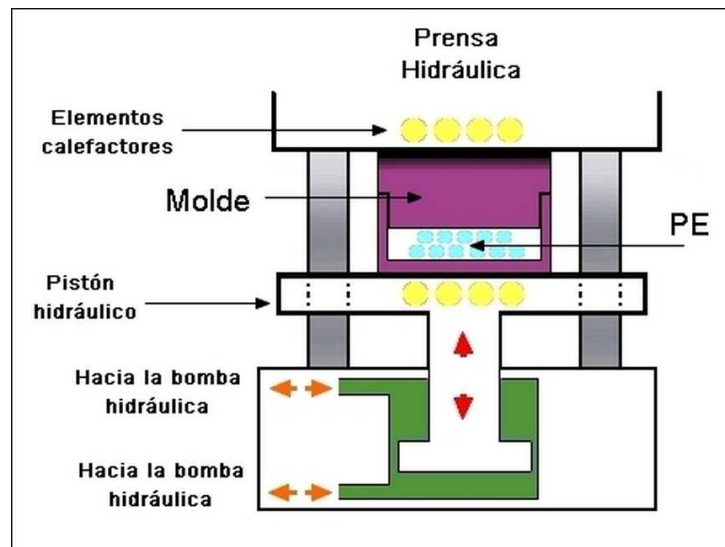


Figura 3.2. Elementos principales de una prensa calefactora y su función en el moldeo por compresión.

Tabla 3.2. Equipos utilizados en el desarrollo experimental.

DESCRIPCIÓN	MARCA/TIPO	CAPACIDAD APRECIACIÓN	FINALIDAD DE USO EN EL ESTUDIO
Máquina universal de ensayos	Instron modelo 1011	5 kN	Determinación de propiedades mecánicas a la tracción y flexión en tres puntos de las placas de PE y compuestos
Máquina de universal de ensayos	Lloyd	5kN	Determinación de propiedades mecánicas a la tracción de las fibras de abacá
Programa computacional / Control Instron	Series IX Automated Materials Testing System V.5.25	-	Control computarizado y registro de datos de la máquina de ensayos universales Instron
Medidor de espesores	Mitutoyo modelo IDF - 112	1/1000 mm	Determinación de propiedades mecánicas a la tracción y flexión de las placas metálicas
Probador del Índice de fluidez	Melt Flow Tester modelo 6942 Ceast	-	Determinación del índice de fluidez del PE utilizado
Calorímetro	Shimadzu DSC-50	600°C	Se realiza un DSC del PE y también un TGV de las fibras de abacá
Máquina para análisis termogravimétricos	Shimadzu TGA-50	-	Se realiza un análisis termogravimétrico (TGA) de la fibra para determinar la curva de secado.
Computador para análisis térmicos	Shimadzu TA-50 WS1	Funciona conectado a los equipos TGA-50 y DSC-50	Se procesan los datos obtenidos de la calorimetría diferencial de barrido y del análisis termogravimétrico
Durómetro Shore D	Bareiss escala analógica 0-100 punta acero d=1,4mm cono 30°	Escala Shore	Determinación de la dureza de los compuestos obtenidos

Prensa calefactora	Carver Laboratory modelo 2112	0 – 24000 lbf 400°C máx en las planchas	Elaboración de placas de PE y de materiales compuestos por medio de la técnica de moldeo por compresión.
Conjunto de determinación de densidades	Mettler Toledo	-	Determinación de la densidad de los compuestos obtenidos
Balanza analítica	Denver Instrument, modelo AA-200	0.0001 g	Medición de masas de materiales
Balanza analítica	Mettler Toledo modelo PG5002-S	apreciación 0.01g carga máxima 5100 g	Medición de masa de materiales
Estufa	MMM Venticell 55 con circulación de aire y control automático	250°C	Secado de fibras
Máquina de baño térmico	Haake modelo G 000-5744 bomba modelo D1 001-3950	(-15°C a 105°C) caudal = 14.6 ml/s	Control de temperatura y caudal del agua para el enfriamiento del molde
Molde cerrado tipo hembra - macho	Material acero	-	Formación de placas y compuestos mediante la aplicación de calor y presión
Molde de preparación de mezcla	Material madera	-	Mezcla de placas y fibras anterior a la ubicación en el molde metálico

En lo que se refiere a insumos, el uso de sustancias lubricantes para facilitar el desmolde de las placas de polietileno de las paredes y tapas del molde metálico fue probado mas su resultado fue negativo. El problema se presentó cuando el PE que se había escogido para el estudio (grado compresión), al fundirse, se soldaba con gran fuerza y no se la podía retirar de la cavidad del molde. Al incluir en el proceso ácido esteárico y aceite de vaselina se comprobó que estos materiales se estaban incorporando al PE, incorporando materiales indeseables en el proceso.



Figura 3.3. Equipos utilizados en el desarrollo del proyecto.

Después de muchas pruebas desalentadoras, la solución llegó cuando se intentó utilizar otro polietileno que resultó tener un MFI bastante alto. Las pruebas

subsiguientes mostraron una reducción drástica, bajo parámetros de moldeo semejantes, de la adhesión que se formaba ente el primer PE y el molde. El material de la matriz escogido fue finalmente el polietileno Venelene 2213, grado inyección.

## **3.2. MATERIA PRIMA**

### **3.2.1. REFUERZO DE FIBRA DE ABACÁ VARIEDAD BUNGALANÓN**

El material que se usó como refuerzo es la fibra de abacá de variedad bungalanón del grado tres, el mismo que perteneció a un solo grupo de fibras y reposó en una misma bodega de almacenamiento luego de ser extraído de la planta. A pesar del control sobre el origen de la fibra, por el mismo hecho de ser una fibra vegetal, el abacá utilizado presenta grandes variaciones en sus propiedades, sobre todo en los ensayos de tracción ejecutados sobre ellas cuyos resultados constan en el anexo 5 y la tabla 4.1 que resume todos los datos de los ensayos.

Una propiedad importante para evaluar es la densidad de las fibras. Su valor se toma de la caracterización de la fibra utilizada efectuada dentro del proyecto de titulación: “Estudio del efecto de un tratamiento alcalino sobre la fibra de abacá variedad bungalanón” llevado a cabo por Deisy Trávez. En este proyecto se determinó un valor aproximado de  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , el mismo que es coherente con los valores de densidad que deben tener teóricamente las fibras celulósicas (1.2.2.1).

En la tabla 3.3 se hace un compendio de algunas propiedades registradas en los estudios de Deysi Trávez y Manuel Nieto. Es importante señalar que, en lo que se refiere a fibras textiles, se utiliza para su caracterización algunas unidades específicas debido a que algunas de sus dimensiones son sumamente pequeñas o grandes para medirse y representarse convencionalmente. Una de estas unidades es el DENIER, que no es más que el peso expresado en gramos de 9000 metros de hilo de una fibra. La relación entre el peso y la longitud de un filamento o hilo constituye la base que se usa para determinar el número o título del mismo. Este parámetro da una idea del grosor del hilo y existen dos sistemas

en uso para lograr este propósito: el de numeración basándose en el peso o sistema directo (título) o el que se basa en la longitud (número). [INTERNET 17]

El título del hilo queda determinado por el peso de una longitud del mismo. Así, un TEX expresa número de unidades de peso contenidas en 1000 metros de hilo. Mientras tanto, el número métrico corresponde al sistema más antiguo, y expresa la cantidad de madejas de mil metros que pesan 1 kg de fibra. [INTERNET 4]

Otro parámetro importante es el contenido de agua. El interés radica en lo negativa que se torna la presencia de humedad dentro de los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales. Entre los principales daños que ocasiona la humedad en las fibras se puede enumerar el cambio dimensional por el ensanchamiento, la pérdida de la adhesión en la intercara fibra/matriz, y la descomposición acelerada de las fibras.

Tomando como referencia el estudio de Juan Carlos Páez, se espera que el contenido de agua al momento de utilizar la fibra esté alrededor de un 10% de la masa total, aunque se debe tomar en cuenta que la fibra una vez extraída ya ha pasado por varios procesos que le han hecho perder bastante humedad. En la tabla 3.4 se puede observar un resumen de algunos estudios que registran el contenido de agua del abacá y otras fibras vegetales conocidas, así como la composición química estimada de cada una.

Tabla 3.3. Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de abacá variedad bungalanón  
[TRÁVEZ, D; NIETO, M.]

FINURA	[DENIER]	<b>38</b>
DENSIDAD	[g/cm <sup>3</sup> ]	<b>1,3</b>
RESISTENCIA ÚLTIMA A LA TRACIÓ	[Mpa]	<b>774,7 - 1261,3</b>
ELONGACIÓN ANTES DE LA RUPTURA	[%]	<b>2 - 3</b>
TENACIDAD	[g/DENIER]	<b>3 - 4</b>
HABILIDAD PARA ABSORVER TRABAJO ("TOUGHNESS INDEX")	[g/decITEX]	<b>0,07</b>
ABSORCIÓN DE AGUA	[%]	<b>8 - 10,0</b>

Tabla 3.4. Composición de algunas fibras vegetales. [MONTHANTY, CADENA, LÓPEZ].

<b>Fibra / Componente</b>	<b>Celulosa</b>	<b>Hemicelulosa</b>	<b>Pectina</b>	<b>Lignina</b>	<b>Humedad</b>
Lino	71,2	18,6 - 20,6	2,3	2,2	8,0-12,0
Cáñamo	70 - 74,9	17,9 - 22,4	0,9	3,7 - 5,7	6,2 - 12,0
Yute	61 - 71,5	13,6 - 20,4	0,2	8,1 - 13	12,5 - 13,7
Kenaf	45 - 57	21,5	3,0-5,0	7,0-13,0	-
Ramio	68,6 - 76,2	13,1 - 16,7	1,9	0,6 - 0,7	7,5 - 17,0
Henequén	77,6	4,0-7,0	-	13,1	-
<b>Abacá</b>	<b>63 - 70,1</b>	<b>20 - 21,8</b>	<b>0,6 - 1</b>	<b>5,7 - 6</b>	<b>5,0-12,0</b>
Sisal	67 - 78	12,0-14,0	10	7,0-14,0	12,0-22,0
Algodón	82,7 - 92,9	2,6 - 5,7	2,6	-	7,85 - 8,5
Bambú	35 - 60,8	15	-	27 - 32,2	-
Coco	32 - 43	0,15 - 0,25	3,0-4,0	40 - 45,0	8
Banana	63 - 64	10	-	5	10,0-12,0

Como se indicó anteriormente, las fibras vegetales no son uniformes, más bien son bastante heterogéneas en la mayor parte de sus características. Las



propiedades mecánicas de las fibras varían teóricamente dependiendo, como se indicó en 2.3.1, del diámetro de la fibra que se esté ensayando, y éste a su vez varía según el largo de la fibra como se puede ver en la figura 3.4. Sin embargo, las imperfecciones y variaciones en la estructura y formación de cada unidad disminuyen la posibilidad de que los análisis teóricos se asemejen a los resultados reales. En la tesis de grado de Morejón y Narváez se indica que el diámetro de las fibras de abacá varía entre 151,4 y 284  $\mu\text{m}$  entre las calidades 2, 3, 4 y 5. Será necesario por lo tanto verificar los valores de resistencia a la tracción del grupo de fibras que se está utilizando para poder determinar la eficacia de su utilización como refuerzo.

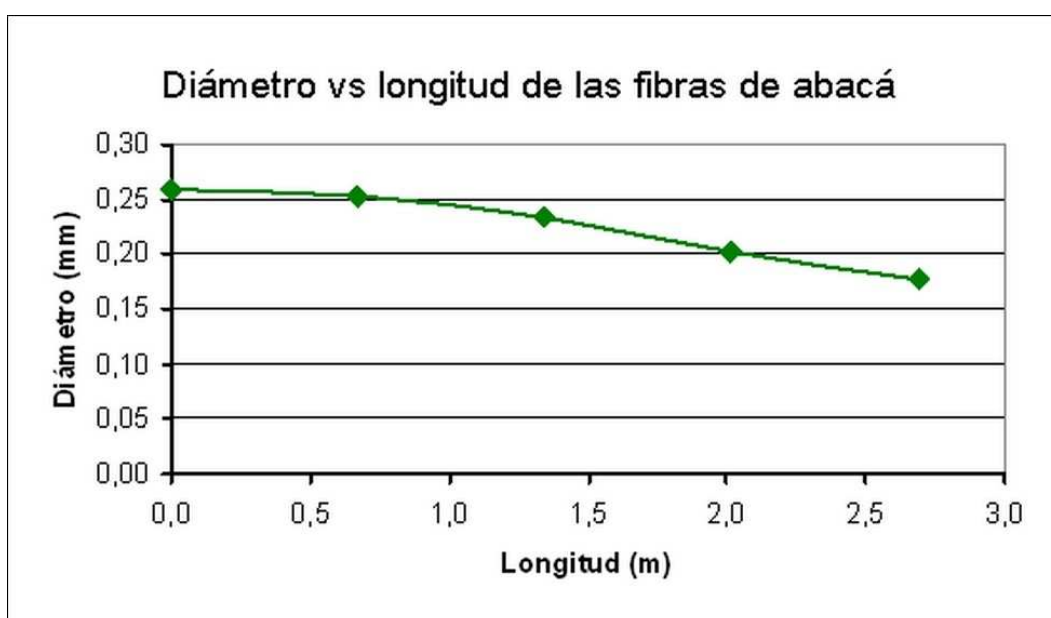


Figura 3.4. Variación del diámetro de la fibra con respecto a la longitud de la fibra.  
[MOREJÓN, NARVÁEZ]

### 3.2.2. MATRIZ / POLIETILENO 1-BUTENO VENELENE 2213

Debido a que el proceso de manufactura es de moldeo por compresión, era lógico pensar que el polímero que se iba a usar como matriz debía ser grado compresión (es decir con valores de MFI entre 3 y 5 g/10 min). Sin embargo, cuando este polímero fundía, la placa resultante quedaba atrapada en la rugosidad del molde formando un anclaje mecánico que volvía inseparables



ambas partes. A pesar de que se intentó atenuar este problema usando desmoldantes, disminuyendo la rugosidad del molde, reduciendo al mínimo las temperaturas de procesamiento e incluso reduciendo los tiempos de procesamiento utilizando un molde de aluminio como parte de un estudio preliminar, ninguna de estas alternativas lo solucionó.

Finalmente se viabilizó el proyecto utilizando otro polietileno con características diferentes, haciendo algunas pruebas de procesabilidad sin reparar en su alto índice de fluidez u otras propiedades disímiles a las del primer material. La elección demostró ser conveniente pues con los mismos rangos de temperatura de trabajo y molde de acero original, y sin la ayuda de desmoldantes se pudo solucionar este inconveniente. Previa revisión de los objetivos del proyecto se decidió adoptar este material para continuar con el estudio.

El nuevo material de la matriz, como se indicó en el acápite 3.1.2, el PELBD Venelene 2213, es un PE de grado inyección, obtenido seguramente a través de un proceso de reología controlada que le permite alcanzar un índice de fluidez (MFI) de 42 g/10 min muy superior al que tienen comúnmente los plásticos como el polietileno (entre 1 y 20 g/10 min). Este índice le permite fluir con mayor facilidad que el de menor índice de fluidez al alcanzar casi la misma temperatura, pues la temperatura de fusión es similar para todos los polietilenos. El resto de sus características son bastante similares no solo al del polietileno originalmente usado sino para la gran parte de polietilenos de baja densidad.

El PE Venelene 2213 es un polietileno lineal de baja densidad 1-buteno que se puede definir como un copolímero de etileno/1-buteno que tiene una estructura molecular lineal (ver figura 3.5). El comonomero usado en la obtención de este polietileno en particular es el 1-buteno, que es uno de los más populares tal como son el 1-hexeno y el 1-octeno. Las moléculas del polímero están dispuestas formando largas cadenas lineales con ramificaciones laterales cortas, cuya longitud y disposición están controladas en buena medida por el 1-buteno. Se presume que este polímero contiene además un aditivo que permite que las cadenas poliméricas se desplacen con mayor facilidad entre sí y así sea mayor la fluidez de este material. Las pequeñas ramificaciones de 1-buteno representan

una leve dificultad, con respecto a la que representan las de un PE ramificado de baja densidad, para el movimiento relativo entre cadenas en el momento en el cual el material fluye debido al aumento de temperatura.

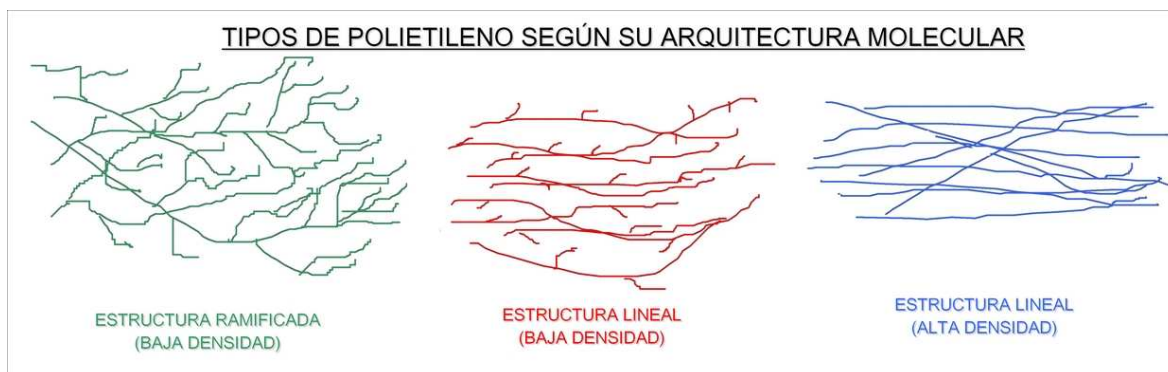


Figura 3.5. Clasificación de los polímeros de acuerdo a su estructura

A pesar de contar con muchas de las propiedades del PE tomadas de la información entregada por el fabricante (ver tabla 3.5), es importante verificar las propiedades mecánicas de las placas procesadas de PE, puesto que el mismo productor señala que no se pueden tomar estos valores como especificaciones sino como valores típicos promedio.

Tabla 3.5. Propiedades físicas y mecánicas del polietileno 1-buteno de baja densidad Venelene 2213.

ÍNDICE DE FLUIDEZ @190°C - 2,16 kg	según ASTM D-1238	[g/10min]	<b>42</b>
DENSIDAD	según ASTM D-792	[g/cm <sup>3</sup> ]	<b>0,926</b>
MÓDULO EN FLEXIÓN	según ASTM D-790	[MPa]	<b>220</b>
ESFUERZO EN FLEXIÓN AL 5% DE DEFORMACIÓN	según ASTM D-790	[MPa]	<b>8</b>
ESFUERZO DE FLUENCIA EN TRACCIÓN	según ASTM D-638	[MPa]	<b>10</b>
DEFORMACIÓN EN FLUENCIA	según ASTM D-638	[%]	<b>23</b>

ESFUERZO DE RUPTURA EN TRACCIÓN	según ASTM D-638	[MPa]	<b>12</b>
DEFORMACIÓN A LA RUPTURA EN TRACCIÓN	según ASTM D-638	[%]	<b>&gt;500</b>
RESISTENCIA AL IMPACTO GARDNER	según ASTM D-5420	[KJ/m]	<b>5</b>
TEMPERATURA DE REBLANDECIMIENTO VICAT	según ASTM D-1525	[°C]	<b>100</b>
RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO EN MEDIOS TENSOACTIVOS	según ASTM D-1693	[horas]	<b>1</b>

### 3.2.3. PROPIEDADES DE MATRIZ Y REFUERZOS

Algunas de las características y propiedades de los materiales usados para la matriz y los refuerzos que son muy importantes para el estudio de composición y obtención de un nuevo material no se pueden obtener de tablas u hojas técnicas. En la tabla 3.6 se describen las operaciones utilizadas para determinar las características que van a influenciar los parámetros del proceso de obtención del compuesto. Adicionalmente se señala las normas y procedimientos en base a los cuales se llevaron a cabo estos ensayos.

Tabla 3.6. Tipos de ensayo realizados sobre la materia prima.

ELEMENTO	PRESENTACIÓN	ENSAYO A REALIZAR	NORMA / PROCEDIMIENTO
MATRIZ / PE Venelene 2213	Granzas (sin procesar)	Índice de fluidez MFI	ASTM D - 1238 [1995]
MATRIZ / PE Venelene 2213	Granzas (sin procesar)	Temperatura de fusión	Calorimetría diferencial de barrido
MATRIZ / PE Venelene 2213	Probetas de tamaño según norma	Comportamiento a la tracción	ASTM D - 638 [2003]

MATRIZ / PE Venelene 2213	Probetas de tamaño según norma	Comportamiento a la flexión	ASTM D - 5943 [1996]
MATRIZ / PE Venelene 2213	Probetas de tamaño según norma	Determinación de la dureza	ASTM D - 2240
REFUERZO / Fibras de abacá	Segmento de fibra	Determinación de curva de secado	Termogravimetría
REFUERZO / Fibras de abacá	probetas de tamaño según norma	Comportamiento a la tracción	ASTM D - 3822 [1996]

### 3.3. OPERACIONES SOBRE LA MATERIA PRIMA

Una vez definida la materia prima y establecido el preámbulo teórico del proceso de fabricación de los compuestos propuestos, se procede a puntualizar las etapas de este proceso en base al esquema indicado en la figura 3.1. Se explica y especifica a continuación la aplicación de las técnicas y los subproductos generados en el camino hacia la obtención de los materiales finales.

#### 3.3.1. PROCESAMIENTO DE FIBRAS

Las fibras usadas en este estudio fueron proporcionadas por el Centro Textil de la Escuela Politécnica Nacional y fueron obtenidas de una sola plantación en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. Además del proceso de obtención realizado en la finca de origen, las fibras fueron almacenadas en forma de bultos en el Centro, sin ser tratadas o procesadas hasta ese punto.

##### 3.3.1.1. PREPARACIÓN, CORTE Y ENTRELAZADO DE FIBRAS

La fibra se encuentra en bultos que facilitan su manejo; sin embargo, para el uso que se da en este trabajo es necesario prepararla de modo que se ajuste su forma y tamaño a los requerimientos de cada compuesto. En la figura 3.6 se describe las diferentes características que se le dará a las fibras antes de insertarlas en los moldes para formar los compuestos. El proceso de deshilado y

corte es totalmente manual, mientras que el tejido, bastante difícil por la poca flexibilidad de las fibras, se realiza con la ayuda de un telar que se puede observar en la figura 3.7.

La cantidad de fibra usada depende de la composición de cada compuesto. Las composiciones ensayadas incluyen principalmente el 15, 25 y 35% en masa de fibra con respecto a la masa total del material final. Sin embargo, se intenta obtener compuestos con la mayor cantidad de fibra de abacá que sea posible, garantizando que la fibra se halle totalmente cubierta por la matriz. De este modo se logrará disminuir el uso de polietileno y por lo tanto se reducirá el costo del compuesto resultante.

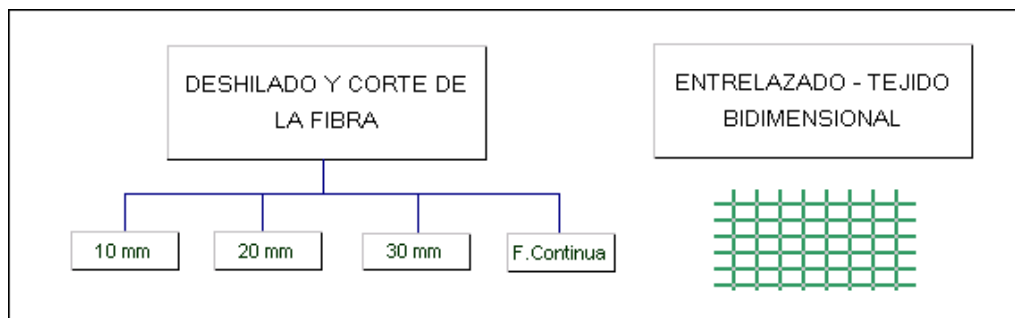


Figura 3.6. Presentación de la fibra de abacá ensayada como refuerzo.



Figura 3.7. Telar usado para obtener la fibra entrelazada en dos dimensiones.

### 3.3.1.2. Disminución de la cantidad de agua y secado

Las fibras vegetales tienen, de forma connatural, un contenido de humedad como se muestra en la tabla 3.4, esto debido a su origen y condición primitiva. Para la utilización de fibras de abacá como refuerzos en CMP es necesario disminuir su humedad. Este proceso se puede llevar a cabo llevando a las fibras a temperaturas que produzcan ebullición de esta agua, mas existe un limitante categórico que es la degradación de la fibra.

Todo tratamiento de secado debe evitar que la fibra llegue a condiciones de degradación. Para determinar técnicamente las condiciones adecuadas para este procedimiento se llevó a cabo un ensayo de análisis termogravimétrico sin atmósfera de arrastre; es decir, con aire ambiental como medio circundante a una muestra de abacá. Esta prueba consiste en llevar, por medio del equipo TGA – 50, una muestra del material analizado desde la temperatura ambiental hasta una temperatura predefinida y mantenerla por un tiempo especificado. Mientras esto acontece, el equipo lleva un control sobre la masa de la probeta ensayada registrando cualquier disminución en esta que significa la degradación de un elemento dado. En este caso, la primera disminución de masa que se registrará se debe a la pérdida de agua que se dará aproximadamente a la temperatura de su ebullición.

Este análisis termogravimétrico se realiza generalmente con una atmósfera de protección de nitrógeno u oxígeno, para controlar así la degradación de los componentes de la muestra a ciertas temperaturas. La prueba sin atmósfera de arrastre se constituye como un paso válido para la obtención de la curva de secado, ya que está condiciones serán base para disminuir el contenido de agua en la fibra posteriormente.

Una vez que se ha obtenido la menor temperatura a la cual la fibra pierde su contenido de agua en un tiempo corto, es decir las condiciones óptimas de secado dentro de una estufa, se procede a realizar este secado en la estufa. Las fibras secas (figura 3.8) no deben ser expuestas al medio exterior sino que deben

empacarse o almacenarse en medios secos, de modo que no tomen el agua de la atmósfera y vuelvan inútil el intento de secarlas.

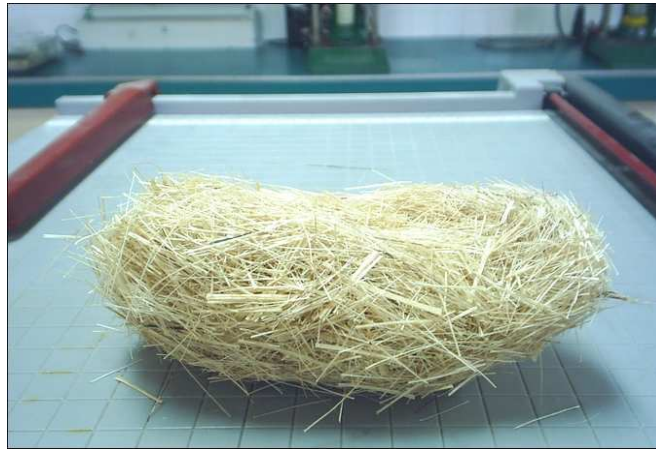


Figura 3.8. Fibra cortada y seca, preparada para ser incorporada en el compuesto.

### 3.3.2. PROCESAMIENTO DE LA MATRIZ

Los polímeros son comúnmente procesados en primer lugar para obtener la configuración en la cual son comercializados. Sea en forma de pellets, hojuelas u otras, se debe haber trabajado sobre el material en su forma original para que éste adopte su nueva forma. La “historia térmica” del polietileno a utilizar sirve para identificar los procesos a los que fue sometido por el fabricante para poder comercializarlo, antes de llegar a manos del consumidor final.

Esta historia se puede leer en un termograma que se obtiene a través de una calorimetría diferencial de barrido o DSC que se corre sobre una muestra de PE, en el caso de este estudio con el equipo Shimadzu DSC-50. A continuación se corre un segundo barrido, luego de borrar la historia térmica del producto, que indica el comportamiento del PE en condiciones naturales, es decir como si fuera un material virgen propiamente dicho. En esta prueba se parte de un material en estado primitivo, y se puede apreciar luego del ensayo muchas características termodinámicas que se deben conocer antes de iniciar las pruebas preliminares. En el Anexo 2 se puede observar el termograma original resultante del ensayo realizado en el equipo antes mencionado.

En la figura 3.9 se puede observar un termograma típico de un termoplástico sometido a un ensayo de calorimetría diferencial. El termograma generalmente está caracterizado por un pico de absorción de calor por parte de la muestra, correspondiente a un proceso o transición térmicamente inducida, por lo que, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, corresponde a un proceso endotérmico. Esta reacción indica el cambio de calor sensible a calor latente; es decir, indica un cambio de fase. Se puede distinguir en este cambio con respecto a la línea base, la temperatura a la cual las primeras lamelas de las esferulitas de PE inician su fusión ( $T_b$ ), la temperatura extrapolada de inicio de fusión ( $T_{eb}$ ), y la temperatura de fusión propiamente dicha ( $T_m$ ) dada por el pico. Algunos autores opinan al respecto que en el pico máximo se han fundido la mayor parte de lamelas, y que hasta que la curva vuelva de nuevo a la posición de la línea base se siguen fundiendo el resto de lamelas de un tamaño mayor; sin embargo, otros atribuyen esta forma de la curva a un error de instrumentos.

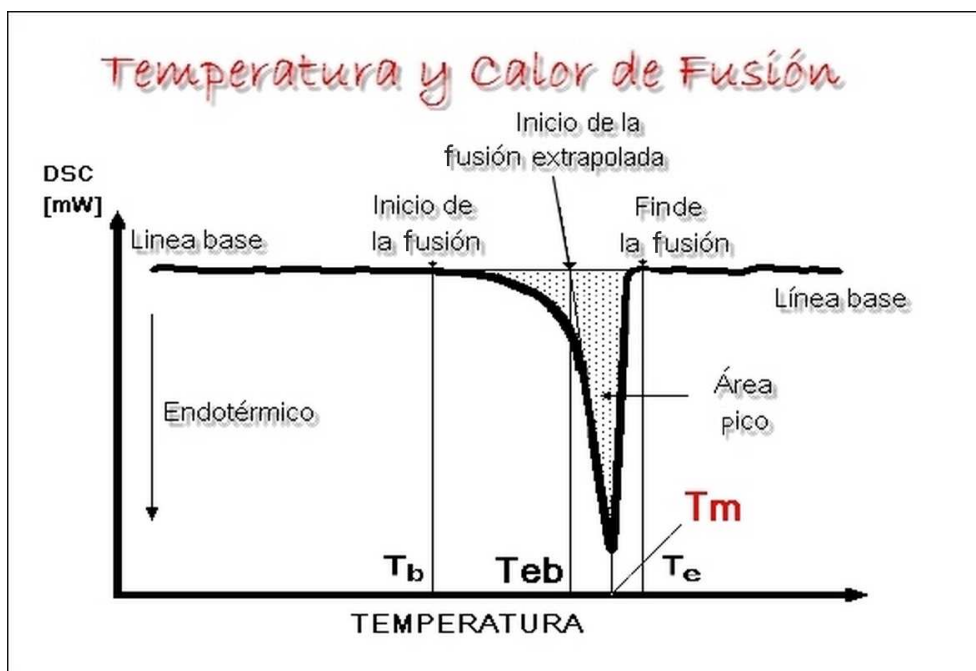


Figura 3.9. Termograma típico de un DSC de un termoplástico. [WUNDERLICH]

De este experimento se puede obtener además la temperatura a la cual se ha terminado completamente la fusión, los cambios de entalpía y, en algunos casos, la variación de capacidad calorífica o calor específico. Por medio de estos datos se puede determinar la temperatura a la que deben llegar las placas calefactoras



de modo que el material se funda para formar las placas de polímero, producto preliminar para la formulación del compuesto.

Debido a que el índice de fluidez del polietileno utilizado será un indicador válido para calificar la fluencia del material fundido, se comprobó el valor entregado por el fabricante por medio de un ensayo de índice de fluidez (MFI) realizado en el equipo Melt Flow Tester 6942 Ceast, de acuerdo con la norma correspondiente. De esta manera se cumple con la caracterización del PE, parte importante del proceso de obtención de placas con parámetros de producción optimizados para ser incorporados como matriz.

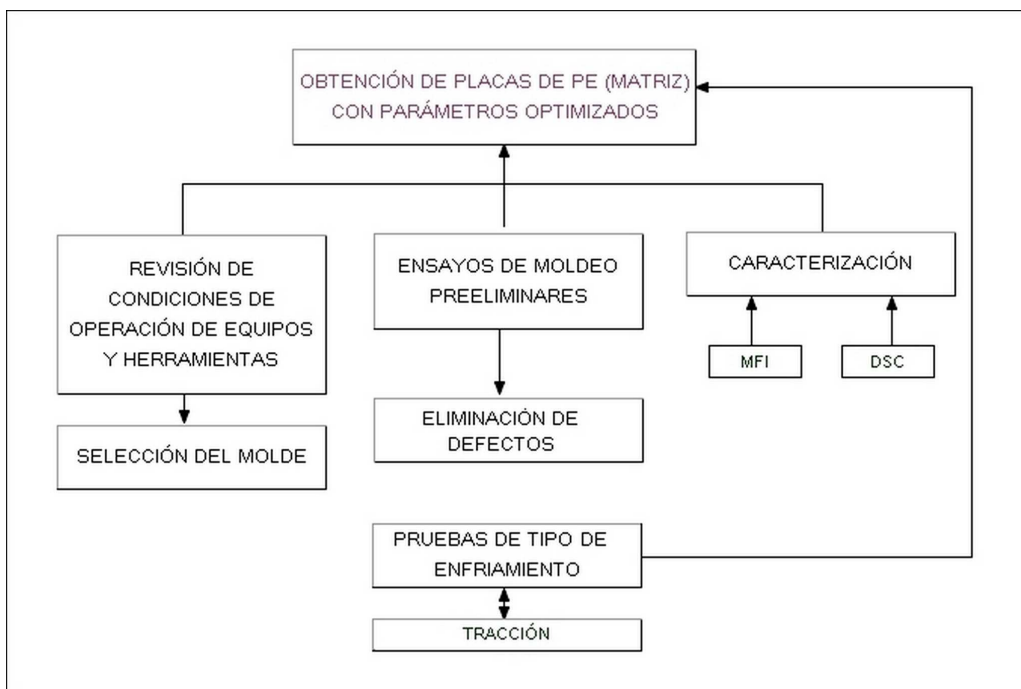


Figura 3.10. Proceso de obtención de placas.

El polietileno en bruto, en forma de granzas o pellets, se procesó en dos tipos de molde cuya efectividad sería evaluada. La figura 3.10 presenta un diagrama que indica el proceso seguido en la obtención de placas de PE y la optimización de los parámetros de procesamiento correspondientes. En este estudio se probó moldes conformados de diferentes materiales, uno de aluminio y otro de acero, que es el que finalmente se seleccionó para el moldeo.

El molde de aluminio permitía alcanzar las temperaturas de fusión en menor tiempo debido a su mejor conducción térmica. Sin embargo, el anclaje mecánico que se formaba con las placas ocasionaba mayores problemas de desmoldeo.

El molde de acero escogido se indica en la figura 3.11, mientras que sus dimensiones están descritas en el plano presentado en el anexo 8. Se debe notar que la tapa del molde tiene un espesor bastante mayor que la de la base del mismo. Esta diferencia causará que el flujo de calor sea mayor en la base que en la tapa superior. Por lo tanto, para que el incremento de temperatura sea uniforme sobre el polietileno se debe programar mayor temperatura en la placa calefactora superior que en la inferior con respecto al molde.



Figura 3.11. Molde de acero utilizado en el moldeo.

#### **3.3.2.1. Manufactura de placas**

En base a los resultados preliminares visuales, teniendo en cuenta en primer lugar la temperatura de fusión determinada, y con el molde seleccionado, se procedió a definir parámetros que garanticen que el polímero forme placas uniformes y sin fallas para poder trabajar con los compuestos.

En la figura 3.12 se distinguen las etapas que se deben seguir mientras se desarrollan los ensayos preliminares. Se comienza determinando la mínima cantidad de material polimérico que llene el molde al fundirse, lo cual se verifica observando que las placas estén completas al desmoldearlas. Al mismo tiempo, se experimenta con la aplicación de presión necesaria sobre el molde para que

todos los gránulos de polietileno queden fundidos. Las placas que se obtienen deben ser uniformes y no se deben distinguir las granzas originales. La manera de aplicar presión puede ser variada, mas las comunes son como una función de rampa, de escalón y constante o sostenida durante todo el proceso. El apareamiento de burbujas en las placas, formas incompletas y el desbordamiento del material principalmente son síntomas de una indebida aplicación de presión.

Una vez que se ha escogido la forma de aplicación de presión, y como antesala para la optimización de parámetros de fabricación, es adecuado evaluar la evolución de la temperatura en el interior del molde para las condiciones de procesamiento con las que se ha obtenido los mejores resultados. Este comportamiento se deberá llevar a una curva que será característica del molde de la que se obtuvo.

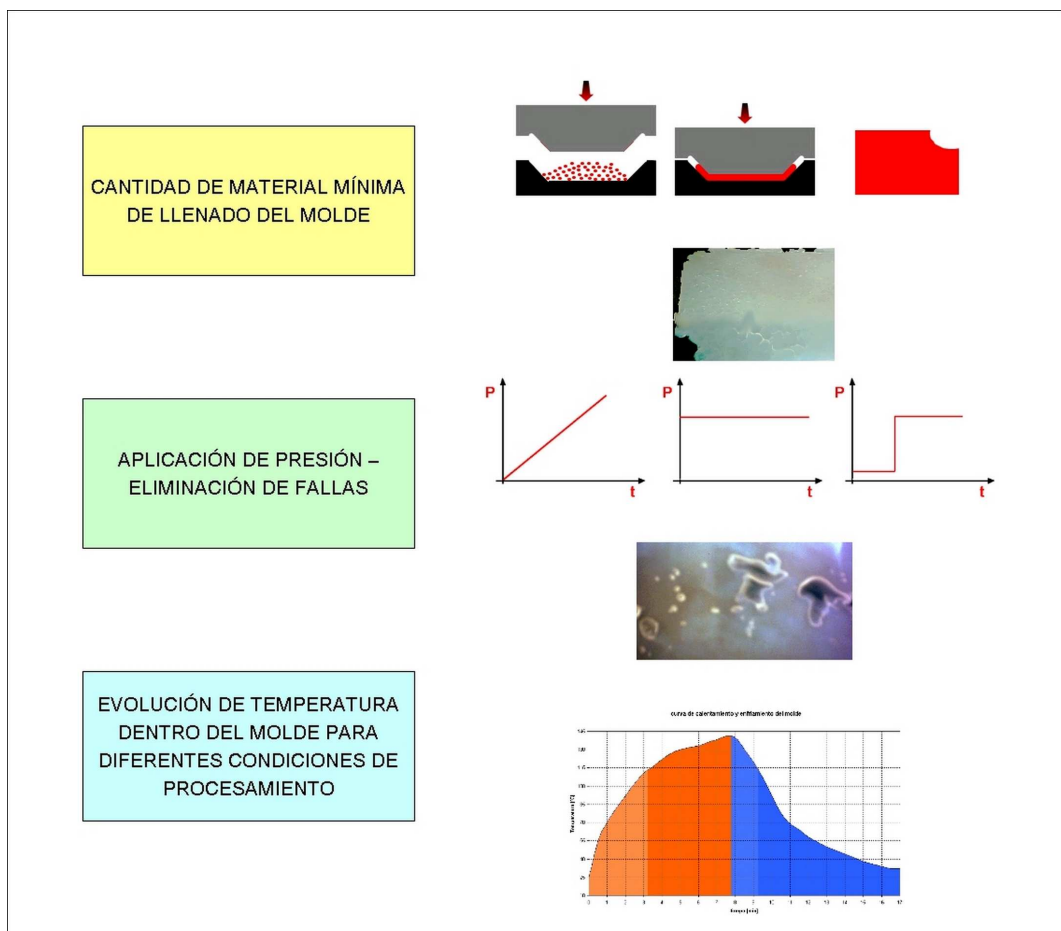


Figura 3.12. Pasos para la determinación de condiciones de procesamiento de placas. Ensayos preliminares.

### **3.3.2.2. Determinación de los parámetros óptimos para el proceso de moldeo por compresión**

Una vez que se ha conseguido procesar el polietileno para formar placas, se viene la etapa de optimizar los parámetros que se han determinado en primera instancia, de modo que el gasto de energía involucrado en su manufactura sea el más bajo posible y los tiempos sean reducidos. Esta optimización tendrá límites. Por un lado está la misma procesabilidad de la materia prima, es decir que los nuevos parámetros deben obtener placas completas y sin fallas, y no mermar la calidad de las placas. Por otro lado se deberá comprobar que los valores de las propiedades mecánicas de los productos obtenidos no están siendo afectados por la aplicación del proceso definido al final de este análisis.

El primer paso para definir los parámetros óptimos del procesamiento es reconocer plenamente la evolución física del PE dentro del molde. Es decir, se deben reconocer las etapas del moldeo marcadas claramente por los diferentes estados a los cuales es llevado el material moldeado. Como se indicó en el apartado 2.4.3, las fases del moldeo por compresión son: el precalentamiento del molde, el moldeo propiamente dicho y el enfriamiento.

#### *3.3.2.2.1. Tiempos y energía involucrados en cada etapa*

La cantidad de energía empleada en llevar a cabo cada una de las etapas y el tiempo que será aplicada deberán ser las estrictamente necesarias. Un exceso en el gasto energético tenderá a encarecer innecesariamente el proceso de manufactura.

El flujo de calor desde el molde hacia el PE será en todo momento transitorio, de la misma forma como el de las placas calefactoras y del sistema de enfriamiento hacia el molde, tendiendo a estabilizarse en la parte final del moldeo y del enfriamiento. De este modo, el calor aplicado al polietileno para fundirlo y que luego es evacuado para solidificarlo no será constante en cada fase.

Para determinar curvas como la de la figura 3.13 se midió la temperatura dentro del molde, es decir una temperatura semejante a la de las granzas de polietileno,

con la ayuda de una termocupla instalada en un orificio del molde que permitió esta operación. En esta figura se presenta además los cambios en la geometría y estado de las granzas de polietileno dentro del molde y en cada etapa del moldeo. Además se destaca el precalentamiento como el período de mayor transformación de la forma del material, a pesar de no ser el de mayor temperatura.

*Precalentamiento del molde.-* Comienza cuando la temperatura del interior del molde es igual a la de la temperatura ambiente y el tiempo que lleve dependerá de la evolución de la temperatura del molde. Mientras mayores sean las temperaturas de las placas calefactoras, el interior del molde alcanzará la temperatura de fusión del polietileno más rápidamente, y por lo tanto este periodo será más corto.

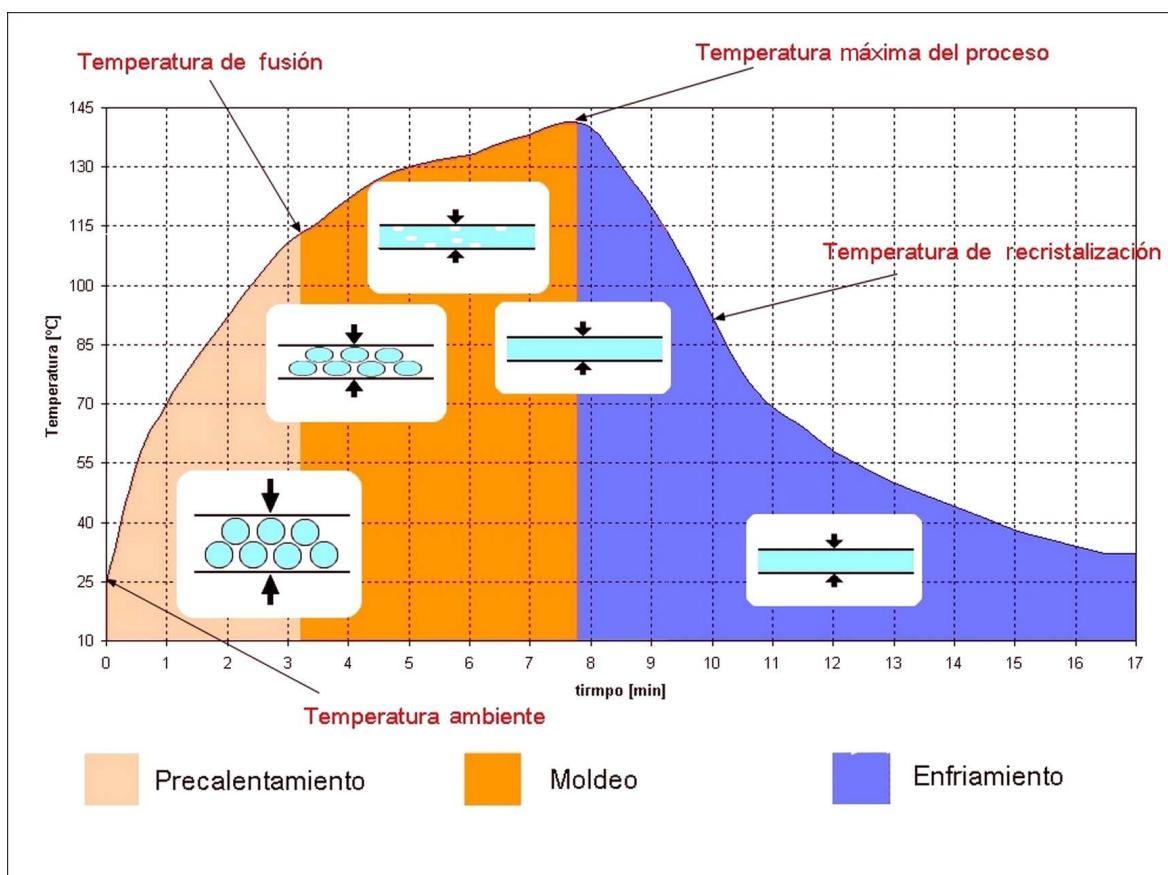


Figura 3.13. Transición del polietileno a través de las tres fases del moldeo por compresión.

Cuando comienza el proceso, el calor no se transfiere de forma óptima puesto que la superficie de contacto entre las tapas del molde y la granza, y peor aún la superficie de contacto entre granzas, es muy pequeña y heterogénea. En la figura 3.14 se distingue dos curvas de calentamiento, una tomada en la superficie exterior del molde y otra que indica una temperatura media entre las granzas de PE pues los que están en contacto con las tapas del molde no se calientan a la misma velocidad que los que están en el medio de otras granzas. Una vez que se va fundiendo el polímero, la placa que se va formando recibe el calor del molde con mayor facilidad.

En lo que tiene que ver con la aplicación de presión, es necesario que esta no decaiga cuando el material comienza a fluir, puesto que de esto depende que la transferencia de calor sea uniforme sobre el material. Cuando el material inicie su fusión, la presión aplicada comenzará a menguar puesto que los espacios entre granzas comenzarán a ocuparse y la distancia entre las tapas del molde deberá ser disminuida para ejercer presión sobre el polietileno.

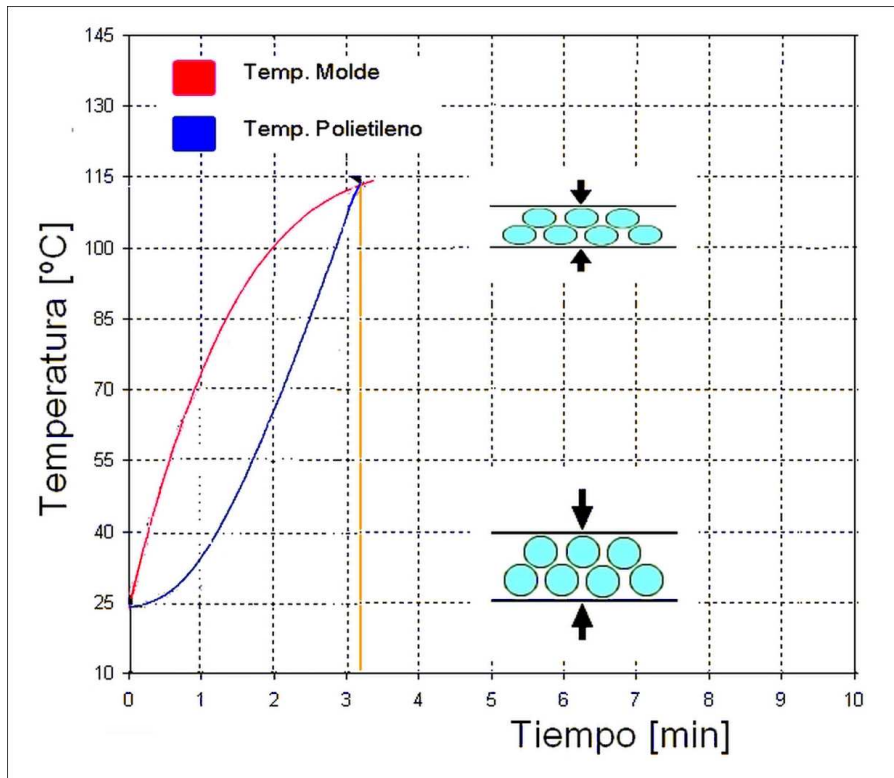


Figura 3.14. Transición del polietileno a través de las tres fases del moldeo por compresión.

*Moldeo.*- Una vez que se ha alcanzado la temperatura de fusión del PE en el molde, éste comenzará a fluir y lo que queda es aplicar presión para que el material fundido ocupe toda la cavidad del molde y se reblandezca totalmente el resto que queda por fundir. La presión debe mantenerse constante pues un aumento desmesurado puede hacer que el polímero se desborde del molde y disminuya el espesor de la placa.

Debido a que la prensa calefactora que se usó en este trabajo no cuenta con un controlador de temperatura para fijar un valor dado, es conveniente fijar las temperaturas de las placas calefactoras por encima del valor de la temperatura de fusión. Para esto se debe tener en cuenta que la temperatura seguirá aumentando en la etapa de moldeo y se debe tener cuidado de que ésta sea menor a la de degradación de la fibra que posteriormente se incorporará en el material para formar el compuesto.

El proceso debe terminar una vez que todo el material ha fundido. Esto se comprueba porque la presión que se aplica al molde no decae y el molde ha superado ya la temperatura de fusión del PE, por lo tanto se puede aseverar que todo el polietileno ha alcanzado este estado. El control de calidad de las placas de prueba, que serán dirimentes a la hora de determinar el tiempo y las presiones mínimas de moldeo, es visual.

*Enfriamiento.*- Si se han desarrollado las dos primeras fases con efectividad, pero no se controla los parámetros de enfriamiento debidamente, el resultado puede ser una placa de muy mala calidad. Esto se debe a que las burbujas e imperfecciones que se eliminaron aplicando presión en el moldeo pueden reaparecer a causa de la contracción que sufre el polímero al solidificarse. Para evitar esto es recomendable mantener presión mientras el polímero se enfría, de modo que mantenga la forma alcanzada en la etapa de moldeo.

Para el enfriamiento del molde es necesario poner en contacto al mismo con un sumidero de calor que se encuentre a baja temperatura, de modo que el calor fluya desde el molde hacia dicho sumidero. En este estudio la forma de enfriar el molde que se utilizó fue por medio del flujo de agua a través de un circuito

adaptado a la prensa, adaptación a la prensa calefactora que permite aplicar presión mientras el molde continua enfriándose.

Los polietilenos en general poseen velocidades muy altas de cristalización, lo que hace pensar que el control sobre el enfriamiento, para evitar efectos nocivos de una mala cristalización del material sobre las propiedades mecánicas del material obtenido por moldeo, no es efectivo. Pese a esto se decidió probar dos alternativas para la aplicación de esta fase. La primera opción consiste en la utilización de un baño térmico (ver figura 3.15), mismo que permite regular el caudal de agua que pasa a través del circuito. Por medio de este equipo se establece una temperatura inicial del flujo de agua y ésta recircula acarreado el calor que posee el molde. Cabe indicar que no se posee un control sobre la temperatura del agua en el baño térmico puesto que el agua que toma el calor del molde está confinada y regresa a una temperatura superior a la inicial. Puesto que el sistema se va enfriando paulatinamente, el flujo de calor será en estado transitorio durante el periodo de enfriamiento.



Figura 3.15. Baño térmico que controla el caudal del agua de enfriamiento.

Mientras más baja sea la temperatura del agua más rápido será el enfriamiento. Es por esto que la otra alternativa que se ensayó fue la de introducir en el circuito



de enfriamiento el agua del servicio municipal de agua potable de Quito, que aunque no se puede controlar en flujo, tiene una temperatura constante en el momento de ser utilizada\*, por lo que produce mayor flujo de calor y un enfriamiento más rápido. Otra ventaja de esta alternativa radica en que, de utilizarse, se eliminaría la utilización del baño térmico.

Los resultados obtenidos con los dos métodos deberán ser evaluados por medio de ensayos de propiedades mecánicas. Si bien la segunda alternativa parece ser la indicada para el enfriamiento, se debe tomar en cuenta que la teoría indica que si se aplica un enfriamiento más lento, las cadenas de PE se reordenan de mejor manera en la estructura molecular, y por lo tanto tendrán propiedades mecánicas superiores a un material de PE que se enfrió rápidamente. Esto permitirá dirimir entre las dos posibilidades.

#### *3.3.2.2.2. Criterios de evaluación de resultados preliminares*

Una vez que se pudo obtener placas de polietileno sin defectos o imperfecciones, se probó algunas alternativas para determinar los parámetros óptimos de procesamiento de las mismas. Se intentó por un lado reducir los tiempos de precalentamiento y moldeo aumentando las temperaturas de las placas calefactoras, a pesar de que esto acarrea un mayor gasto de energía para este incremento de calor.

Otro aspecto, aun más importante con respecto a las propiedades mecánicas de las placas es, como se dijo en el apartado 3.3.2.1, el tipo de enfriamiento utilizado. Este enfriamiento puede realizarse controlando el caudal con una temperatura inicial del agua predeterminada o usando agua sin recirculación del servicio público.

---

\* Las temperaturas del agua varían durante el día entre 10 y 15°C, cuando se realizaron las pruebas se verificó que ésta tenía una temperatura de 13°C con un caudal de 0.07 l/s.

Puesto que todas las alternativas anteriores dan como resultado placas de calidad semejante, se escogió entre los procedimientos utilizados aquellos con los que se obtuvieron las mejores propiedades mecánicas. En el caso de placas preparadas con diferentes parámetros y desempeño mecánico similar se escogerá el procedimiento que demande menor cantidad de energía. Para este efecto se debe preparar placas realizadas con cada procedimiento, las cuales se indican en la tabla 3.7 con su respectiva denominación y pruebas a las que serán sometidas.

Tabla 3.7. Placas para pruebas de determinación de parámetros optimizados de fabricación.

Nº	DENOMINACIÓN	ENSAYOS	Nº	DENOMINACIÓN	ENSAYOS
1	PE-168/135 CQ1	TRACCIÓN	10	PE-178/145 SC1	TRACCIÓN
2	PE-168/135 CQ2	TRACCIÓN	11	PE-178/145 SC2	TRACCIÓN
3	PE-168/135 CQ3	TRACCIÓN	12	PE-178/145 SC3	TRACCIÓN
4	PE-168/135 SC1	TRACCIÓN	13	PE-198/165 CQ1	TRACCIÓN
5	PE-168/135 SC2	TRACCIÓN	14	PE-198/165 CQ2	TRACCIÓN
6	PE-168/135 SC3	TRACCIÓN	15	PE-198/165 CQ3	TRACCIÓN
7	PE-178/145 CQ1	TRACCIÓN	16	PE-198/165 SC1	TRACCIÓN
8	PE-178/145 CQ2	TRACCIÓN	17	PE-198/165 SC2	TRACCIÓN
9	PE-178/145 CQ3	TRACCIÓN	18	PE-198/165 SC3	TRACCIÓN

Leyenda: PE-X/Y SC(CQ)Z = Placa de polietileno obtenida con temperatura de la placa calefactora superior = X°C, temperatura de la placa calefactora inferior = Y°C, sin control de caudal del agua de enfriamiento (con control), número Z.

### 3.4. OBTENCIÓN DEL COMPUESTO

#### 3.4.1. CONSIDERACIONES PARA LA ELABORACIÓN DE PLACAS

Una vez que se ha fijado los parámetros óptimos para la fabricación de placas de polietileno y se ha secado la fibra preparada, se procede a elaborar compuestos. Para poder encontrar los parámetros bajo los cuales se formará los compuestos se parte de los parámetros de la fabricación de placas y se trabaja con una sola fracción, tamaño y orientación de fibras de refuerzo. Las características del

refuerzo utilizadas se tomaron del trabajo de Juan Carlos Páez acerca de la fabricación de materiales compuestos de abacá y polipropileno, en donde, al ensayar los compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá se obtuvo los mejores resultados con una fracción másica del 30% de fibras discontinuas de 20 mm de largo y orientadas al azar.

En la figura 3.16 se muestra el esquema con el cual se trabajó para encontrar en primera instancia los parámetros de elaboración de un solo tipo de material compuesto en condiciones óptimas de gasto energético y que esté libre de fallas. Esto es importante puesto que si se trabajase con varias condiciones de procesamiento, y Al mismo tiempo, con diferentes composiciones y tipos de refuerzo, se obtendrá más de un material y la evaluación del uso de los tipos de refuerzo y composición utilizada no será la más objetiva.

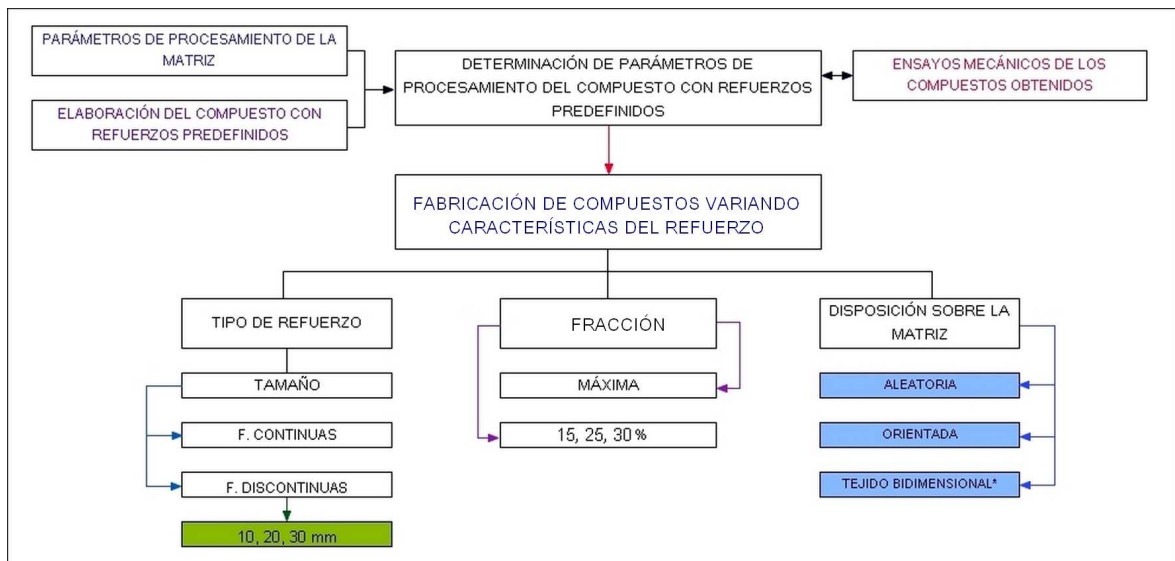


Figura 3.16. Esquema para la obtención de parámetros de fabricación de materiales compuestos y evaluación de la variación de sus tipos, cantidad y orientación de sus refuerzos.

Una vez que se han obtenido los materiales compuestos sin fallas y con la composición y refuerzos predeterminados, de haber más de una combinación de parámetros que permitan obtener placas sin fallas se ensayará mecánicamente las placas obtenidas para determinar cual es el mejor proceso.

### **3.4.2. VARIACIÓN DE LA FRACCIÓN MÁSCICA Y LA DISPOSICIÓN DE LA FIBRA EN LA MATRIZ**

Las tres características de los refuerzos cuyo efecto se probará en este ensayo son: el tamaño (fibras continuas y cortas de 10, 20 y 30 mm), la fracción másica de los mismos en el material final o la composición del compuesto, y la orientación con respecto al plano de la matriz (orientadas en dirección de la carga, al azar y en un tejido bidimensional). En todos los casos se debe garantizar que los refuerzos se encuentren uniformemente distribuidos sobre la matriz y que no existan fallas tales como burbujas e imperfecciones. En lo que tiene que ver con la composición, se intentará alcanzar al menos el máximo valor que se consiguió en el estudio de Juan Carlos Páez, es decir el 35% de fracción másica de la fibra dentro del compuesto.

Se deberá elaborar al menos tres placas de cada tipo de compuesto, de modo que de estas placas se puedan obtener las probetas que se ensayarán para la caracterización de los materiales. En la tabla 3.8 se listan las placas correspondientes a cada una de las combinaciones previstas.

### **3.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS OBTENIDOS**

Para evaluar las características y propiedades de cada uno de los materiales compuestos obtenidos, las placas listadas en la tabla 3.8 serán ensayadas según los procedimientos descritos en las normas mostradas en la tabla 3.9. Las probetas de ensayo se cortarán en cada caso con las formas y dimensiones especificadas en cada procedimiento. En el caso del ensayo de absorción de agua se usó un estudio obtenido de una publicación de la ASAE (Sociedad de Ingeniería en Agricultura, Alimentos y sistemas biológicos de Canadá), en el cual se ensaya materiales compuestos obtenidos por extrusión. Este procedimiento consta en el anexo 4.

Una vez que se ha obtenido los compuestos y se ha evaluado sus propiedades mecánicas, es conveniente relacionar los resultados de su caracterización con los

que se pueden predecir por medio de la ley de las mezclas descrita en la sección 2.3.2 para cada configuración diferente del refuerzo utilizado. La intención de comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los que pueda indicar la ley de las mezclas no es el desacreditar a uno de los dos resultados sino el establecer la correspondencia entre los dos tipos de valores. Además, se puede tener una idea del carácter de la adhesión de las fibras con la matriz.

Tabla 3.8. Placas de materiales compuestos obtenidos para pruebas mecánicas y de caracterización.

Nº	DENOMINACIÓN	ENSAYOS	Nº	DENOMINACIÓN	ENSAYOS
1	COM-15%-10-1	TRACCIÓN	22	COM-25%-30-1	TRACCIÓN
2	COM-15%-10-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN	23	COM-25%-30-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN
3	COM-15%-10-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS	24	COM-25%-30-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS
4	COM-25%-10-1	TRACCIÓN	25	COM-35%-30-1	TRACCIÓN
5	COM-25%-10-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN	26	COM-35%-30-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN
6	COM-25%-10-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS	27	COM-35%-30-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS
7	COM-35%-10-1	TRACCIÓN	28	COM-15%-CN-1	TRACCIÓN
8	COM-35%-10-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN	29	COM-15%-CN-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN
9	COM-35%-10-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS	30	COM-15%-CN-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS
10	COM-15%-20-1	TRACCIÓN	31	COM-25%-CN-1	TRACCIÓN
11	COM-15%-20-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN	32	COM-25%-CN-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN
12	COM-15%-20-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS	33	COM-25%-CN-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS
13	COM-25%-20-1	TRACCIÓN	34	COM-35%-CN-1	TRACCIÓN
14	COM-25%-20-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN	35	COM-35%-CN-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN
15	COM-25%-20-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS	36	COM-35%-CN-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS
16	COM-35%-20-1	TRACCIÓN	37	COM-CU-TB-1	TRACCIÓN
17	COM-35%-20-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN	38	COM-CU-TB-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN
18	COM-35%-20-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS	39	COM-CU-TB-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS
19	COM-15%-30-1	TRACCIÓN	40	PE-SR-PO-1	TRACCIÓN
20	COM-15%-30-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN	41	PE-SR-PO-2	TRACCIÓN Y FLEXIÓN
21	COM-15%-30-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS	42	PE-SR-PO-3	FLEXIÓN Y P. FÍSICAS

Leyenda: COM-X%-Y-Z = Compuesto con X% de composición másica del refuerzo de largo X milímetros, placa número Z. (CU = composición única, PE = polietileno, CN = fibra continua, PO = parámetros optimizados, TB = tejido bidimensional, SR = sin refuerzos)

De cada placa de material, debido a sus dimensiones (130 x 125 mm aproximadamente), se extraen un aproximado de dos probetas para ensayos de flexión, y tres probetas para flexión, dureza y absorción de agua. Para cada ensayo de tracción, la norma utilizada indica que se debe probar al menos cinco probetas cortadas en la placa de modo que representen todo el material. Para

esto existen algunas sugerencias de orientación en la extracción de las probetas en dicha norma.

Tabla 3.9. Procedimientos de ensayos usados para caracterizar los compuestos.

ELEMENTO	PRESENTACIÓN	ENSAYO A REALIZAR	NORMA / PROCEDIMIENTO
COMPUESTOS PE + ABACÁ	Especímenes de tamaño según norma	Comportamiento a la tracción	ASTM D - 638 [2003]
COMPUESTOS PE + ABACÁ	Especímenes de tamaño según norma	Comportamiento a la flexión	ASTM D - 5943 [1996]
COMPUESTOS PE + ABACÁ	Especímenes de tamaño según norma	Absorción de agua	Paper Number: MB04-305 ASAE
COMPUESTOS PE + ABACÁ	Especímenes de tamaño según norma	Determinación de la densidad	ASTM D - 792 [1991]
COMPUESTOS PE + ABACÁ	Especímenes de tamaño según norma	Determinación de la dureza	ASTM D - 2240

Cabe señalar que para la obtención de probetas rectangulares para los ensayos de flexión se fabricó un troquel que se indica en la figura 3.15. Este elemento de corte se fabricó de modo que se guarda la tolerancia del ancho. Según la norma ASTM D 5943 [1996] esta dimensión debe ser de  $10 \pm 0.2$  mm a lo largo de toda la probeta que se obtiene. El largo se calcula de acuerdo con una relación en base al espesor promedio de la muestra. Además, mediante este troquel, cuyo plano se encuentra en el anexo 8, también se obtuvieron muestras para los ensayos de dureza, absorción de agua y densidad.

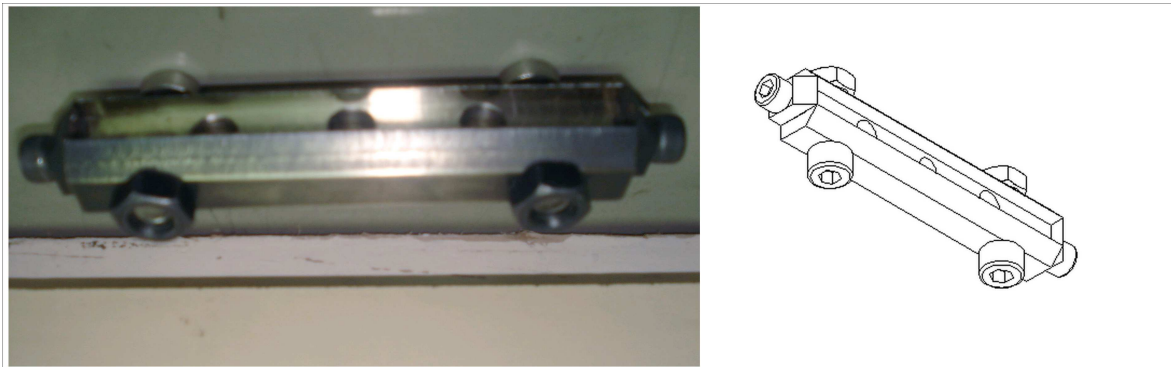
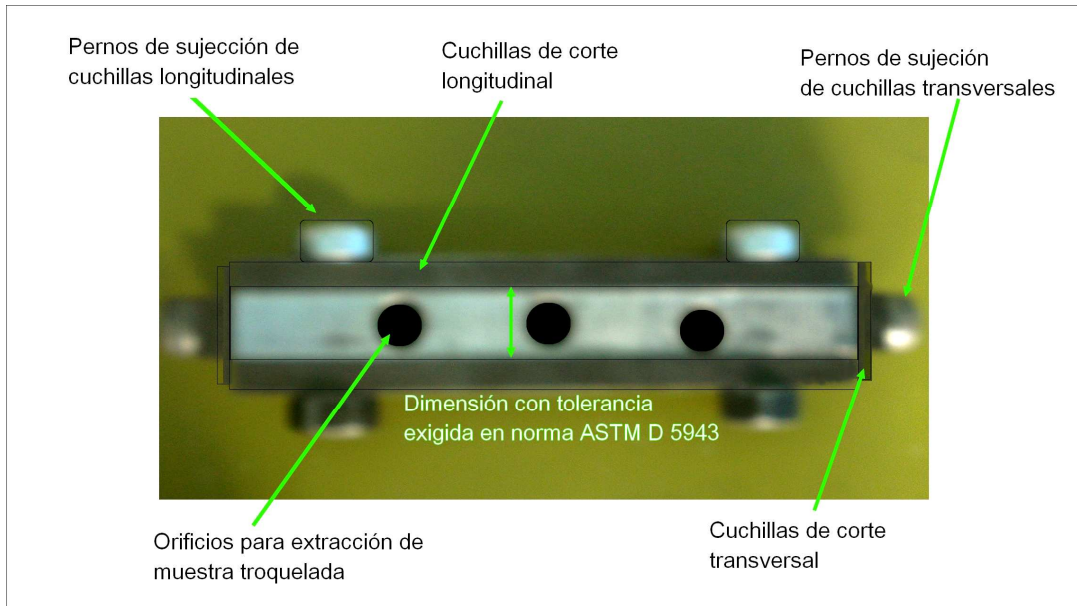


Figura 3.17. Troquel construido para obtención de probetas para ensayos a flexión.

Este troquel se diseñó para que la fuerza de corte pueda ser aplicada con cualquier instrumento por sobre su cuerpo principal. Es desarmable para poder reemplazar las cuchillas en caso de ser necesario y cuenta con tres orificios que permiten utilizar cualquier punzón para extraer la muestra troquelada empujándola con facilidad hacia afuera.

## **CAPITULO 4**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo se registran cada uno de los resultados obtenidos en el proceso de producción del compuesto, desde la fase preliminar de obtención de parámetros, pasando por la manufactura de placas y preparación de la materia prima, hasta la elaboración de los compuestos con sus variadas características y su posterior caracterización mecánica y física. Esta parte del estudio es consecuencia de la aplicación de todos los preceptos y marco teórico desarrollado en los tres capítulos anteriores y servirá de base para la obtención de las respectivas conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

#### **4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS REFUERZOS**

A pesar de que los datos recopilados en estudios anteriores con fibras de abacá sirven para determinar las características físico - químicas y mecánicas, se debe tomar en cuenta que, al ser estas fibras naturales, la variabilidad de sus propiedades, sobre todo mecánicas, es bastante alta. Por esta razón se llevó a cabo los ensayos correspondientes para obtener las propiedades mecánicas de las fibras que se utilizaron en el trabajo, y de esta manera contar con los valores reales correspondientes a esta muestra que es llevada a análisis.

Además, debido a la importancia de la reducción de humedad de la fibra, se llevó a cabo un análisis termogravimétrico de la fibra para poder determinar las condiciones efectivas de secado bajo condiciones predefinidas, para poder llevarlo a cabo en la estufa que se tuvo al alcance para este efecto.

##### **4.1.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE ABACÁ**

Para determinar las curvas esfuerzo-deformación y los valores de esfuerzo máximo a la tracción de la fibra se siguió los lineamientos descritos en la norma



ASTM D-3822, misma que exige un número de probetas mínimo de cuarenta. Las pruebas se llevaron a cabo en la máquina universal de ensayos Lloyd que se encuentra en el Laboratorio de Textiles de la Escuela Politécnica Nacional.

En la tabla 4.1 se registran los valores promedio y la respectiva desviación estándar, según indica reportar la norma utilizada, de esfuerzo de rotura y elongación máxima. Todos los valores obtenidos, para cada muestra ensayada, de fuerza, elongación, esfuerzo, densidad lineal y tenacidad de las fibras en las unidades sugeridas, y los datos obtenidos en las pruebas, así como curvas esfuerzo-deformación se registran en el anexo 5.

Tabla 4.1. Resumen de resultados obtenidos en las pruebas de tracción aplicadas a las fibras de abacá variedad bungalowón.

Magnitud medida	Peso [mg]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Densidad lineal [tex]	Fuerza máxima [N]	Tenacidad a la rotura [N/tex]	Esfuerzo máximo [MPa]	Deformación al pico [%]
<i>Valor promedio</i>	7,55	3,36E-04	50,36	24,90	0,49	748,47	1,42
<i>Desviación estándar</i>	1,94	8,61E-05	12,92	6,21	0,14	64,71	0,70
<i>Desviación estándar [%]</i>	25,66%	25,66%	25,66%	24,95%	28,96%	8,65%	49,23%

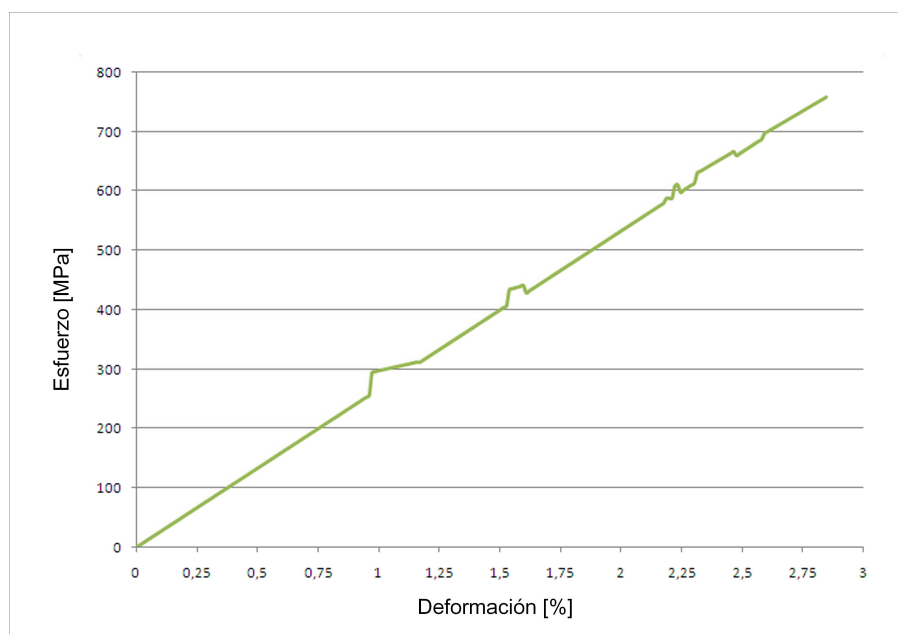


Figura 4.1. Curva esfuerzo vs. deformación de una muestra representativa con datos obtenidos en las pruebas de tracción aplicadas a las fibras de abacá variedad bungalowón.

#### 4.1.2. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA FIBRA DE ABACÁ

Para obtener la curva de la figura 4.2 se dispuso una muestra de fibra de abacá variedad bungalowón grado 3, del mismo grupo de fibras que conforman este estudio, y pesando la cantidad determinada por el instrumento de medida se llevó al análisis a la fibra por medio del equipo TGA -50 Shimadzu. El experimento consistió en elevar la temperatura del espécimen desde la ambiental hasta un valor predefinido, seleccionado para el calentamiento de modo que no ocasione degradación de la fibra (en el proyecto de titulación de Deisy Trávez se realizó un análisis termogravimétrico de la fibra de abacá variedad bungalowón en donde se determinó que la temperatura de degradación de la fibra es de 227°C, el termograma se puede apreciar en el anexo 7) pero que evapore el agua que está contenida en ella. En este caso se seleccionó 140°C. Mientras fluye el calor hacia la fibra, el equipo registra la pérdida de masa debido a la evaporación del agua contenida y el tiempo en el que ocurre esto.

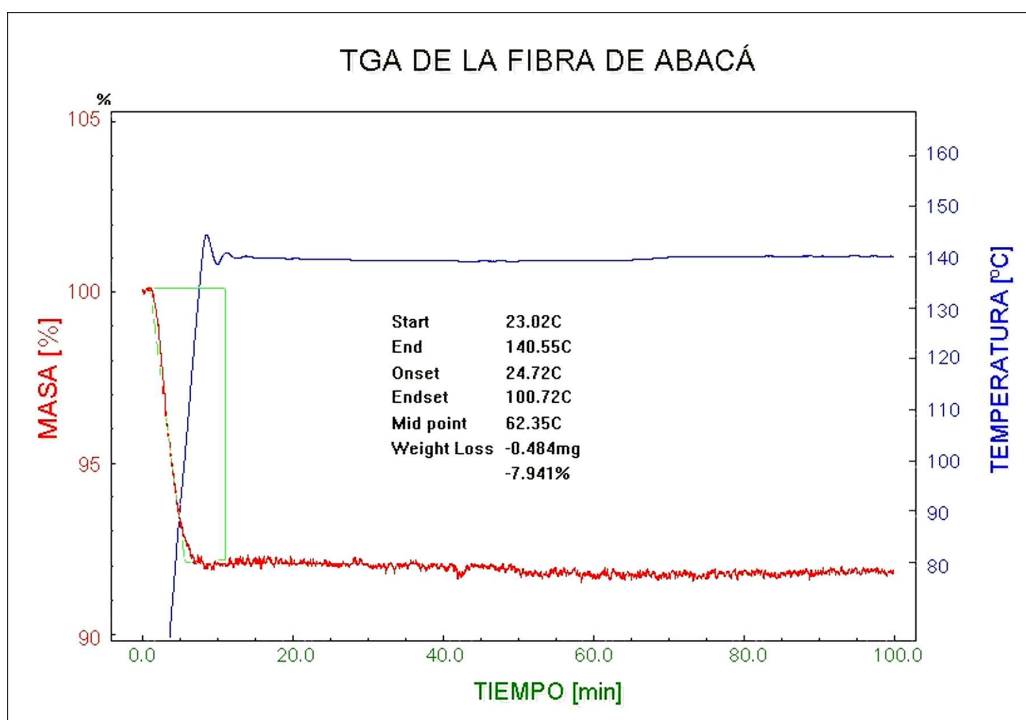


Figura 4.2. Termogravimetría de la fibra de abacá variedad bungalowón del grupo 3 en estudio.

De la anterior termogravimetría se concluye que, en teoría, si se expone a una fibra de abacá a una temperatura de 140°C, ésta demorará diez minutos en perder todo su contenido de humedad. Cabe señalar que en esta prueba no se empleó ninguna atmósfera de arrastre, misma que suele ser utilizada cuando los materiales se degradan y los gases y productos de su combustión deben ser desalojados para que la lectura de la máquina se pueda tomar. Dependiendo del material ensayado los gases de arrastre son nitrógeno y oxígeno.

## **4.2. PREPARACIÓN DE MATERIALES E INSTRUMENTOS**

Como se indicó en el capítulo 3, el primer paso para iniciar el proceso de moldeo por compresión es la preparación y acondicionamiento de los equipos e insumos a utilizar. A continuación se describe el proceso y los resultados del acondicionamiento de las herramientas y preparación de las materias primas.

### **4.2.1. ACONDICIONAMIENTO DEL MOLDE**

El molde de acero que se utilizó en este estudio posee dimensiones que tienen una influencia directa sobre las condiciones de moldeo. En especial, el espesor de la tapa del molde, que va en la parte superior del mismo, es mucho mayor que el de la placa del piso. Esto se debe considerar no solo en la aplicación de presión (aunque en realidad al aplicarse ésta en una prensa no cambia en las dos tapas) sino principalmente en el flujo de calor a través de estas paredes.

Por esta consideración se decidió dar una mayor temperatura a la placa calefactora superior, que es la que está en contacto con esta tapa de mayor grosor. La diferencia de temperaturas debió buscarse y elegirse en base a la calidad resultante de las placas de PE que se iban obteniendo en las pruebas preliminares. De este modo, en base a la experimentación, se llegó a la conclusión de que ambas placas calefactoras debían tener temperaturas por encima de la temperatura de fusión del PE. En el caso de la placa superior ésta debía tener al 32°C más que la inferior, de modo que este gradiente de como

resultado un flujo más rápido en la parte superior del molde y por lo tanto un flujo de calor homogéneo en el PE que encuentra en el molde.

#### 4.2.2. TEMPERATURA DE FUSIÓN DEL POLIETILENO

Una vez escogido el material de la matriz, el polietileno lineal 1-buteno de baja densidad Venelene 2213 grado inyección (figura 4.3), se determinó por medio de una calorimetría diferencial de barrido la temperatura de fusión del mismo y la temperatura a la que este proceso de fusión concluye según el termograma\* que se obtuvo una vez realizado el ensayo.



Figura 4.3. Polietileno lineal 1-buteno de baja densidad Venelene 2213 grado inyección.

El diagrama de la figura 4.4 es una réplica del resultado del DSC corrido sobre la muestra de PE del que está compuesto la matriz. La principal conclusión que se pudo obtener de este examen consiste en la determinación de la temperatura mínima límite para el moldeo por compresión que es la que debe poseer el molde para que el material polimérico comience a fluir y llenar el espacio determinado por el molde. Obviamente no será esta la temperatura que se programe en las placas calefactoras debido a las pérdidas, la necesidad de alcanzar la temperatura de moldeo en poco tiempo y para garantizar que todo el material se haya reblandecido. Las temperaturas de las placas calefactoras deben ser mayores.

---

\* En la figura 3.9 y en el apartado 3.3.2 se explica la interpretación de este tipo de termogramas.

En la gráfica de la figura 4.4 se muestra la variación de entalpía que sufre la muestra al ir incrementando sobre esta la temperatura. El pico principal en la gráfica indica la fusión del PE analizado y concluye señalando la temperatura a la que sucede, en este caso 122,84°C. El calorímetro fue dispuesto de modo que alcance la temperatura de 180°C con una tasa de 10°C/min. Las líneas en verde se ubican en la gráfica concluida para obtener datos extrapolados en la zona de análisis. En el anexo 2 se presentan los termogramas originales obtenidos del equipo Shimadzu DSC – 50.

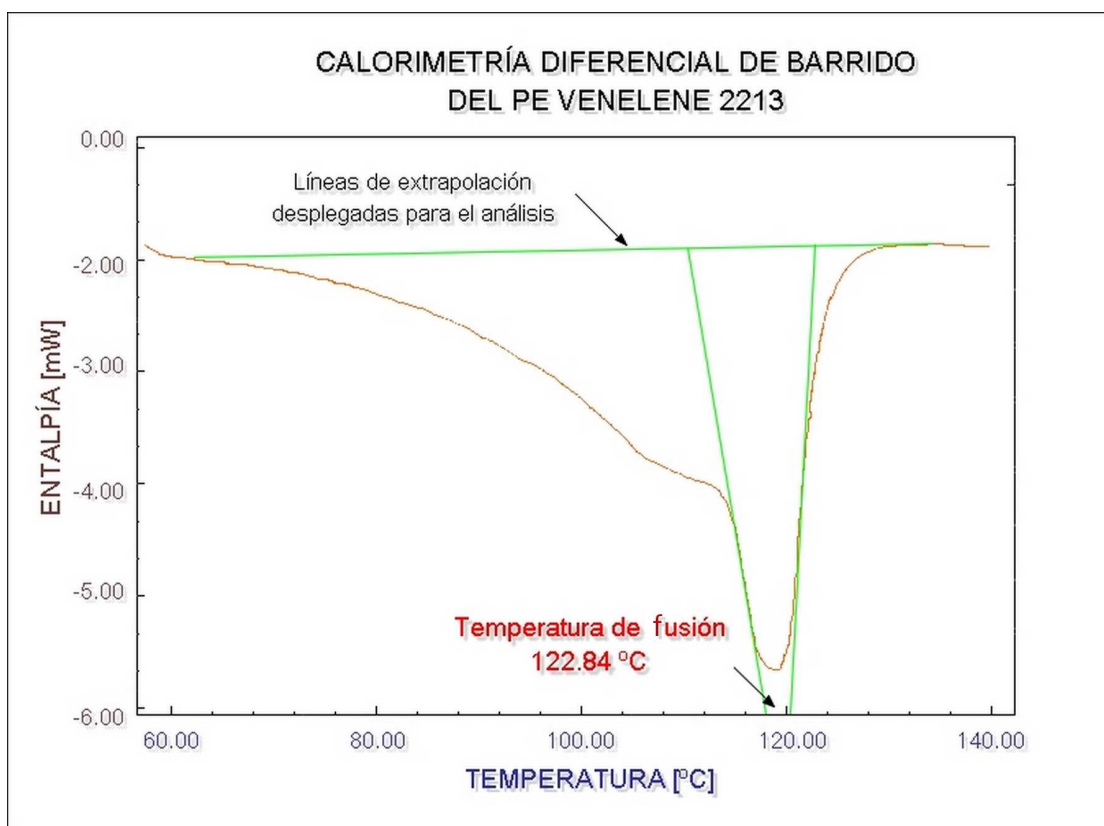


Figura 4.4. Representación del segundo barrido del DSC realizado al polietileno lineal 1-buteno de baja densidad Venelene 2213 grado inyección.

#### 4.2.3. OPERACIÓN DE DESHILADO, CORTE Y ENTRELAZADO DE FIBRAS

Es difícil determinar la masa de fibra involucrada en el estudio debido principalmente a que existe una considerable cantidad de desperdicio en el proceso mismo de fabricación del compuesto tipo. Asimismo, no se puede determinar con exactitud la cantidad de placas preliminares que se obtendrán con

ciertos fallos que únicamente servirán para definir los parámetros de fabricación del compuesto.

Una vez que se obtuvo el material de refuerzo en atados, se debió deshilar la fibra de modo que se pueda manejarla en forma de filamentos. En el caso de trabajar con fibras continuas se debió separar uniformemente las fibras unas de otras de modo que al integrarse al polietileno guarden paralelismo con la dirección de posterior aplicación de carga y no hayan concentraciones de filamentos en una sola zona del material. Se debió improvisar instrumentos para el caso y garantizar una buena distribución de los refuerzos. El corte se realiza una vez que las placas de PE y las fibras se han moldeado.

Para obtener fibras cortas se segmentó los filamentos largos de abacá a la medida indicada (10, 20 y 30 mm) con un “cortafrío” (pinza metálica de corte usada para segmentar cables de conducción eléctrica y alambre de acero de diámetro menor a 3 mm) debido a que la dureza de la fibra de abacá no permitió utilizar otro tipo de herramientas de corte para trabajo menos exigente. Luego de cortadas existe un efecto de aglomeramiento entre las fibras por lo que para poder distribuir las de forma pareja dentro de las placas de PE es necesario separarlas manualmente para alcanzar uniformidad.

El obtener un tejido bidimensional de fibras de abacá es una tarea bastante delicada y compleja debido a la rigidez de las mismas, misma que ocasiona especial dificultad al momento de entrelazarlas. Esta operación la llevó a cabo la Ing. Hilda Trujillo, utilizando el telar mostrado en la figura 3.5, el que se encuentra en el laboratorio de Textiles de la Escuela Politécnica Nacional. Esta configuración del refuerzo simplifica en gran manera el proceso de obtención de compuestos debido a que el tejido lleva ya en sí mismo una distribución de los refuerzos apropiada. Solo queda cortar el tejido bidimensional al tamaño de las placas y llevarlo al molde para la operación de moldeo por compresión y esperar que no pierda éste la forma de las fibras al unirse mediante presión al polietileno.

### **4.3. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DE LAS PLACAS DE POLIETILENO**

En una primera parte, una vez conocida la temperatura de fusión del polietileno, se comprobó el índice de fluidez (MFI) dado en la hoja técnica del mismo. Este valor es importante ya que permite intuir la capacidad para fluir que tiene el material una vez que alcanza la temperatura de fusión y de este modo controlar la presión sobre el molde de modo que el PE no se desborde por los espacios que guardan el molde con su tapa. Al momento de realizar el ensayo utilizando el proceso definido en el CIAP, se observó que la medición fue muy complicada debido a la alta fluidez del polietileno que no permitía cortar los segmentos de material con prolijidad. Este problema se debe a que el índice de fluidez del polímero ensayado es más alto de 20 g/10min, mismo que no había sido superado antes en los materiales probados con este equipo.

Una vez conocidos estos datos y confirmados por las pruebas correspondientes se determinó experimentalmente cada parámetro de fabricación de placas de polietileno, tales como presión, tiempo y temperatura con los instrumentos para tales tareas.

#### **4.3.1. ELIMINACIÓN DE DEFECTOS – ADAPTACIÓN A LOS INSTRUMENTOS Y PARÁMETROS PRELIMINARES**

Se realizaron las primeras pruebas de moldeo por compresión del polietileno, teniendo como objetivo el obtener placas sin defectos, es decir con forma completa, sin agujeros ni burbujas, sin señales del material virgen mal fundido (granzas), con caras paralelas y con una superficie sin defectos. Los principales factores tomar en cuenta para obtener placas sin defectos son: la cantidad mínima de material para llenar el molde, las temperaturas de las placas calefactoras, la presión aplicada sobre el molde y las características de enfriamiento.

*Llenado del molde.*- luego de ensayar con algunas cantidades se determinó que la masa mínima de PE para obtener placas rectangulares completas de entre 1,7 y 0,8 mm de espesor es de 18 g cuando se utiliza el molde de acero antes mencionado. Con 16 y 17 g se puede obtener placas completas bajo ciertas circunstancias mas no garantizan la calidad del producto final y el espesor obtenido es muy bajo para elaborar el compuesto tipo sánduche.

*Temperatura de las placas calefactoras.*- ambas placas cuentan con potenciómetros que comandan elementos calefactores que permiten fijar su temperatura y termómetros que indican la evolución de este calentamiento. Cuando la temperatura indicada es alcanzada se interrumpe el suministro de corriente eléctrica hasta que la temperatura alcanza un valor por debajo de la misma.

Se comenzó fijando las placas calefactoras con temperaturas levemente superiores a 123°C ( $T_m$  del PE), probando con 130, 135 y 140°C. A pesar de que con mayores temperaturas se obtenía mayor cantidad de material fundido, era evidente que en la parte superior de la placa el material no se llegaba a fundir. Esto se revelaba ya que había marcas de granzas no fundidas plenamente en la zona en contacto con la tapa superior del molde.

Mientras se elevaba la temperatura de ambas placas era necesario disminuir el tiempo total de precalentamiento y moldeo (aunque dichas fases no estaban definidas aún) puesto que si se mantenía la misma duración el material fluía desmesuradamente y al enfriarse complicaba gravemente el proceso de desmoldeo. A pesar de la disminución del tiempo de procesamiento no se podía evitar este fenómeno, y se disminuía demasiado era imposible eliminar las muestras de fundición parcial del polímero.

*Presión sobre las tapas del molde.*- las posibilidades para la aplicación de presión sobre las tapas del molde son varias debido a que no solo el valor puede cambiar sino su comportamiento en el tiempo. Luego de haber probado algunos valores y formas de aplicación (tipo rampa, escalón y constante) se observó que no se puede fabricar placas con otras formas que no sean por medio de presiones



constantes en el tiempo y en valores cercanos a los 0,442 MPa (1500 lbf en la prensa hidráulica). En estudios como los de Juan Carlos Páez se pudo obtener placas de polipropileno con diferentes valores de presión, sin embargo con el polietileno que se trabajó, la mínima variación de los parámetros de procesamiento ocasionaron graves problemas para el proceso, por lo que una vez conocidos los parámetros se mantuvieron para poder estudiar el material compuesto con matriz polietilénica.

*Tipos de enfriamiento.*- tanto con el enfriamiento por recirculación de flujo controlado por medio del baño térmico, como por el enfriamiento por medio del flujo continuo de agua de servicio público, se obtuvo placas sin defectos. La disyuntiva para la selección de uno u otro método se esclareció en base a las características mecánicas de los materiales obtenidos por ambos métodos.

#### **4.3.2. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DENTRO DEL MOLDE - DETERMINACIÓN DE LAS ETAPAS DEL MOLDEO**

Por medio de una termocupla se llevó un registro de los datos de temperatura dentro del molde, tomados en un agujero en la parte inferior del mismo. Esta información toma relevante importancia cuando se desea conocer el estado del polietileno en el transcurso del tiempo bajo las condiciones de procesamiento a las que está siendo sometido. En base a esto se puede optimizar la energía de transformación y resolver los posibles problemas de transición a los que se ve sujeto el material.

En base a esta información y determinadas las propiedades físicas del material a moldear se puede definir perfectamente las etapas de moldeo (ver tabla 4.2). Para cada fase se tomó en cuenta las posibilidades de ejecución de acuerdo con los recursos e instrumentos que se contaron para cada caso, y al final de los seleccionados por su viabilidad y resultados apropiados se pasó a la selección final en términos de optimización.

En la gráfica de la figura 4.5 se pueden distinguir las tres fases del moldeo por compresión, con sus límites para el trabajo con el polietileno 1-buteno de baja

densidad Venelene 2213 sometido a una presión constante 0.442 MPa\* en las tapas del molde. La fase de *precalentamiento* se limita por el rango de temperatura entre la inicial ambiental y la de fusión del polietileno en estudio. Se caracteriza por un estado en el cual no es necesario el control de la presión sobre el molde pues la presión inicial dada no necesitará una fuerza adicional ya que el material se encontrará en estado sólido y conserva sus dimensiones.

Tabla 4.2. Temperatura medida en el molde de acero durante el moldeo por compresión de una muestra de polietileno.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]		
0,0	25	3,5	116	8,5	130		
0,5	55	4,0	122	9,0	120		
1,0	70	4,5	127	9,5	107		
1,5	82	5,0	130	10,0	92		
2,0	92	5,5	132	10,5	78		
2,5	102	6,0	133	11,0	69		
3,0	111	6,5	136	11,5	64		
3,5	116	7,0	138	12,0	58		
<b>ETAPA DE PRECALENTAMIENTO</b>		7,5	141	12,5	54		
		8,0	140	13,0	50		
		<b>ETAPA DE MOLDEO</b>		13,5	47		
				14,0	44		
		14,5	41				
		15,0	38				
		15,5	36				
		16,0	34				
		16,5	32				
		17,0	32				
				<b>ETAPA DE ENFRIAMIENTO</b>			

Temperatura del agua de enfriamiento 14°C

Caudal medio 0,3 l/s

\* Este valor se determina dividiendo la fuerza aplicada por la prensa hidráulica de 1500 lb sobre el área en que ésta se aplica que es de 0,0151 m<sup>2</sup>.

A continuación la fase de *moldeo*, que es donde el material cambia de forma y estado físico, requiere mayor control en lo que se refiere a la aplicación de presión, puesto que ésta le permitirá fluir al material con rapidez y llenando el molde por completo. Termina cuando todo el material se ha fundido y la forma de la placa es óptima, lo cual se comprueba en el desmoldeo. Con una sobre-presión existen problemas de espesor y desperdicio de material. Se observó que alcanzando una temperatura de 137°C en la fase de moldeo se consiguen placas de buena calidad, espesor uniforme y no se obtienen burbujas. Además la placa no se adhiere a las paredes del molde lo cual facilita el desmoldeo.

Finalmente, la fase de *enfriamiento* requiere un aumento de presión del 25% para evitar que los rechupes marquen la placa en el momento de la solidificación del polietileno. Cuando se utiliza el baño térmico, el enfriamiento es mucho más lento que el mostrado en la gráfica de la figura 4.5, mismo que se realiza por medio de la circulación continua de agua potable.

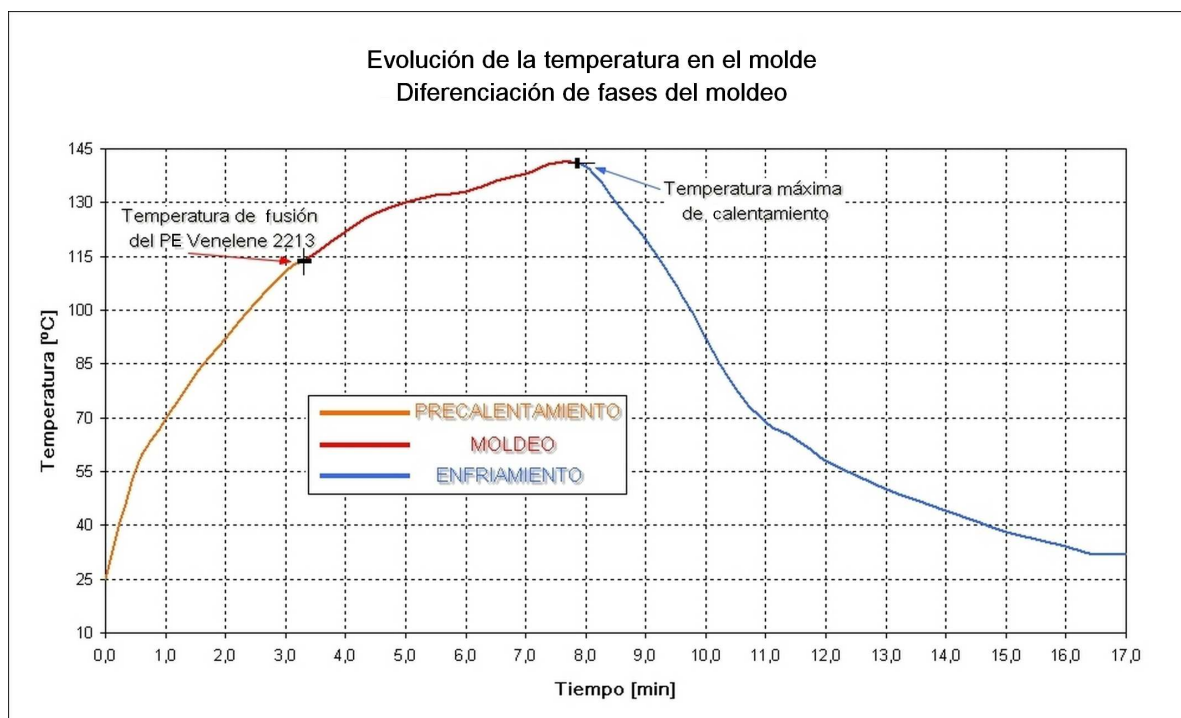


Figura 4.5. Evolución de la temperatura dentro del molde de acero. Diferenciación de las tres fases del moldeo por compresión.

### **4.3.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE PLACAS ELABORADAS USANDO DIFERENTES PARÁMETROS**

Como se describe en el apartado 3.3.2.2.2, se debe probar las placas sin fallos obtenidas con diferentes parámetros de modo que se pueda seleccionar los parámetros que involucren el menor gasto energético de procesamiento y las mejores propiedades mecánicas. En la tabla 3.6 se enumeró las placas, con sus respectivas denominaciones, que se elaboraron para poder dirimir entre sus características de fabricación. En este apartado se presenta los resultados de los ensayos mecánicos a los que fueron sometidos cada placa.

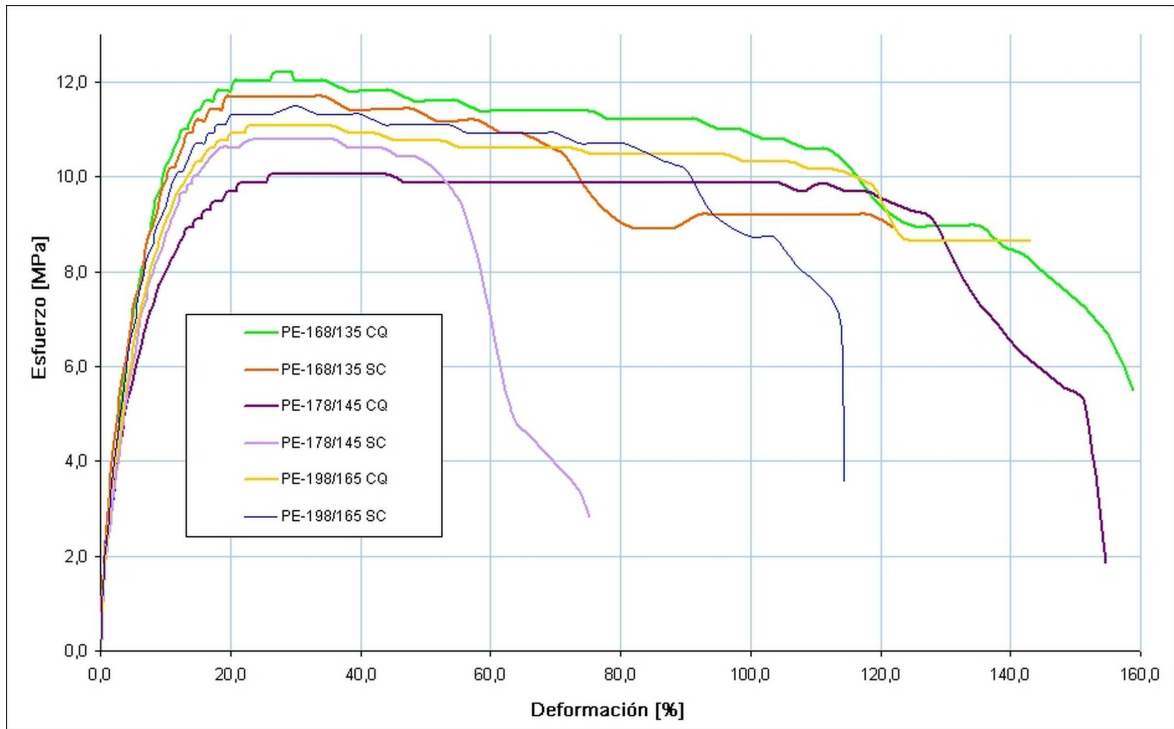
En la tabla 4.3 se presentan las propiedades mecánicas de tracción como función de las temperaturas de las placas calefactoras en el moldeo por compresión de polietileno, y las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a una probeta representativa de cada combinación de temperaturas se muestra en la figura 4.6. La aplicación de presión se mantiene en la fabricación de las placas mientras se varían las temperaturas manteniendo la diferencia de treinta y tres grados entre cada par. Además se evalúa el efecto del control de flujo de agua de enfriamiento sobre las propiedades mecánicas finales.

Es importante indicar que, para que puedan compararse los módulos de Young del polietileno y los materiales compuestos obtenidos, se estableció que su determinación se hará en este estudio a base de los valores de esfuerzo y deformación correspondientes al 25 y 75% del esfuerzo máximo que alcanzó la probeta en su respectivo ensayo a tracción.

Tabla 4.3. Resultados de los ensayos de tracción realizados sobre las placas de PE elaboradas con diferentes parámetros.

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	PE-168/135 CQ	PE-168/135 SC	PE-178/145 CQ	PE-178/145 SC	PE-198/165 CQ	PE-198/165 SC
ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [MPa]	11,350	11,500	10,290	11,170	10,960	11,190
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,100	0,503	0,170	0,434	0,589	0,582
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [MPa]	83,348	93,276	73,334	80,100	82,092	77,894
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	16,639	19,397	8,341	11,491	8,120	7,814
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	23,600	20,910	26,870	22,510	22,240	24,770
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,790	3,725	3,860	2,927	2,114	1,642
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	131,100	139,500	171,700	126,100	135,800	165,900
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	21,700	30,930	12,100	52,700	31,820	46,550
<u># PROBETA ANALIZADA</u>	<i>1</i>	<i>7</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>6</i>
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	12,218	11,678	10,059	10,800	11,084	11,513
MÓDULO YOUNG [MPa]	91,584	85,492	68,488	78,713	81,373	86,389
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	29,362	34,828	44,003	35,905	35,570	29,930
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	158,902	121,920	154,635	75,275	142,951	114,300

Leyenda: PE-X/Y SC(CQ)Z = Placa de polietileno obtenida con temperatura de la placa calefactora superior = X°C , temperatura de la placa calefactora inferior = Y°C, sin control de caudal del agua de enfriamiento (con control), número Z.



Legenda: *PE-X/Y SQ (CQ) = Placa de polietileno obtenida con temperatura de la placa calefactora superior = X°C, temperatura de la placa calefactora inferior = Y°C. Sin control de caudal del agua de enfriamiento (SC) o con control (CQ).*

Figura 4.6. Curvas esfuerzo vs. deformación de probetas representativas de cada grupo de placas fabricadas con diferentes parámetros de procesamiento.

#### 4.3.4. SELECCIÓN DE PARÁMETROS PARA CADA ETAPA DEL MOLDEO

De los resultados presentados en la tabla 4.3 y la figura 4.6 se puede concluir que la elevación en la temperatura de las placas de la prensa calefactora no mejora las propiedades mecánicas de tracción de las placas resultantes, tanto el esfuerzo máximo, la deformación correspondiente a este y el módulo de elasticidad no presentan diferencias. Una ventaja importante es el tiempo de procesamiento, pues al elevar las temperaturas de las placas el tiempo que necesita el molde para alcanzar las temperaturas de moldeo será relativamente menor. Este comportamiento se puede observar en la gráfica de la figura 4.7.

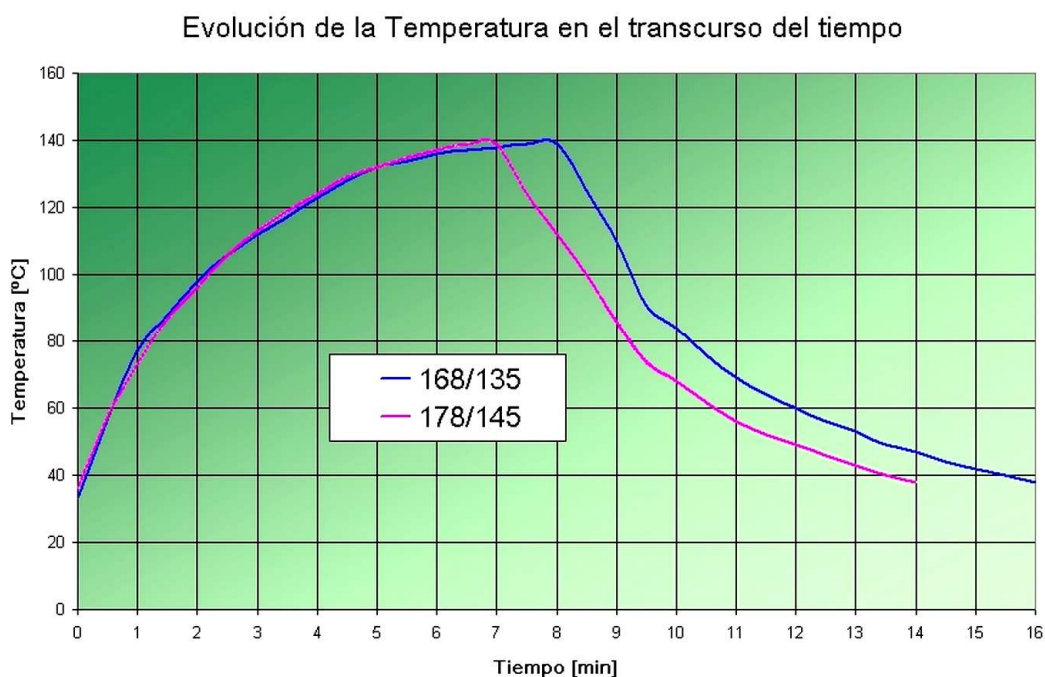


Figura 4.7. Comparación entre dos condiciones de evolución de temperatura en el molde con temperaturas diferentes en las placas calefactoras.

Como se puede observar en la gráfica, conforme aumenta la temperatura el tiempo para alcanzar la temperatura de fusión es menor. El criterio para utilizar este principio para reducir los costos de fabricación tiene que ver con la factibilidad para alcanzar temperaturas más altas sin ocasionar gastos energéticos mayores. Bajo este preámbulo se decidió optar por las mínimas necesidades de utilización de energía incluida en la fabricación de materiales. Es decir, se escogió las temperaturas y presiones más bajas que permitan obtener materiales con buenas características finales, en este caso con temperatura de la placa superior de 168°C y de la inferior de 135°C.

El mismo criterio primó a la hora de decidir la conveniencia o no de la utilización del equipo de baño térmico para el enfriamiento. Si bien por una parte es importante para un estudio el tener la mayor cantidad de variables controladas, si este control no mejora las condiciones de procesamiento ni garantiza uniformidad en los resultados finales, más bien complica la obtención de materiales de buena calidad y encarece el proceso. De los resultados presentados se observa que el enfriamiento sin control de caudal ofrece resultados semejantes a los que da un

enfriamiento controlado, por lo tanto se optó por el primero por ser más sencillo y económico.

#### **4.4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DEL COMPUESTO**

##### **4.4.1. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN Y OBTENCIÓN DE PLACAS**

Para la fabricación de placas de compuesto se tomaron en cuenta las consideraciones hechas en el acápite 3.4.1 y las operaciones descritas en el diagrama de flujo de la figura 3.14. Es decir, se partió de los parámetros de fabricación de placas de polietileno y se varió la presión de modo que las dos placas del compuesto puedan fundirse una con la otra atrapando en la mitad al material de refuerzo.

Para el caso se ensayó algunas presiones de trabajo, de las cuales las únicas que permitieron fabricar compuestos con buen encapsulamiento de fibras y sin desperdicio mayor de polietileno fundido fueron dos:

- a) Presión de precalentamiento y moldeo con fuerza de 2000 lbf y de enfriamiento de 2500 lbf. y,
- b) Presión de precalentamiento y moldeo con fuerza de 3000 lbf y de enfriamiento de 4000 lbf.

Se esperaba que la segunda opción podría facilitar la obtención de mejores características y propiedades mecánicas, pues se contaría con un mayor grado de compactación de las fibras y la matriz; sin embargo, se recurrió a pruebas y ensayos mecánicos para poder dilucidar esta duda y establecer los parámetros de procesamiento de los compuestos.



#### 4.4.2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS SOBRE LAS PLACAS DE COMPUESTO PARA LA SELECCIÓN DE LOS MEJORES PARÁMETROS

En la tabla 4.4 se presentan los resultados de los ensayos de tracción sobre probetas de materiales compuestos con composiciones másicas uniformes de 30% de fibras de 20 mm de largo dispuestas aleatoriamente sobre la matriz polietilénica. La denominación PARCOMP1 identifica a materiales obtenidos con presión de precalentamiento y moldeo de 2000 lbf, y de enfriamiento de 2500 lbf; mientras que el PARCOMP2 con presiones de 3000 y 4000 lbf respectivamente.

Tabla 4.4. Propiedades mecánicas a tracción de muestras de materiales compuestos obtenidos con diferentes parámetros de fabricación.

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	PARCOMP 1	PARCOMP 2
ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [MPa]	12,390	12,690
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,300	1,930
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	4,525	5,518
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	10,210	11,880
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [MPa]	370,611	304,000
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	38,944	101,167
<u># PROBETA ANALIZADA</u>	<i>5</i>	<i>2</i>
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	14,438	12,815
MÓDULO YOUNG [MPa]	388,049	287,165
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	4,420	6,086
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	5,436	8,108

Utilizando esta información se determinó utilizar los parámetros menos demandantes, es decir los de las muestras del grupo denominado *parcomp1* (es decir con una presión de 0.589 MPa (2000 lbf) en la fase de precalentamiento y moldeo, y de 0.737 MPa (2500 lbf) en la fase de enfriamiento). Esto se debe a que no existen diferencias significativas en los valores alcanzados de esfuerzo máximo. El módulo de Young (como se puede ver en la figura 4.8), en las muestras tomadas como representativas de cada grupo de análisis, se presenta mayor utilizando los parámetros escogidos. Además, al optar por este tipo de manufactura se evita tener problemas de trabas del material en el molde metálico ya que se usan presiones más bajas.

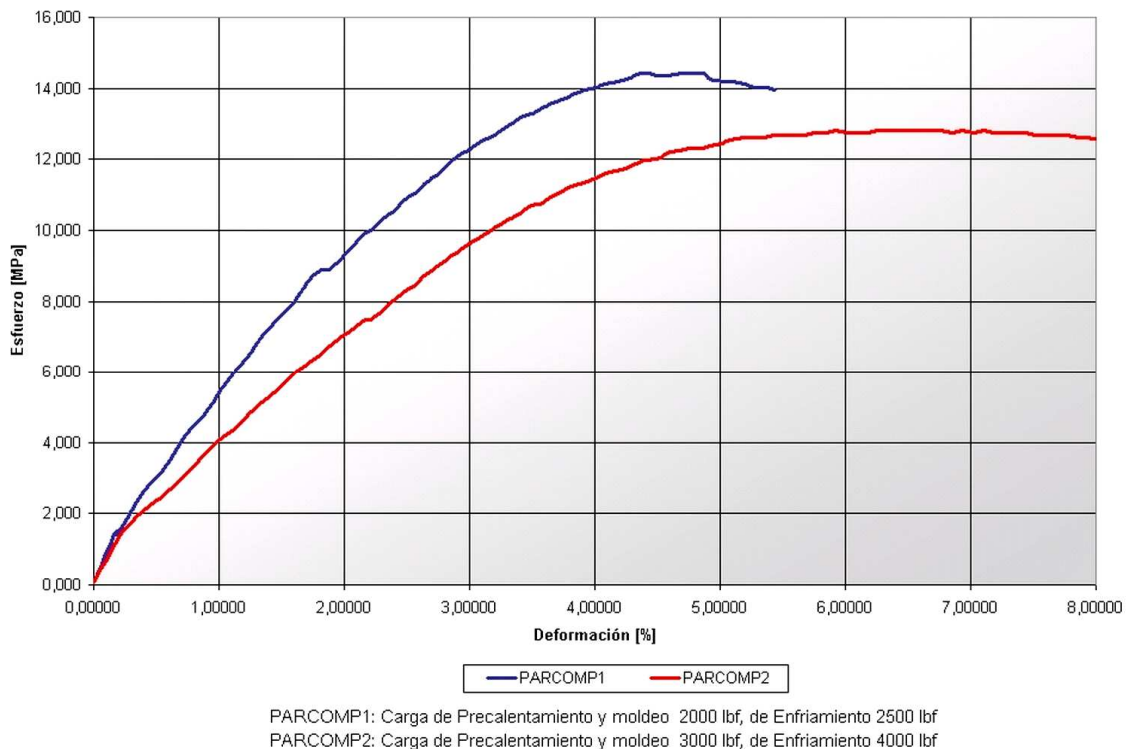


Figura 4.8. Curvas esfuerzo vs. deformación de muestras de materiales compuestos obtenidos con diferentes parámetros de fabricación.

## 4.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS OBTENIDOS

### 4.5.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y flexión de las muestras de compuestos de acuerdo al plan que se describió en el acápite 3.4.2, específicamente en la tabla 3.8. En la figura 4.9 se observan muestras al momento de ser ensayadas en la máquina universal de ensayos marca Instron, tanto a tracción como a flexión. Además, en la figura 4.10 se observa una vista de cada ejemplar de las probetas correspondientes a cada composición y tipo de refuerzo utilizadas en este estudio.



Figura 4.9. Muestras ensayadas a tracción y flexión en la máquina universal de ensayos marca Instron de donde se obtuvo los resultados de este estudio.



Figura 4.10. Probetas ensayadas a tracción de diferentes tipos de refuerzo y fracción másica

#### 4.5.1.1. Resultados de ensayos de tracción

Las tablas desde la 4.5 hasta la 4.9 contienen los valores promedio de esfuerzo máximo de cada ensayo de tracción de compuestos con un tipo particular de refuerzo (fibras cortas de 10, 20 y 30 mm, fibras continuas y tejidos bidimensionales) en diferentes composiciones y se comparan en todos los casos con el material de matriz sin refuerzos (polietileno). Además, para una probeta representativa de cada grupo, se indica los valores de esfuerzo máximo y módulo de Young, y se muestran las curvas esfuerzo-deformación en las figuras desde la 4.11 hasta la 4.14.

Para las probetas de materiales compuestos reforzados con fibras cortas de 10 mm de largo se puede observar en la tabla 4.5 que, en lo referente al módulo de elasticidad en tracción, los compuestos con 25% y 35% de fracción másica de fibra presentan valores altos con respecto al polietileno, de hasta 4 y 5 veces más que los que presenta la matriz. Por otro lado, el esfuerzo máximo de los compuestos es bajo con fracciones de 15% y 25%, y con 35% apenas equipara los valores del esfuerzo al pico del polietileno.

Como se puede observar en la tabla 4.5 los valores de deformación no varían proporcionalmente con la presencia mayor o menor de la fibra en los compuestos cuando se trata de fibras cortas. Se registran los valores de deformación tanto cuando la probeta alcanza el esfuerzo más alto como cuando esta se rompe, aunque este último valor es bastante difícil de distinguir debido a que en el lugar donde comienza la fractura no siempre quedan resistiendo la carga el mismo número de fibras. A pesar de que realizando una distribución al azar se busca garantizar condiciones de cuasi-isotropía en los materiales que se reforzaron con fibras cortas es difícil reproducir la posición de los refuerzos en la sección de rotura en todas las probetas ensayadas.

Tabla 4.5. Resultados de ensayos de tracción sobre muestras de materiales compuestos reforzados con fibras cortas de 10 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE.

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-15%-10	COM-25%-10	COM-35%-10	PE-SR-PO
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	9,600	7,202	10,943	11,500
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,469	1,838	1,888	0,503
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	156,162	306,527	398,787	93,276
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	13,175	42,273	67,527	19,397
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	5,404	2,896	4,484	20,910
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	10,136	7,068	11,131	139,500
<u># PROBETA ANALIZADA</u>	<i>1</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<i>7</i>
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	8,238	8,925	10,955	11,678
MÓDULO YOUNG [MPa]	166,419	360,055	445,365	85,492
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	6,624	2,946	3,617	34,828
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	14,620	13,960	15,626	121,920

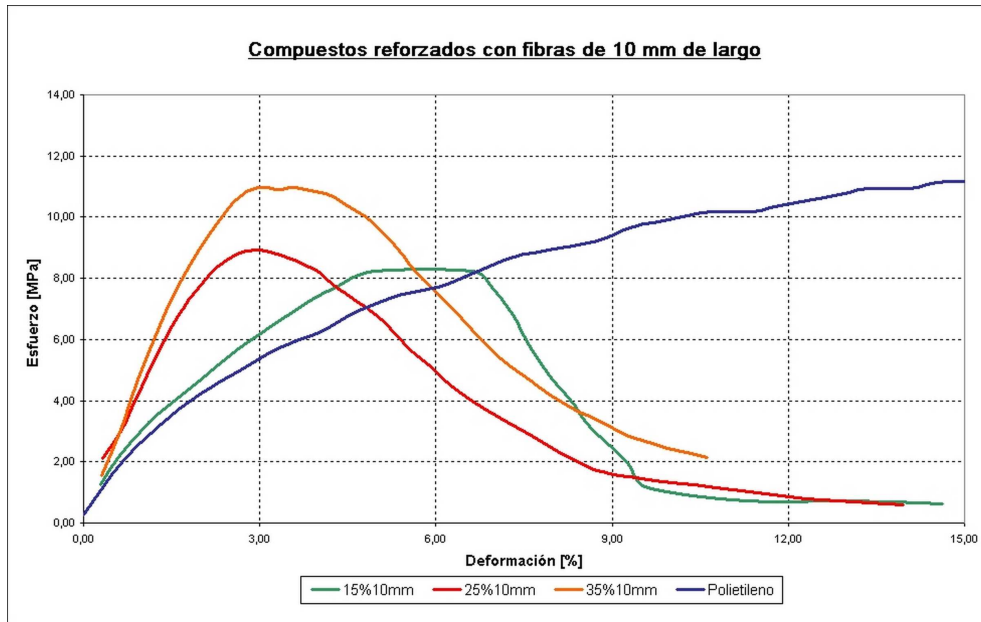


Figura 4.11. Curvas esfuerzo-deformación en tracción de compuestos reforzados con fibras cortas de 10 mm de largo dispuestas al azar en la matriz de PE.

Según lo indica la tabla 4.6, para compuestos reforzados con fibras cortas de 20 mm de largo, se observa que el módulo de Young tiene valores de 3, 4,5 y 4 veces más altos que la matriz, lo que indica que en todos los casos las fibras mejoran esta característica en el material resultante. A partir del 25% de composición el esfuerzo máximo también se eleva, en un 13% con el 25% de composición y en un 20% con el 35% de composición. Cabe resaltar el desempeño del material con un 25% de fibras puesto que es el que más alto valor de módulo presenta. Esta repuesta favorable con en esta fracción másica es semejante, según lo indican los resultados obtenidos por Juan Carlos Páez, con compuestos de matriz de polipropileno, en la cual el material de 30% de fracción másica con fibras de 20 mm alcanzó las mejores propiedades mecánicas en su grupo. (Módulo de Young de 1110 MPa y esfuerzo máximo de 38,45 MPa)

Las deformaciones, en el caso de materiales reforzados con fibras cortas de 10, 20 y 30mm, no tienen ningún patrón de comportamiento que indique que este cambia con la fracción másica utilizada. (Ver tablas 4.5, 4.6 y 4.7). Sin embargo si se aprecia un progresivo aumento de la deformación a la rotura de aproximadamente un 10% en cada caso según se usa refuerzos más largos.



Tabla 4.6. Resultados de ensayos de tracción sobre muestras de materiales compuestos reforzados con fibras cortas de 20 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE.

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-15%-20	COM-25%-20	COM-35%-20	PE-SR-PO
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	8,801	12,759	12,570	11,500
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,342	1,102	2,042	0,503
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	246,577	373,712	365,968	93,276
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	29,679	7,508	62,965	19,397
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	5,352	4,604	4,684	20,910
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	11,688	10,404	10,688	139,500
# PROBETA ANALIZADA	1	5	5	7,000
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	9,413	13,113	14,061	11,678
MÓDULO YOUNG [MPa]	263,714	384,147	373,410	85,492
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	6,269	3,942	5,629	34,828
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	12,619	15,626	15,972	121,920

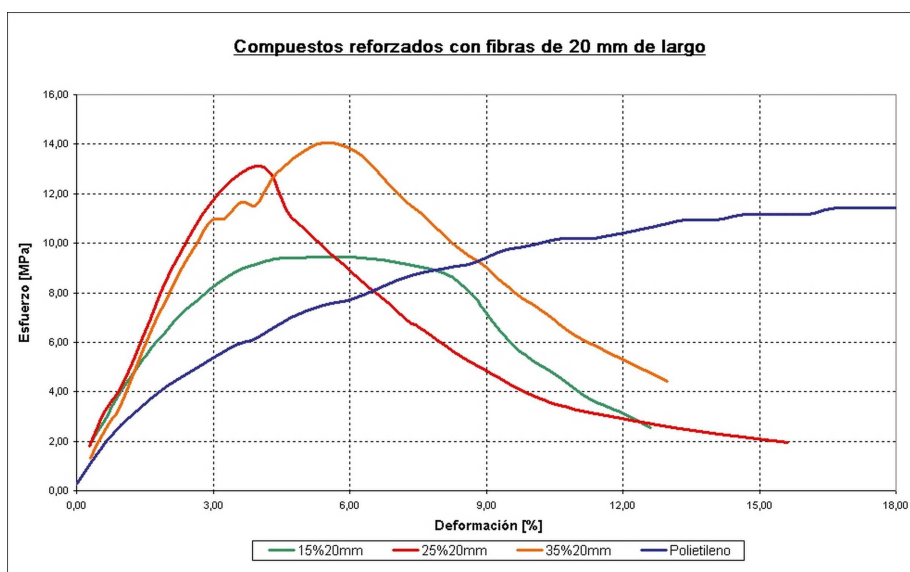


Figura 4.12. Curvas esfuerzo-deformación en tracción de compuestos reforzados con fibras cortas de 20 mm de largo dispuestas al azar en la matriz de PE.

Tabla 4.7. Resultados de ensayos de tracción sobre muestras de materiales compuestos reforzados con fibras cortas de 30 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE.

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-15%-30	COM-25%-30	COM-35%-30	PE-SR-PO
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	10,844	13,426	14,777	11,500
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,244	2,141	1,731	0,503
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	274,546	347,079	406,011	93,276
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	21,259	59,117	75,897	19,397
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	6,272	5,028	4,944	20,910
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	13,488	13,100	11,839	139,500
# PROBETA ANALIZADA	5	3	3	7,000
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	11,581	13,395	14,262	11,678
MÓDULO YOUNG [MPa]	260,559	288,772	429,426	85,492
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	6,919	6,634	4,592	34,828
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	13,940	14,976	17,628	121,920

Analizando materiales reforzados con fibras de 30 mm de largo por medio de la tabla 4.7, se observa que los módulos de Young aumentan en estos compuestos (4 veces mayores que los de la matriz con refuerzo del 25% de abacá). Cuando la fracción másica es el 35% que llega a ser 5,5 veces el módulo original y presenta además un aumento del 20% aproximadamente del esfuerzo máximo.

El compuesto reforzado con fibras entrelazadas o configuradas en un tejido bidimensional presenta un aumento del 50% en el módulo de Young y 10% en el esfuerzo máximo, nada despreciable considerando que no se controló la orientación de este tejido y la composición resultante de este material fue de apenas el 3,5% de fibra. (Ver tabla 4.8 y figura 4.13) Esto despierta la posibilidad de encontrar buenos resultados en futuros estudios sobre este tipo de refuerzos.



Tabla 4.8. Resultados de ensayos de tracción sobre muestras de materiales compuestos reforzados con una capa intermedia de tejido bidimensional de fibras.

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-CU-TB	PE-SR-PO-1
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	12,511	11,500
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,589	0,503
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	142,880	93,276
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	17,340	19,397
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	16,236	20,910
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	37,456	139,500
# PROBETA ANALIZADA	5	7,000
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	14,042	11,678
MÓDULO YOUNG [MPa]	125,480	85,492
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	10,942	34,828
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	29,972	121,920

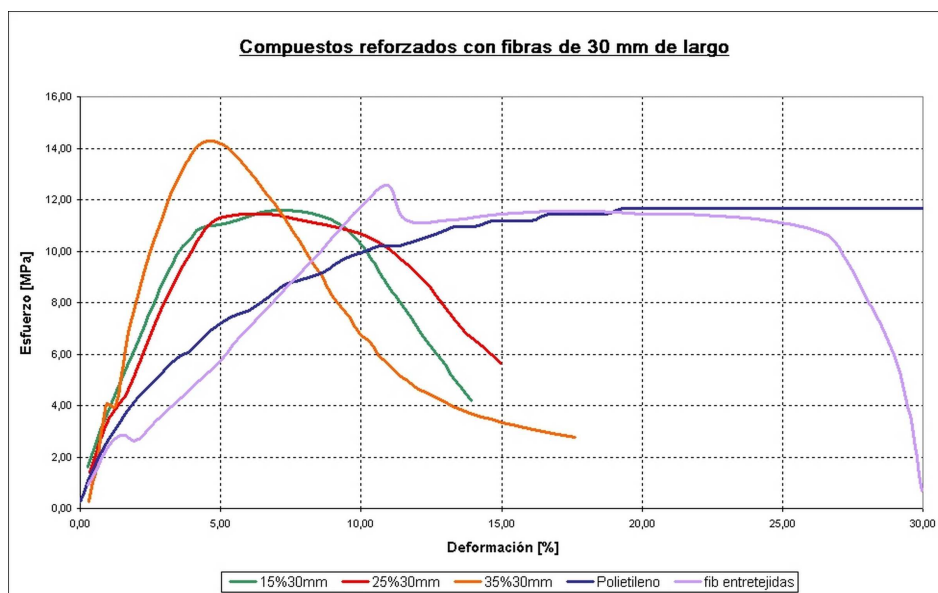


Figura 4.13. Curvas esfuerzo-deformación en tracción de compuestos reforzados con fibras cortas de 30 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE y compuestos reforzados con un tejido bidimensional.

En este punto se debe resaltar que en los compuestos, según aumenta el tamaño de los refuerzos utilizados en cada uno, se obtiene mayores deformaciones a la rotura y la curva esfuerzo-deformación va cambiando de extensión y abarca progresivamente más área según se puede ver en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13.

Como era de esperarse, en los compuestos en los cuales se dispone la carga en dirección de fibras continuas se obtuvo los resultados más altos con respecto a todos los grupos, como se puede ver en la tabla 4.9. A pesar de que todos los valores de esfuerzo máximo son sumamente altos, se destaca el mayor que se alcanza con la composición de 30%, que sin embargo es apenas el 16% del esfuerzo máximo de las fibras de abacá, lo que indica la baja compatibilidad y adhesión con la que cuentan estas fibras con el polietileno. El módulo de Young también es bastante alto considerando que en este tipo de materiales los refuerzos trabajan de excelente manera para volver altamente rígido al compuesto, debido principalmente a su orientación y continuidad.

En lo que tiene que ver con las deformaciones, las correspondientes al esfuerzo máximo aumentan hasta en un 50% con respecto a las presentadas en los materiales reforzados con fibras cortas de 10, 20 y 30 mm y aumentan hasta en un 100% en el caso de la deformación de rotura. Estos valores son muestra también de el mejor desempeño de estos materiales, pues en este caso el material absorbe energía a través de la deformación adoptada al ser cargado son fuerzas de tracción.

Tabla 4.9. Resultados de ensayos de tracción sobre muestras de materiales compuestos reforzados con fibras unidireccionales continuas.

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-15%-CN	COM-25%-CN	COM-35%-CN	PE-SR-PO
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	24,462	92,739	102,287	11,500
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	5,974	29,553	32,985	0,503
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	467,730	1468,120	1667,159	93,276
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	77,373	363,370	208,861	19,397
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	6,324	8,240	10,320	20,910
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	32,400	66,240	60,800	139,500
# PROBETA ANALIZADA	1	3	4	7,000
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	23,668	104,029	119,835	11,678
MÓDULO YOUNG [MPa]	472,030	1776,391	1841,437	85,492
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	6,604	7,295	9,642	34,828
DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	35,641	54,620	40,315	121,920

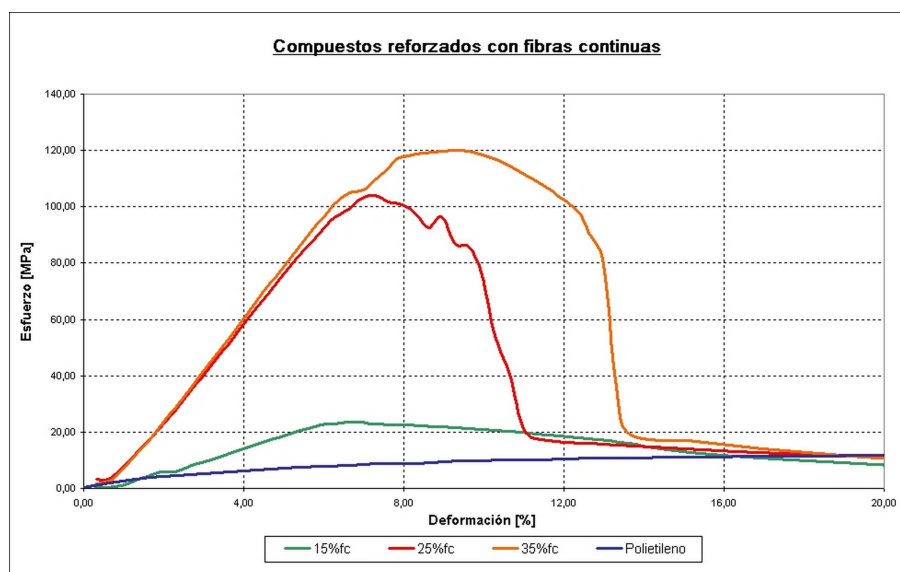


Figura 4.14. Curvas esfuerzo-deformación en tracción de compuestos reforzados con fibras continuas uniformemente dispuestas sobre la matriz de PE.

#### 4.5.1.2. Resultados de ensayos de flexión

Según lo requiere la norma ASTM D5943 – 96, usada en estas pruebas, se despliega la información correspondiente en las tablas que se presentan a continuación como resúmenes de los valores que se calcularon y obtuvieron por medio de las pruebas y que se presentan en como ejemplo el anexo 5.2. En esta norma se indica que para que los resultados sean válidos se debe ensayar al menos cinco probetas de cada tipo de material, sin embargo en algunos casos fue necesario trabajar con hasta diez especímenes debido a problemas operativos como deslizamientos de las probetas sobre los puntos de apoyo que arrojaron resultados erróneos.

En las tablas se muestran los valores promedio de esfuerzo máximo de cada ensayo de flexión de compuestos con un solo tipo de refuerzo con las tres fracciones másicas probadas en este estudio comparados con los de la matriz. Se muestra para una probeta representativa de cada grupo los valores de esfuerzo máximo (al pico), la deformación correspondiente al esfuerzo al pico, el esfuerzo correspondiente al 5% de la deformación de la probeta y módulo de Young a flexión, y se muestran las curvas esfuerzo-deformación en las figuras correspondientes.

Para determinar los valores de esfuerzo a flexión se utilizó la expresión 4.1 citada en la norma antes indicada, de igual manera para determinar la deformación que se indica en las tablas se usó la expresión 4.2. Se debe notar que esta deformación posee diferentes características a la determinada en los ensayos de flexión debido a la variación dimensional que sufren los materiales cuando se aplican estos tipos de carga. Cuando se trata de un material sometido a esfuerzos de tracción se debe considerar un alargamiento o aumento de longitud en dirección de la aplicación de la carga dad generalmente en forma de fracción con respecto a la longitud original, mientras que en el caso de aplicación de cargas de flexión, el material “flejará” en dirección de la carga, siendo la deformación función de esta deflexión, de la distancia entre los apoyos y del espesor del material como se puede apreciar en las siguientes expresiones.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.1)$$

Donde  $\sigma_f$  es el módulo de elasticidad a flexión [MPa], F es la carga [kN], L es la separación entre apoyos [mm], b es el ancho de la probeta [mm] (en este caso 10 mm), y h es el espesor de cada muestra [mm].

$$\varepsilon_f = \frac{6hS}{L^2} \quad (4.2)$$

Donde  $\varepsilon_f$  es la deformación por flexión de la probeta [mm/mm] y S es la deflexión en dirección de la carga [mm].  $\varepsilon_f$  indica la deformación que experimenta la muestra con una debida distancia entre apoyos al aplicársele cargas de flexión.

Como se observa en las figura 4.15 y tabla 4.10, la utilización de refuerzo de fibras cortas de 10 mm dispuestas al azar mejora el Módulo de Young entre un 5 y 10 %, incrementa el valor del esfuerzo al pico excepto en la composición del 35% que mantiene valores similares al polietileno solo, esto se debe a que la fracción másica es elevada y no permite una mejor compactación del material y no permite continuidad en la composición. El incremento de los esfuerzos correspondientes al 5% de la deformación en los compuestos muestran un gran aumento de la rigidez en la zona elástica de la curva esfuerzo versus deformación, por lo tanto el módulo de Young será mucho mayor en esta zona para los materiales compuestos. En lo referente a las deformaciones al pico se puede observar que estas son levemente superiores a las del polietileno tanto en los promedios, como en las de las probetas seleccionadas, esto se produce por una mayor discontinuidad del material al estar incrustado con fibras cortas.

Tabla 4.10. Resultados de ensayos de flexión sobre muestras de materiales compuestos reforzados con fibras cortas de 10 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE.

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-15%-10	COM-25%-10	COM-35%-10	PE-SR-PO
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	18,520	17,780	13,160	13,450
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2,760	2,230	1,158	4,417
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	185,269	179,456	187,444	136,600
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	39,923	41,371	68,778	60,880
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [m/m]	0,0460	0,0455	0,0473	0,0332
# PROBETA ANALIZADA	2	6	5	3
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	18,415	18,817	11,607	14,618
ESFUERZO @5% DEFORMACIÓN	14,468	13,282	9,354	9,745
MÓDULO YOUNG [MPa]	171,548	170,771	236,730	162,024
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	11,910	12,698	8,664	8,600

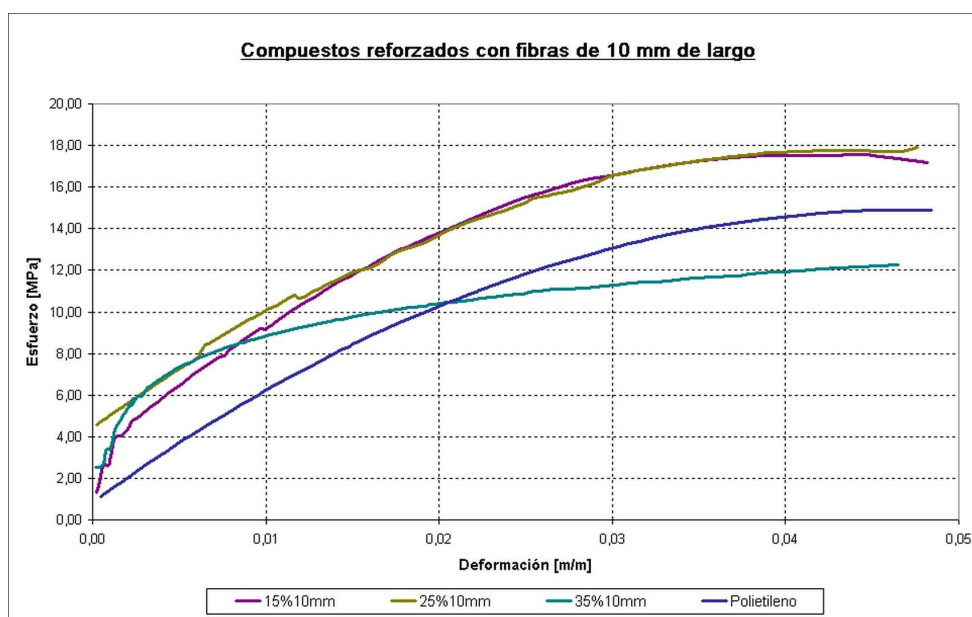


Figura 4.15. Curvas esfuerzo-deformación en flexión de compuestos reforzados con fibras cortas de 10 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE.

Tabla 4.11. Resultados de ensayos de flexión sobre muestras de materiales compuestos reforzados con fibras cortas de 20 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE.

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-15%-20	COM-25%-20	COM-35%-20	PE-SR-PO
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	16,930	23,240	21,300	13,450
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,110	2,370	2,060	4,417
MÓDULO DE YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	210,932	219,692	221,534	136,600
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	30,561	34,615	23,160	60,880
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [m/m]	0,0428	0,0457	0,0464	0,033
# PROBETA ANALIZADA	1	4	7	3
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	18,231	22,560	20,720	14,618
ESFUERZO @5% DEFORMACIÓN	10,420	15,024	15,545	9,745
MÓDULO YOUNG [MPa]	188,496	199,460	224,226	162,024
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	6,269	3,942	5,629	8,600

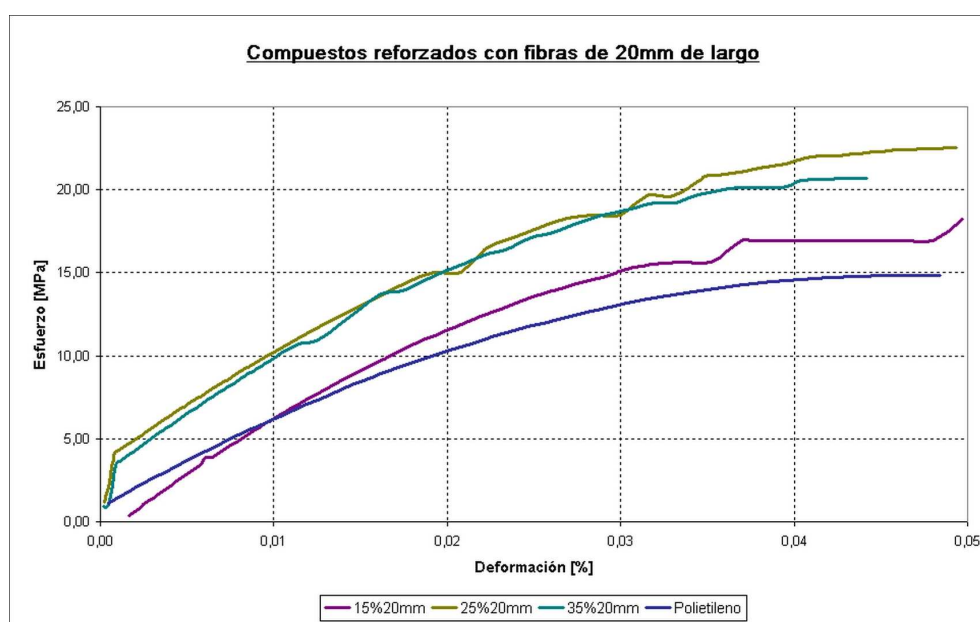


Figura 4.16. Diagrama esfuerzo-deformación en flexión de compuestos reforzados con fibras cortas de 20 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE.

Para los compuestos con refuerzos de 20 mm de largo se observa, según la figura 4.16, incrementos del 20, 50 y 40% en el esfuerzo al pico para fracciones másicas del 15, 25 y 35% respectivamente. El módulo de Young aumenta en tasas superiores al 25%, llegando hasta el 40% en la fracción del 35%, es decir son superiores a los módulos determinados para compuestos reforzados con fibras de 10 mm de largo. Los esfuerzos correspondientes al 5% de la deformación son altos excepto el de la fracción del 15% que es similar al del polietileno solo, pero el módulo (calculado entre el 25 y 75% del esfuerzo al pico) es superior. Las deformaciones al pico no son diferentes considerablemente con las del polietileno.

En los elementos reforzados con fibras cortas de 30 mm de largo se observa comportamientos semejantes a los reforzados con fibras de 10 y 20 mm, incluso se muestran menos efectivos que las fibras de 20 mm de largo para este tipo de trabajo. No presentan grandes diferencias entre compuestos de diferentes fracciones másicas, a pesar de que levemente destaca el de 25% de fracción.

Tabla 4.12. Resultados de ensayos de flexión sobre muestras de materiales compuestos reforzados con fibras cortas de 30 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-15%-30	COM-25%-30	COM-35%-30	PE-SR-PO
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	16,720	20,550	18,890	13,450
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,200	1,470	2,065	4,417
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	193,427	223,810	252,385	136,600
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	34,552	32,667	84,962	60,880
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [m/m]	0,0453	0,0453	0,0425	0,033
# PROBETA ANALIZADA	1	4	7	3
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	18,231	22,560	20,720	14,618
ESFUERZO @5% DEFORMACIÓN	10,420	15,024	15,545	9,745
MÓDULO YOUNG [MPa]	188,496	199,460	224,226	162,024
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	6,919	6,634	4,592	8,600



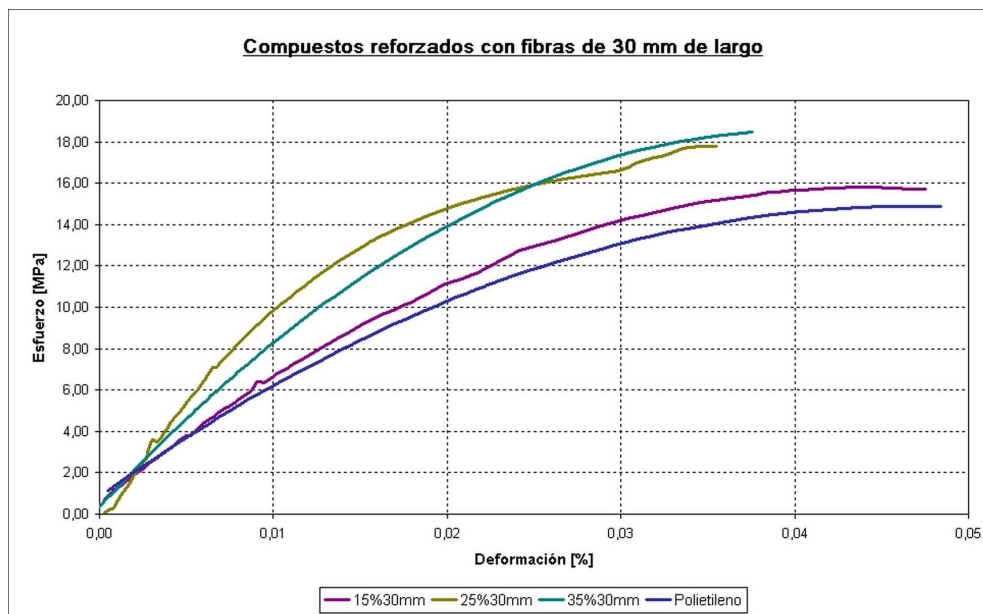


Figura 4.17. Curvas esfuerzo-deformación en flexión de compuestos reforzados con fibras cortas de 30 mm de largo dispuestas al azar sobre la matriz de PE.

Tabla 4.13. Resultados de ensayos de flexión sobre muestras de materiales compuestos reforzados con fibras continuas dispuestas uniformemente sobre la matriz de PE

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-15%-CN	COM-25%-CN	COM-35%-CN	PE-SR-PO
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	27,680	33,320	37,550	13,450
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	3,100	5,610	7,570	4,417
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	220,073	285,275	506,851	136,600
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	84,073	64,198	141,369	60,880
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [m/m]	0,0476	0,0466	0,0338	0,033
# PROBETA ANALIZADA	8	10	2	3
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	27,391	36,097	38,703	14,618
ESFUERZO @5% DEFORMACIÓN	14,201	15,139	27,319	9,745
MÓDULO YOUNG [MPa]	197,664	275,460	539,731	162,024
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	6,604	7,295	9,642	8,600

Los materiales reforzados con fibras continuas tienen también un mejor desempeño a flexión que los compuestos reforzados con fibras cortas. En la figura 4.18 se observa un patrón claramente definido: mientras aumenta la fracción másica del compuesto, el módulo de elasticidad a flexión también aumenta, así como el esfuerzo al pico. En el caso de la fracción del 35% de fibras se llega a obtener un aumento del 160%, con una fracción de 25% un aumento del 140% y un aumento del 80% con una fracción del 15%. En lo referente al módulo los incrementos en su valor están en el orden del 230, 70 y 20% según se disminuye la fracción másica. La deformación no se incrementa sino se mantiene similar a la del polietileno. La ventaja de este tipo de refuerzos largos con respecto a los cortos se debe a la capacidad de trabajar dentro del compuesto tanto a tracción en la cara donde se solicita este esfuerzo.

El tejido bidimensional no mejora las propiedades de la matriz debido a que este se ubica cerca del eje neutro del material una vez que se somete a la carga de flexión, por lo tanto no soporta carga.

Tabla 4.14. Resultados de ensayos de flexión sobre muestras de materiales compuestos reforzados con tejidos bidimensionales

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	COM-CU-TB	PE-SR-PO-1
ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	13,500	13,450
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2,290	4,417
MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	73,719	136,600
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	6,594	60,880
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [m/m]	0,0916	0,033
# PROBETA ANALIZADA	3	3
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	11,363	14,618
ESFUERZO @5% DEFORMACIÓN	7,575	9,745
MÓDULO YOUNG [MPa]	61,585	162,024
DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	10,942	8,600

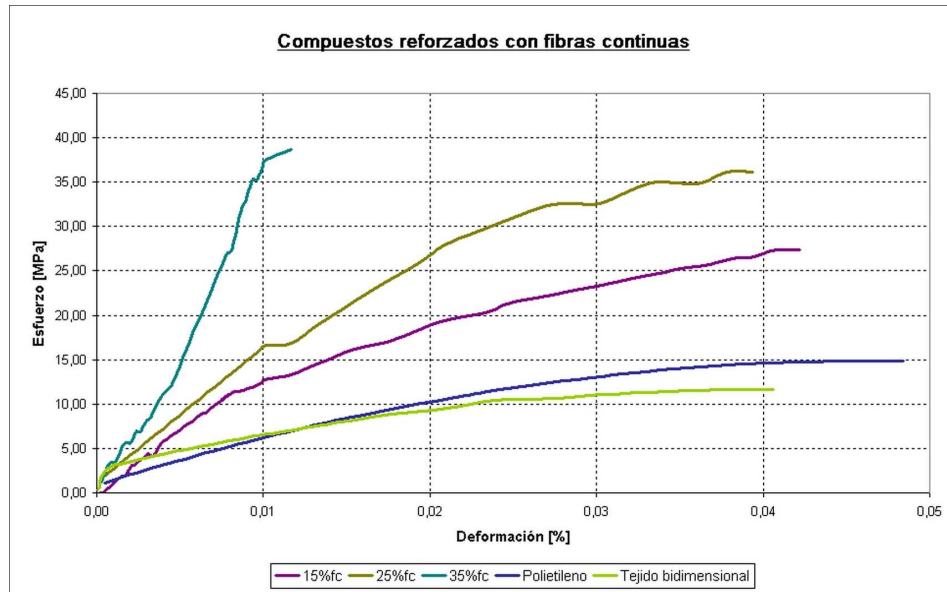


Figura 4.18. Curvas esfuerzo-deformación en flexión de compuestos reforzados con fibras cortas continuas dispuestas uniformemente sobre la matriz de PE.

Las probetas de estos materiales sometidos a flexión, al fallar, no llegaron a romperse excepto los materiales reforzados con fibras continuas y fibras cortas de 30 mm de largo, el resto quedó deformado como se puede observar en la figura 4.19. Esta característica en estos materiales se debe a la matriz polimérica que difícilmente se desgarró al ser sometida a cargas a flexión.



Figura 4.19. Probetas de materiales compuestos de polietileno y abacá luego de haber sido sometidos a esfuerzos de flexión.

## **4.5.2. PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS**

Como se indicó anteriormente, la importancia que tienen estas pruebas radica en la capacidad de describir plenamente las características de los materiales optimizados luego del proceso de investigación del proyecto. Estos datos tienen especial importancia para los nuevos estudios que se propongan a continuación, pues son parte de la información necesaria para su ejecución.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de densidad (norma ASTM D-792), dureza (norma ASTM D-2240) y absorción de agua (según la metodología empleada en el artículo presentado en el anexo 3) para caracterizar de esta manera los materiales.

### **4.5.2.1. Densidad**

En la tabla 4.15 se puede observar los resultados de las mediciones de densidad tomadas de muestras con masa cercana a 1 g según lo recomienda el procedimiento usado. Las probetas fueron tomadas de las muestras obtenidas para las pruebas de flexión que no fueron ensayadas. Los ensayos se realizaron pesando estas muestras en aire y en un medio líquido (alcohol isopropílico de densidad  $0,78328 \text{ g/cm}^3$  a  $21^\circ\text{C}$ ) según indica la norma ASTM D792.

De los resultados presentados en la tabla 4.15 y figura 4.19 se puede concluir que la densidad de los materiales no varía demasiado con respecto a la del polietileno. El mayor valor se obtiene en los compuestos de 25% de fibra de 30 mm (aproximadamente  $1 \text{ g/cm}^3$ ), mientras que densidades menores a la de la matriz se produce por una falta de compactación del material en donde se incluyen burbujas dentro del compuesto, mas se nota que en general las densidades no cambian demasiado con respecto a la del polietileno sea cual fuere el refuerzo.

Tabla 4.15. Densidad de los compuestos formulados.

DENOMINACIÓN PROBETAS	Densidad 1	Densidad 2	Densidad 3	DENSIDAD MEDIA [g/cm <sup>3</sup> ]	Desviación Estándar
COM-15%-10	0,9525	0,9860	0,9518	0,9634	0,0195
COM-25%-10	0,9811	0,9677	0,9632	0,9707	0,0093
COM-35%-10	0,9134	0,9173	0,9684	0,9330	0,0307
COM-15%-20	0,9558	0,9618	0,9546	0,9574	0,0039
COM-25%-20	0,9616	0,9494	0,9601	0,9570	0,0067
COM-35%-20	0,8928	0,8794	0,8743	0,8822	0,0096
COM-15%-30	0,9609	0,9480	0,9561	0,9550	0,0065
COM-25%-30	0,9826	1,0202	1,0193	1,0074	0,0215
COM-35%-30	0,8176	0,8232	0,8512	0,8307	0,0180
COM-15%-CN	0,9145	0,9311	0,9184	0,9213	0,0087
COM-25%-CN	0,9153	0,9135	0,9139	0,9142	0,0010
COM-35%-CN	0,9206	0,9298	0,9257	0,9254	0,0046
COM-CU-TB	0,9296	0,9271	0,9255	0,9274	0,0021
PE-SR-PO	0,9283	0,9293	0,9271	0,9283	0,0011

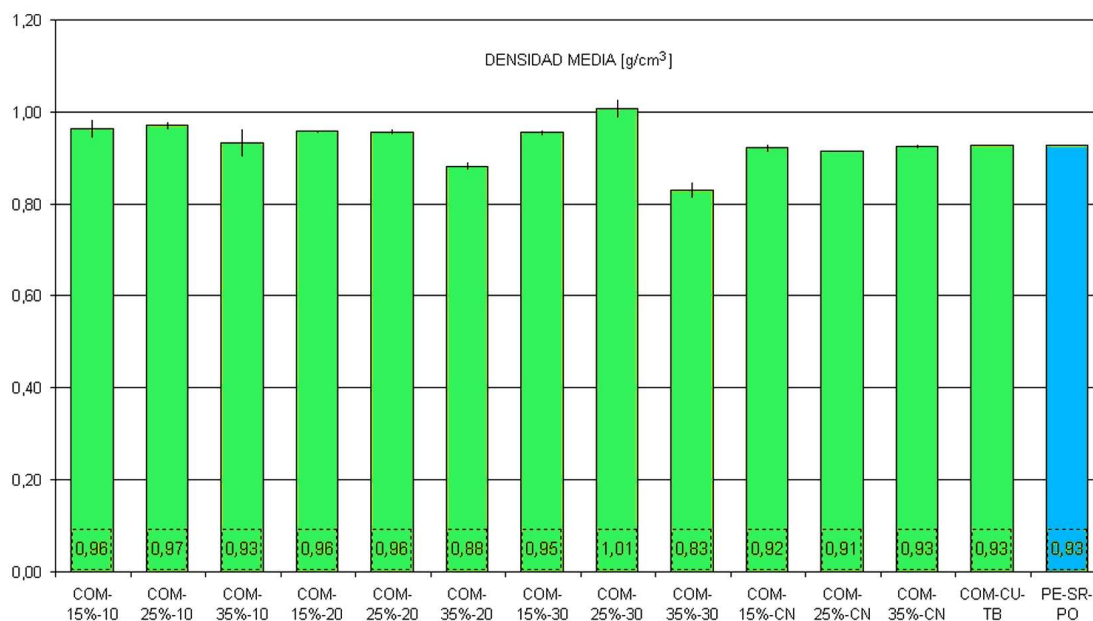


Figura 4.20. Resultados de variación de la densidad experimental en los materiales compuestos Abacá-Polietileno.

Estos resultados muestran errores en algunos casos pues se espera que la densidad de estos materiales compuestos sea mayor que la de la matriz debido a que la densidad del abacá es mayor que la del polietileno. Para determinar la

densidad de los compuestos se realizó un cálculo a utilizando la ley de mezclas partiendo de los valores de la densidad de los componentes y de la fracción másica de refuerzos sobre la matriz de cada material y su resultado se indica en la tabla 4.16.

Tabla 4.16. Valores teóricos de densidad de los compuestos obtenidos por medio de la ley de mezclas.

DENOMINACIÓN PROBETAS	VALORES EXPERIMENTALES	VALORES TEÓRICOS (ley de mezclas)	
	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Discrepancia
COM-15%-10	0,963	0,984	2%
COM-25%-10	0,971	1,021	5%
COM-35%-10	0,933	1,058	12%
COM-15%-20	0,957	0,984	3%
COM-25%-20	0,957	1,021	6%
COM-35%-20	0,882	1,058	17%
COM-15%-30	0,955	0,984	3%
COM-25%-30	1,007	1,021	1%
COM-35%-30	0,831	1,058	22%
COM-15%-CN	0,921	0,984	6%
COM-25%-CN	0,914	1,021	10%
COM-35%-CN	0,925	1,058	13%
COM-CU-TB	0,927	0,929	0%
PE-SR-PO	0,928	0,928	0%

#### 4.5.2.2. Dureza

En la tabla 4.17 se despliegan los valores medios de las durezas de los materiales formulados en escala Shore D. Como se confirma en los resultados, las durezas son similares a la del material de la matriz, principalmente debido a que el material está constituido en mayor parte de este, sobre todo en su periferie.

Tabla 4.17. Resultados de ensayos de determinación de la dureza de los compuestos.

DENOMINACIÓN PROBETAS	D1	D2	D3	D4	D5	DUREZA (SHORE D)	Desviación Estándar
COM-15%-10	58	54	58	54	57	56,20	2,05
COM-25%-10	56	61	61	59	58	59,00	2,12
COM-35%-10	56	46	59	57	61	55,80	5,81
COM-15%-20	55	51	55	54	56	54,20	1,92
COM-25%-20	57	57	57	58	57	57,20	0,45
COM-35%-20	52	48	56	58	50	52,80	4,15
COM-15%-30	52	55	50	55	58	54,00	3,08
COM-25%-30	59	56	60	55	55	57,00	2,35
COM-35%-30	56	55	54	48	57	54,00	3,54
COM-15%-CN	55	56	56	46	54	53,40	4,22
COM-25%-CN	51	50	53	52	48	50,80	1,92
COM-35%-CN	51	57	49	44	56	51,40	5,32
COM-CU-TB	50	56	51	57	57	54,20	3,42
PE-SR-PO	57	52	55	55	55	54,80	1,79

#### 4.5.2.3. Determinación de absorción de agua

Tomando como referencia el estudio de Juan Carlos Páez, se decidió poner en práctica el procedimiento no normalizado recomendado por Li et al. en su publicación de la Sociedad de Ingeniería en Agricultura, Alimentos y sistemas biológicos de Canadá, ASAE. El procedimiento básicamente indica que se debe determinar la masa de las muestras del material a evaluar en dos estados: primero luego de haberse secado y liberado de toda su humedad, y luego de haberse sumergido en agua destilada durante periodos de 15 y 60 minutos a temperatura ambiente (18°C). Para tres muestras diferentes se calcula la absorción de agua mediante la ecuación 4.3 en base porcentual o 4.4 en base másica.

$$M\% = \frac{M_1 - M_0}{M_1} 100 \quad (4.3)$$

$$Qm = \frac{1}{\rho_{H_2O}} \frac{M_1 - M_0}{M_0} \quad (4.4)$$

Donde:  $M\%$  es la variación de masa de la muestra debido a la absorción de agua en porcentaje [%],  $M_0$  es la masa de la muestra libre de humedad en gramos,  $M_1$  es la masa de la muestra después de haber sido sumergida también en gramos y  $\rho_{H_2O}$  es la densidad del agua destilada a 18°C (0.99862 g/cm<sup>3</sup>)

En la tabla 4.18 se puede observar los resultados del ensayo de absorción de agua que se obtuvieron luego de someter a probetas obtenidas con el troquel fabricado para obtener probetas rectangulares para el ensayo de flexión que sirvieron también para la determinación de densidad de las muestras (figura 3.15). En la figura 4.21 se observan, por medio de los valores medios de aumento de masa, la absorción de agua de las muestras de cada compuesto obtenido en este estudio, y se puede determinar mediante esta representación que la cantidad de agua absorbida en los materiales obtenidos aumenta cuando la fracción másica de material de refuerzo es mayor, y en menor proporción el mayor tamaño de las fibras incluidas en la matriz es influye para el aumento de la cantidad de humedad retenida en el material luego de estar sumergido.

Tabla 4.18. Resultados de ensayos de absorción de agua de los compuestos.

DENOMINACIÓN PROBETAS	M%@15min	Desv. Est.	Qm	Desv. Est.
COM-15%-10	1,949	0,727	0,020	0,007
COM-25%-10	3,757	2,936	0,038	0,029
COM-35%-10	5,676	0,858	0,057	0,009
COM-15%-20	2,610	1,315	0,026	0,013
COM-25%-20	6,152	0,783	0,062	0,008
COM-35%-20	6,392	2,945	0,064	0,029
COM-15%-30	3,653	0,607	0,037	0,006
COM-25%-30	4,164	1,894	0,042	0,019
COM-35%-30	7,250	3,447	0,073	0,035
COM-15%-CN	4,206	1,983	0,042	0,020
COM-25%-CN	9,910	0,005	0,099	0,002
COM-35%-CN	12,817	5,409	0,128	0,054
COM-CU-TB	1,770	0,003	0,018	0,005
PE-SR-PO	0,000	0,000	0,000	0,000



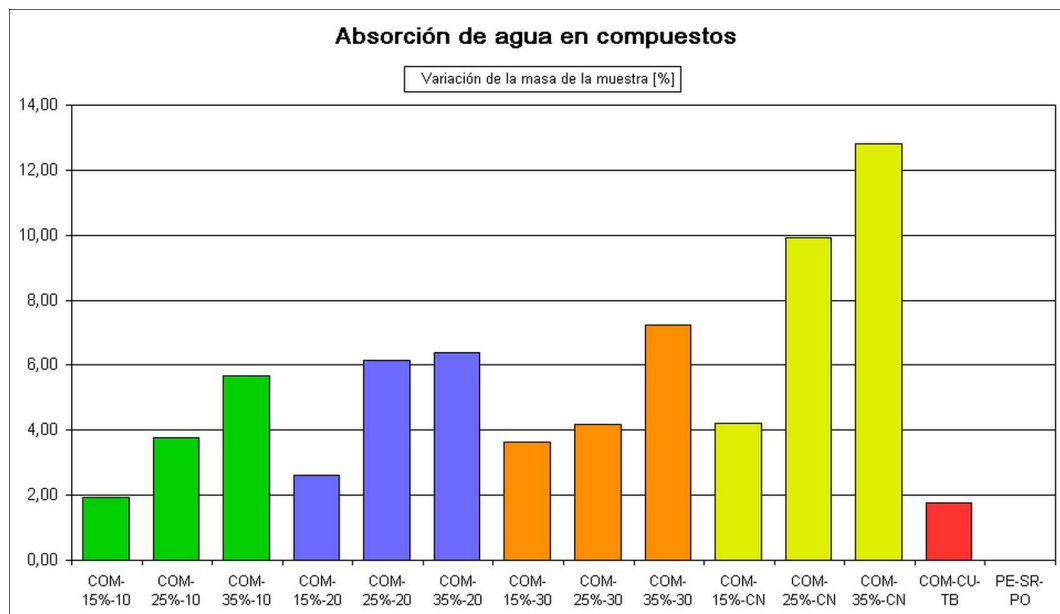


Figura 4.21. Variación del aumento de masa de cada muestra por absorción de agua en los materiales compuestos Abacá-Polietileno

#### 4.5.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

Para llevar a cabo este análisis se compararon los valores experimentales de esfuerzo máximo y módulo de elasticidad, tanto a tracción como a flexión, de los compuestos formulados de modo que sean observables las diferencias ocasionadas por la orientación y tamaño de las fibras, manteniendo constante la fracción másica de fibras refuerzo. En las tablas 4.19 - 4.21 se comparan las propiedades a tracción de los materiales compuestos obtenidos, mientras que en las tablas 4.22 – 4.24 se comparan las propiedades a flexión. En las figuras 4.22 - 4.24 se comparan los valores de esfuerzo máximo, tanto a tracción como a flexión, comparando el tipo de refuerzo con una composición fija en cada gráfico, mientras que en las figuras 4.25 – 4.27 se comparan los módulos de Young en los mismos términos de estudio.

Al comparar los resultados mostrados en las tablas 4.22 – 4.24 y revisando las figuras 4.22 – 4.27 se observa que el esfuerzo al pico a tracción y flexión no varía demasiado entre los compuestos reforzados con fibras cortas, en fracciones másicas del 25 y 35% las fibras de 20 mm tienen el mejor desempeño en

materiales reforzados con este tipo de fibras. Los módulos de Young a tracción de materiales reforzados con el 15% de abacá y a flexión con el 35% aumentan gradualmente con el tamaño de refuerzo, siendo muy notorio este patrón en estos dos casos.

Cuando la fracción másica del refuerzo en el compuesto es del 15% los esfuerzos máximos a flexión no cambian, se mantienen o incluso son menores que los que alcanza el polietileno solo, excepto en el caso de refuerzos continuos unidireccionales. Los módulos de Young a flexión son mayores que los del polietileno solo pero similares con cualquier tipo de refuerzo discontinuo cuando la fracción másica de las fibras es del 25% y con cualquier tipo de refuerzo con fracciones másicas del 15%.

Tabla 4.19. Propiedades a tracción de materiales compuestos reforzados con un 15% de fracción másica de fibras de abacá.

PROPIEDADES A TRACCIÓN	DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	PE-SR-PO	COM-15%-10	COM-15%-20	COM-15%-30	COM-15%-CN
	ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	11,500	9,600	8,801	10,844	24,462
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,503	1,469	1,342	1,244	5,974
	MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	93,276	156,162	246,577	274,546	467,730
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	19,397	13,175	29,679	21,259	77,373
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	20,910	5,404	5,352	6,272	6,324
	DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	139,500	10,136	11,688	13,488	32,400
	# PROBETA ANALIZADA	7,000	1,000	1,000	5,000	1,000
	ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	11,678	8,238	9,413	11,581	23,668
	MÓDULO YOUNG [MPa]	85,492	166,419	263,714	260,559	472,030
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	34,828	6,624	6,269	6,919	6,604
	DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	121,920	14,620	12,619	13,940	35,641

Tabla 4.20. Propiedades a tracción de materiales compuestos reforzados con un 25% de fracción másica de fibras de abacá.

PROPIEDADES A TRACCIÓN	DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	PE-SR-PO	COM-25%-10	COM-25%-20	COM-25%-30	COM-25%-CN
	ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	11,500	7,202	12,759	13,426	92,739
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,503	1,838	1,102	2,141	29,553
	MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	93,276	306,527	373,712	347,079	1468,120
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	19,397	42,273	7,508	59,117	363,370
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	20,910	2,896	4,604	5,028	8,240
	DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	139,500	7,068	10,404	13,100	66,240
	# PROBETA ANALIZADA	7,000	6,000	5,000	3,000	3,000
	ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	11,678	8,925	13,113	13,395	104,029
	MÓDULO YOUNG [MPa]	85,492	360,055	384,147	288,772	1776,391
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	34,828	2,946	3,942	6,634	7,295
	DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	121,920	13,960	15,626	14,976	54,620

Tabla 4.21. Propiedades a tracción de materiales compuestos reforzados con un 35% de fracción másica de fibras de abacá.

PROPIEDADES A TRACCIÓN	DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	PE-SR-PO	COM-35%-10	COM-35%-20	COM-35%-30	COM-35%-CN
	ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO [MPa]	11,500	10,943	12,570	14,777	102,287
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,503	1,888	2,042	1,731	32,985
	MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [Mpa]	93,276	398,787	365,968	406,011	1667,159
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	19,397	67,527	62,965	75,897	208,861
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO (PROMEDIO) [%]	20,910	4,484	4,684	4,944	10,320
	DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA (PROMEDIO) [%]	139,500	11,131	10,688	11,839	60,800
	# PROBETA ANALIZADA	7,000	3,000	5,000	3,000	4,000
	ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	11,678	10,955	14,061	14,262	119,835
	MÓDULO YOUNG [MPa]	85,492	445,365	373,410	429,426	1841,437
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO MÁXIMO [%]	34,828	3,617	5,629	4,592	9,642
	DEFORMACIÓN @ A LA ROTURA [%]	121,920	15,626	15,972	17,628	40,315

Tabla 4.22. Propiedades a flexión de materiales compuestos reforzados con un 15% de fracción másica de fibras de abacá.

PROPIEDADES A FLEXIÓN	DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	PE-SR-PO	COM-15%-10	COM-15%-20	COM-15%-30	COM-15%-CN
	ESFUERZO AL PICO PROMEDIO [MPa]	13,450	18,520	16,930	16,720	27,680
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	4,417	2,760	1,110	1,200	3,100
	MÓDULO YOUNG (PROMEDIO) [MPa]	136,600	185,269	210,932	193,427	220,073
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	60,880	39,923	30,561	34,552	84,073
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO AL PICO (PROMEDIO) [m/m]	0,033	0,046	0,043	0,045	0,048
	# PROBETA ANALIZADA	3	2	1	1	8
	ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	14,618	18,415	18,231	18,231	27,391
	ESFUERZO @5% DEFORMACIÓN	9,745	14,468	10,420	10,420	14,201
	MÓDULO YOUNG [MPa]	162,024	171,548	188,496	188,496	197,664
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO AL PICO [m/m]	8,600	11,910	6,269	6,919	6,604

Tabla 4.23. Propiedades a flexión de materiales compuestos reforzados con un 25% de fracción másica de fibras de abacá.

PROPIEDADES A FLEXIÓN	DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	PE-SR-PO	COM-25%-10	COM-25%-20	COM-25%-30	COM-25%-CN
	ESFUERZO AL PICO PROMEDIO [MPa]	13,450	17,780	23,240	20,550	33,320
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	4,417	2,230	2,370	1,470	5,610
	MÓDULO YOUNG [MPa]	136,600	179,456	219,692	223,810	285,275
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	60,880	41,371	34,615	32,667	64,198
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO AL PICO (PROMEDIO) [m/m]	0,033	0,046	0,046	0,045	0,047
	# PROBETA ANALIZADA	3,000	6,000	4,000	4,000	10,000
	ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	14,618	18,817	22,560	22,560	36,097
	ESFUERZO @5% DEFORMACIÓN	9,745	13,282	15,024	15,024	15,139
	MÓDULO YOUNG [MPa]	162,024	170,771	199,460	199,460	275,460
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO AL PICO [m/m]	8,600	12,698	3,942	6,634	7,295

Tabla 4.24. Propiedades a tracción de materiales compuestos reforzados con un 35% de fracción másica de fibras de abacá.

PROPIEDADES A FLEXIÓN	DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	PE-SR-PO	COM-35%-10	COM-35%-20	COM-35%-30	COM-35%-CN
	ESFUERZO AL PICO PROMEDIO [MPa]	13,450	13,160	21,300	18,890	37,550
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	4,417	1,158	2,060	2,065	7,570
	MÓDULO YOUNG [MPa]	136,600	187,444	221,534	252,385	506,851
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	60,880	68,778	23,160	84,962	141,369
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO AL PICO (PROMEDIO) [m/m]	0,033	0,047	0,046	0,043	0,034
	# PROBETA ANALIZADA	3,000	5,000	7,000	7,000	2,000
	ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	14,618	11,607	20,720	20,720	38,703
	ESFUERZO @5% DEFORMACIÓN	9,745	9,354	15,545	15,545	27,319
	MÓDULO YOUNG [MPa]	162,024	236,730	224,226	224,226	539,731
	DEFORMACIÓN @ AL ESFUERZO AL PICO [m/m]	8,600	8,664	5,629	4,592	9,642

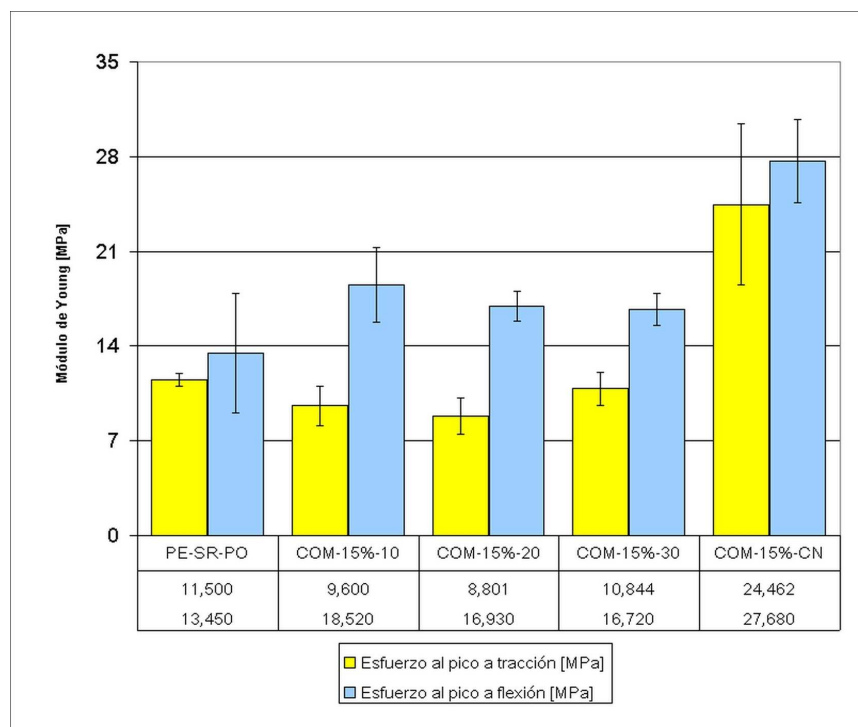


Figura 4.22. Esfuerzos máximos a tracción y flexión de compuestos con fracción másica del 15% de refuerzos.

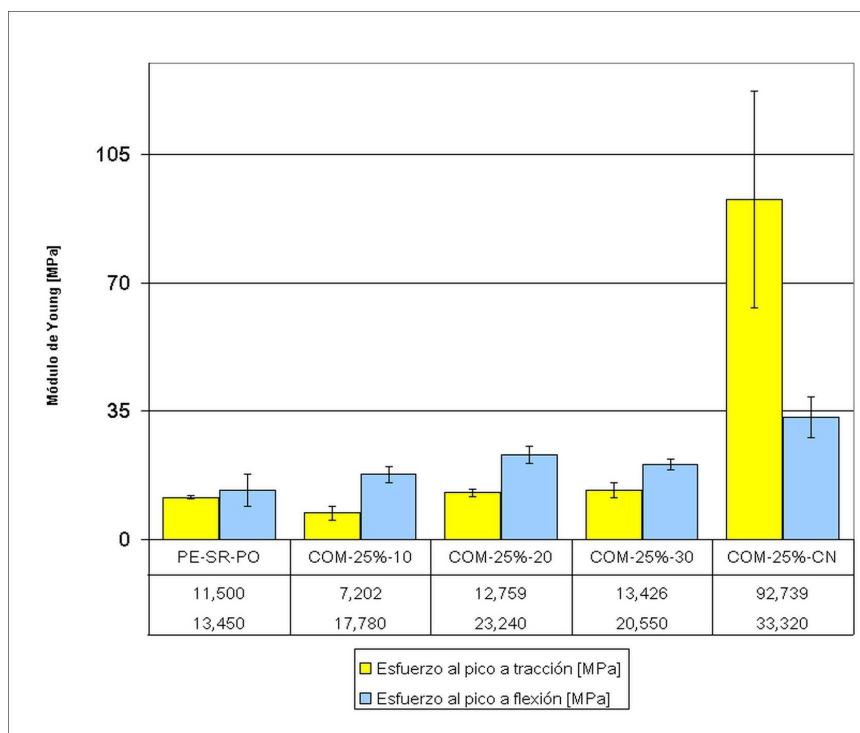


Figura 4.23. Esfuerzos máximos a tracción y flexión de compuestos con fracción másica del 25% de refuerzos.

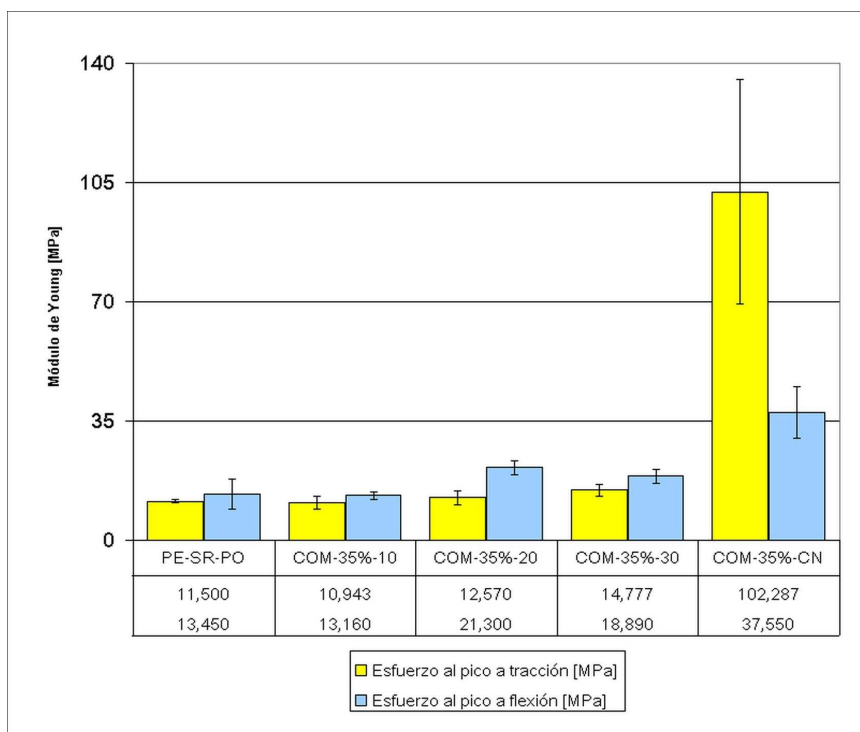


Figura 4.24. Esfuerzos máximos a tracción y flexión de compuestos con fracción másica del 35% de refuerzos.

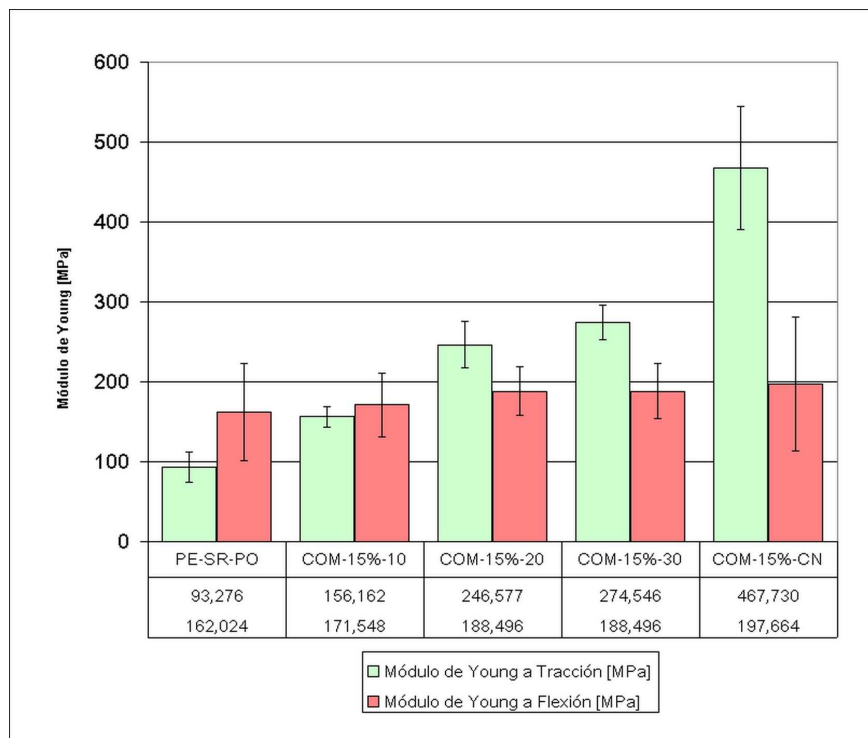


Figura 4.25. Módulos de Young a tracción y flexión de compuestos con fracción másica del 15% de refuerzos.

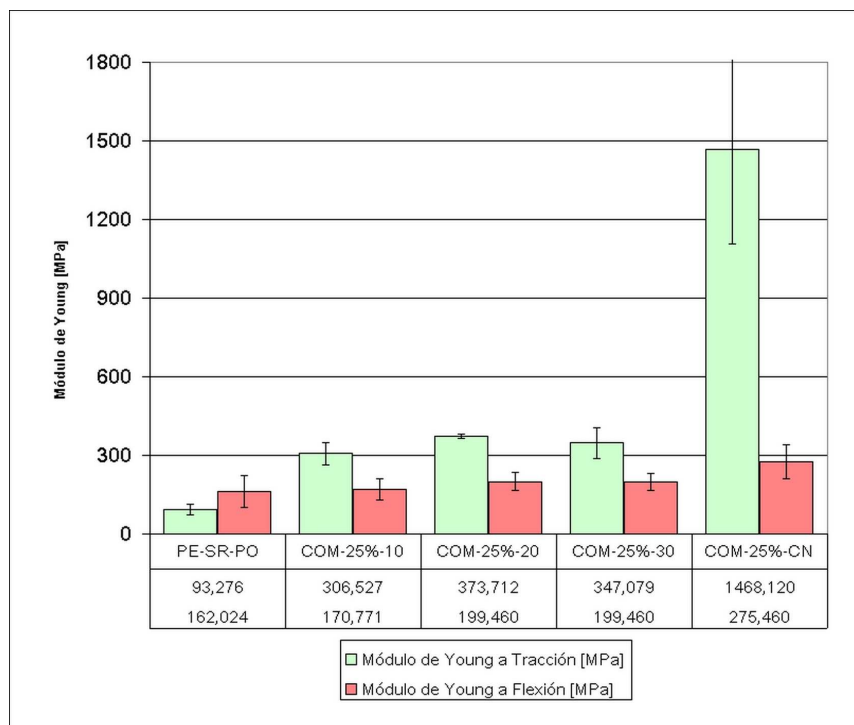


Figura 4.26. Módulos de Young a tracción y flexión de compuestos con fracción másica del 25% de refuerzos.

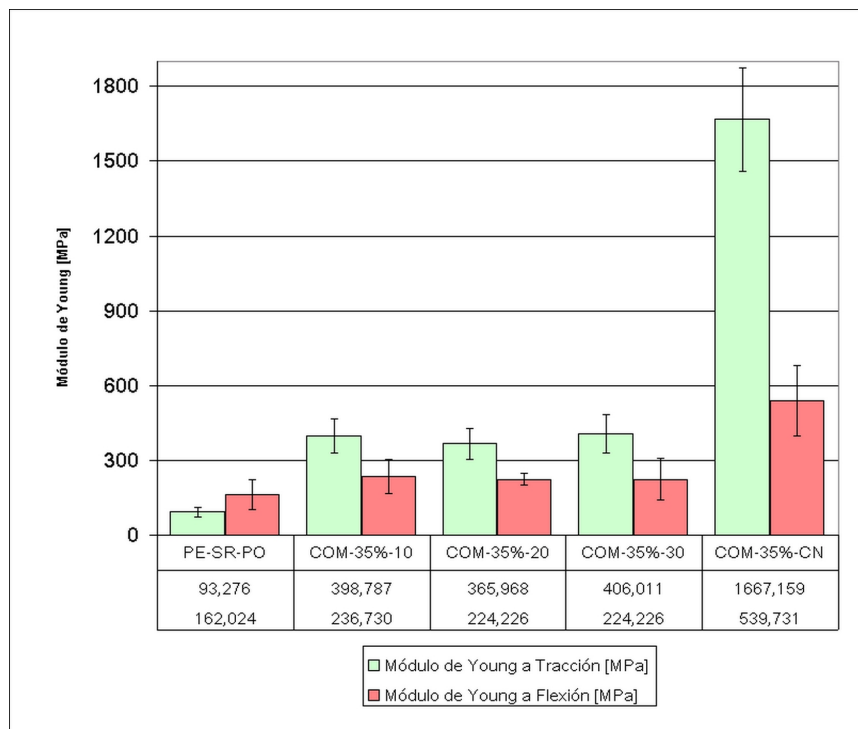


Figura 4.27. Módulos de Young a tracción y flexión de compuestos con fracción másica del 35% de refuerzos.

En las figuras anteriores se observa un mejor desempeño de los compuestos reforzados con fibras unidireccionales continuas por sobre los reforzados con fibras cortas orientadas al azar en las propiedades mecánicas a flexión y principalmente en los esfuerzos máximos a tracción. Las fracciones másicas que permiten mejorar las propiedades de manera más efectiva son las iguales y superiores al 25%.

Otro factor importante es la relación entre el módulo de Young a flexión y el módulo a tracción, esto debido a que otros autores publican este resultado que señala el rendimiento de los materiales ante estos dos tipos de carga. En la tabla 4.25 se indica estos valores para los materiales estudiados dependiendo de la fracción másica y el tipo de refuerzo utilizado.



Tabla 4.25. Relación entre los módulos de Young a flexión y tracción de los materiales compuestos obtenidos.

<b>DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS</b>	PE-SR-PO	COM-15%-10	COM-15%-20	COM-15%-30	COM-15%-CN	PROMEDIO RELACIÓN MÓDULO YOUNG FLEXIÓN/TRACCIÓN FIBRAS CORTAS F.M.15%
RELACIÓN MÓDULO YOUNG FLEXIÓN/TRACCIÓN	1,895	1,031	0,715	0,723	0,419	0,823
<b>DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS</b>	PE-SR-PO	COM-25%-10	COM-25%-20	COM-25%-30	COM-25%-CN	PROMEDIO RELACIÓN MÓDULO YOUNG FLEXIÓN/TRACCIÓN FIBRAS CORTAS F.M.25%
RELACIÓN MÓDULO YOUNG FLEXIÓN/TRACCIÓN	1,895	0,474	0,519	0,691	0,155	0,561
<b>DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS</b>	PE-SR-PO	COM-35%-10	COM-35%-20	COM-35%-30	COM-35%-CN	PROMEDIO RELACIÓN MÓDULO YOUNG FLEXIÓN/TRACCIÓN FIBRAS CORTAS F.M.35%
RELACIÓN MÓDULO YOUNG FLEXIÓN/TRACCIÓN	1,895	0,657	0,584	0,776	0,304	0,673
PROMEDIO RELACIÓN MÓDULO YOUNG FLEXIÓN/TRACCIÓN POR TIPO DE REFUERZO	1,895	0,721	0,606	0,730	0,293	<b>0,788</b>

Para evaluar la eficiencia de refuerzo de las fibras de abacá se tomaron en cuenta las propiedades de los compuestos que mejor desempeño mostraron al ser ensayados a tracción y aplicando las relaciones 2.5 - 2.9 se obtuvo los resultados de acuerdo con la teoría de las mezclas para medir la efectividad de refuerzo de las fibras en cada caso de estudio. Cabe mencionar que los valores tanto de las propiedades mecánicas de los materiales primarios como las de los compuestos son fruto de la investigación presentada en este trabajo, reportadas en sus correspondientes secciones y bajo las normas y lineamientos especificados.

En la tabla 4.26 se indican los valores experimentales obtenidos en las pruebas realizadas y los valores calculados con la expresión de la ley de mezclas que corresponde para cada tipo de refuerzo (es decir utilizando las ecuaciones 2.5 - 2.9). Comparando estas cifras se obtiene la eficiencia del refuerzo calculando el cociente entre el valor real y el calculado del esfuerzo máximo.

$$E_{c||} = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (2.5)$$

$$E_{c\perp} = \left\{ \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m} \right\}^{-1} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{TS_c} = V_f \sigma_r^f + (1-V_f) \sigma_y^m \quad (2.7)$$

$$\sigma_{TS_c} = (1-V_f) \sigma_r^m \quad (2.8)$$

$$\sigma_{TS_c} (\text{fibras cortas}) = \frac{V_f \sigma_r^f}{2} + (1-V_f) \sigma_y^m \quad (2.9)$$

Tabla 4.26. Comparación de resultados teóricos y experimentales de esfuerzo máximo de los compuestos obtenidos

DENOMINACIÓN PROBETAS	VALORES EXPERIMENTALES	VALORES TEÓRICOS (ley de mezclas)	
	$\sigma_{\text{máx.}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{máx.}}$ [MPa]	Eficiencia del refuerzo
COM-35%-10	10,950	138,46	0,08
COM-25%-20	13,113	102,241	0,13
COM-35%-20	14,061	138,46	0,10
COM-35%-30	14,262	138,46	0,10
COM-35%-CN	119,835	269,3417	0,44
COM-CU-TB (3.5%)	12,558	37,44437	0,34

Según se puede observar en la tabla 4.26, en el caso de fibras cortas distribuidas al azar, dependiendo del tamaño de las mismas se observa una mayor efectividad de refuerzo cuando el tamaño de la fibra es mayor. La eficiencia del refuerzo (cociente entre el valor experimental y el valor real) tiende a ser parecido en el mismo tipo de refuerzo y a ser alta cuando se trata de refuerzos orientados como en el caso de las fibras continuas unidireccionales y bidimensionales, lo que es clara muestra de un aumento relativo de la efectividad del refuerzo.

En las tablas 4.27 y 4.28 se compara algunos resultados obtenidos en estudios semejantes tales como los de Juan Carlos Páez y Narváez - Morejón con

respecto a los obtenidos en este estudio con fracciones másicas de fibra semejantes pero con procesos y/o matrices diferentes, y se indica la variación porcentual de las propiedades mecánicas con respecto a las originales del material de la matriz.

Tabla 4.27. Propiedades mecánicas a tracción obtenidas en materiales compuestos obtenidos por procesos semejantes al presentado en este estudio. [PÁEZ]

Material	$\epsilon$ [%]	Variación con respecto a la matriz.	$\sigma$ máx [Mpa]	Variación con respecto a la matriz.	E [Mpa]	Variación con respecto a la matriz.	Referencia
PE	106,60	-68,8%	18,50	-28,6%	60,90	223,5%	Morejón y Narváez, 2004
PE/abacá 20% Inyección	33,30		13,20		197,00		
PP	18,10	-34,8%	23,90	38,9%	578,00	105,1%	Cadena et al., 2000
PP/abacá 30% Compresión	11,80		33,20		1185,60		
PP	15,52	-64,2%	31,62	11,5%	548,65	102,6%	Paéz, 2006
PP/ abacá 30%, 20 mm/ Moldeo por comp.	5,55		35,27		1111,80		
PP/ abacá 35%, 20 mm/ Moldeo por comp.	5,20	-66,5%	35,45	12,1%	1110,00	102,3%	
PP/ abacá 35%, 30 mm/ Moldeo por comp.	5,03	-67,6%	37,30	18,0%	1277,80	132,9%	
PP/ abacá 35%, fibras continuas/ Moldeo por comp.	5,92	-61,9%	87,44	176,5%	2400,00	337,4%	
PE	20,91	-50,2%	11,50	10,9%	85,49	349,3%	Este estudio
PE/ abacá 25%, 20 mm/ Moldeo por comp.	10,40		12,76		384,15		
PE/ abacá 25%, 30 mm/ Moldeo por comp.	13,10	-37,4%	13,09	13,8%	239,92	180,6%	
PE/ abacá 35%, 30 mm/ Moldeo por comp.	11,84	-43,4%	14,78	28,5%	429,43	402,3%	
PE/ abacá 15%, fibras continuas/ Moldeo por comp.	32,40	54,9%	24,46	112,7%	472,03	452,1%	

Tabla 4.28. Propiedades mecánicas a flexión obtenidas en materiales compuestos obtenidos por procesos semejantes al presentado en este estudio. [PÁEZ]

<u>Material</u>	$\sigma$ @ al 5% deformación [Mpa]	Variación con respecto a la matriz.	E [Mpa]	Variación con respecto a la matriz.	Referencia
PP	37,50	47,2%	1249,60	46,3%	Paéz, 2006
PP/ abacá 30%, 20 mm/ Moldeo por comp.	55,19		1828,00		
PP/ abacá 35%, 20 mm/ Moldeo por comp.	51,70	37,9%	1989,00	59,2%	
PP/ abacá 35%, 30 mm/ Moldeo por comp.	52,33	39,5%	1952,00	56,2%	
PP/ abacá 35%, 30 mm fib. merc./ Moldeo por comp.	52,97	41,3%	1342,00	7,4%	
PE	1,86	179,3%	427,90	23,2%	Este estudio
PE/ abacá 25%, 20 mm/ Moldeo por comp.	5,20		527,32		
PE/ abacá 25%, fibras continuas/ Moldeo por comp.	3,50	87,8%	734,56	71,7%	
PE/ abacá 35%, 30 mm/ Moldeo por comp.	2,00	7,4%	918,16	114,6%	
PE/ abacá 15%, fibras continuas/ Moldeo por comp.	3,04	63,4%	527,10	23,2%	

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- + Una vez terminado el estudio y finalizada la fase experimental se pudo obtener, por medio de moldeo por compresión, materiales compuestos de matriz polietilénica reforzados con fibras de abacá cortas orientadas al azar y fibras continuas orientadas unidireccional y bidireccionalmente. Estos compuestos tienen similares características de dureza y diferentes densidades y grados de absorción de agua que el material usado como matriz. Además, los nuevos materiales presentan desempeños mecánicos, a tracción y flexión, superiores con respecto al desempeño en similares condiciones del polietileno solo.

#### Procesabilidad de la matriz

- + El material polimérico, que fue utilizado como matriz de los compuestos obtenidos, no fue un polietileno un grado compresión (es decir con un índice de fluidez de entre 2 y 4 g/10min) como se definió en primera instancia, sino más bien fue necesario utilizar uno grado inyección de baja densidad. Con el primer material no se pudo obtener placas sin defecto mediante moldeo por compresión, y las placas que se obtenían con un relativamente grande tiempo de moldeo tenían una muy fuerte adhesión con la parte macho y hembra del molde de acero y del de aluminio. El alto índice de fluidez del polietileno 1-buteno, Venele 2213, permitió obtener placas sin defecto en tiempos relativamente cortos, y eliminó los problemas de desmolde.
- + Las condiciones óptimas de procesamiento del polietileno Veneren 2213 para obtener placas sin defectos visuales en el molde en estudio y mediante la prensa calefactora utilizada son: una masa mínima de 18 g;

temperatura de la placa calefactora superior de la prensa para moldear que se usó en el estudio de 168°C, e inferior de 135°C; presión constante sostenida durante las tres etapas del moldeo de 0,442 MPa; y, enfriamiento sin control de caudal por medio de flujo continuo de agua potable por el circuito de refrigeración de la prensa.

- + La fase de enfriamiento en el moldeo se llevó a cabo sin necesidad de un control de caudal usando el equipo de baño térmico, sino utilizando un flujo continuo de agua potable pasando por los canales de la prensa. Se comprobó que la selección de uno u otro tipo de enfriamiento no afecta las propiedades finales del material obtenido. Por otro lado, la elección tomada permite acelerar el proceso y representa un ahorro energético grande al desplazar la utilización de un equipo de alimentación eléctrica y plantea la necesidad de establecer, para procesos industriales, la utilización de un sumidero térmico grande, de acuerdo a las necesidades planteadas, en donde el agua recircule y sea enfriada de nuevo por medios de menor costo energético.

#### Características del material de refuerzo

- + Fue importante estudiar el comportamiento mecánico de la fibra de abacá grado 3 variedad bungalanón con la que se trabajó durante esta investigación, pues el tomar datos de tablas o estudios similares hubiese inducido un gran error en la evaluación del material resultante. Siendo el abacá un elemento orgánico natural presenta grandes variaciones en su comportamiento de una fibra a otra, sobre todo en lo que tiene que ver al comportamiento ante cargas mecánicas. El esfuerzo máximo medio de 747,86 MPa que se obtuvo fue el resultado de haber ensayado más de 50 muestras, muchas de las cuales fueron descartándose por medios estadísticos.
- + Ejecutar un análisis termogravimétrico sobre la fibra dio la oportunidad de conocer de una manera precisa el efecto de la aplicación de calor para remover el contenido de agua la fibra y utilizar esta información para

disminuir la humedad del abacá a utilizarse con condiciones adecuadas para esto. Según la bibliografía revisada se ejecutaban sesiones de entre 12 y 14 horas de calentamiento a la fibra en hornos, cuando se descubrió por medio de este análisis que, utilizando la estufa del laboratorio del CIAP, es apenas necesario someterla a una temperatura de 140°C por 15 minutos para secar el abacá.

#### Composición del material

- + Se propuso estudiar composiciones máxicas de fibra de 15, 25 y 35% sobre la matriz, y según los datos obtenidos los compuestos con 25 y 35% presentan mejores cualidades luego de haberse constituido. La fibra de abacá en fracciones máxicas del 10% no demuestra constituirse en un aporte significativo para mejorar el desempeño mecánico, excepto por los materiales con fibras largas y en menor grado con fibras cortas de 30mm de largo. La composición del 35% de fibras se establece como un límite superior para compuestos realizados con este proceso, puesto que con mayores cantidades de fibra incorporada no es mojada totalmente por el polietileno. Esto se debe principalmente a la aglutinación de fibras y su baja densidad.

#### Tipos de refuerzo

- + La utilización de fibras cortas de 30 y 20 mm de largo produjeron valores alentadores en sus pruebas, mostrando que elevan el módulo de elasticidad del material de la matriz en hasta un 500% dependiendo de la composición, por otro lado las fibras de 10 mm muestran un desempeño modesto sin elevar las propiedades mecánicas significativamente.
- + La inclusión de fibras continuas, como era de esperarse, produce el mayor aporte a las propiedades mecánicas del compuesto, y a pesar de su dificultad de procesamiento (orientación y fijación sobre la matriz que se pierde cuando se aplica presión) se muestran como la mejor alternativa para obtener buenos resultados finales.

- + El tejido bidimensional que se probó en este estudio dio pautas de ser un refuerzo bastante bueno, principalmente con respecto a las propiedades a tracción. A pesar de que por su masa se constituyó en la composición más baja del grupo ensayado (fracción másica del 3,5%), tuvo efectos palpables sobre el compuesto, es por esto que al comparar los resultados teóricos con los reales, este refuerzo tiene una buena efectividad desempeñando su papel de refuerzo.

#### Limitantes del proceso de obtención de compuestos

- + Una vez superado los problemas del material base, y habiendo garantizado que las temperaturas usadas para el moldeo no degradarían la fibra se presentó problemas en la composición de materiales que no permitieron alcanzar valores altos en las propiedades mecánicas. El principal problema es la falta de adhesión de la fibra con la matriz polietilénica, lo que deja como uno de los únicos recursos para la fijación un posible anclaje mecánico entre las superficies. La aparición de este efecto es más probable cuando fibras continuas se encuentran orientadas en el eje de sollicitación mecánica.
- + Existe la posibilidad de que burbujas de aire queden atrapadas en el compuesto, entre las placas de polietileno y los refuerzos, y aunque esto se controla con la presión de trabajo, no se puede eliminar completamente estos defectos que tienden a debilitar el material.
- + La distribución de fibras cortas cuando las composiciones son medias o bajas, es un factor difícil de controlar sobre todo cuando producto de la aplicación de presión hay un desplazamiento del material fundido que va acarreado fibras sin un patrón definido, ocasionando descompensación de carga en ciertas zonas del compuesto.
- + La alta variación entre los resultados obtenidos y la falta de una lógica que encause y explique el comportamiento de ciertas composiciones y tipos de refuerzos se debe principalmente a la alta variación implícita que tienen las propiedades de las fibras naturales en general, y a los problemas del



proceso antes descritos. Estos efectos son evidentes en los compuestos reforzados con fibras continuas unidireccionales, en donde a pesar de que se mitigan algunas causantes de dispersión de características, se pone en manifiesto la mayor variación de datos.

#### Caracterización final de los compuestos

- + Los compuestos obtenidos del proceso de moldeo por compresión presentan, en términos generales, áreas bajo la curva esfuerzo-deformación, para los ensayos a tracción, más grandes que las que presentan los refuerzos y son más rígidos que la matriz. La respuesta a la flexión es similar para todos los compuestos reforzados con fibras cortas excepto las de altas concentraciones y fibras más largas (35%, 30 mm) que se destacan por presentar módulo y resistencias máximas más altas.
- + Los materiales que contienen fibras cortas son mucho más dúctiles que los materiales que contienen fibras continuas. Esto es debido principalmente a que en cada caso se impone la condición de la matriz polietilénica y el abacá respectivamente.
- + La caracterización de algunas propiedades físico-química de los materiales obtenidos ha permitido observar que la dureza original de la matriz no se afecta en este tipo de compuestos. Por otro lado, el aumento de la densidad es proporcional a la cantidad de fibra compacta que es incorporada en el compuesto (principalmente en composiciones de 25 y 35% de fibras de 30 mm). Finalmente, la absorción de humedad coherentemente aumentará si la cantidad de fibra expuesta es mayor. En este tipo de materiales se tiene caras laterales que están descubiertas y permiten la absorción de humedad, ya que no existe un encapsulamiento total de las fibras.
- + De la comparación de los resultados obtenidos con los de otros estudios semejantes es importante señalar que con respecto a los compuestos reforzados con fibras continuas, en el caso del estudio de Juan Carlos Páez acerca de materiales polipropilénicos reforzados con abacá, se

obtienen características muy similares a los esfuerzos máximos y módulos de Young, de lo que se concluye que el proceso de moldeo por compresión puede ser reproducido, en este tipo de compuestos, para obtener resultados similares.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- + Se recomienda ampliar y profundizar el estudio inherente a las condiciones del polietileno como matriz de compuestos obtenidos por moldeo por compresión. Encontrar los materiales adecuados para el molde y el tipo de polietileno indicado puede facilitar el proceso y volver factible la industrialización de este método de obtención de materiales.
- + Se sugiere investigar acerca del desarrollo de métodos para alcanzar distribuciones uniformes de fibras cortas sobre la matriz. Este es uno de los procedimientos manuales más ineficaces y debería automatizarse para garantizar resultados más uniformes y repetibles.
- + Se propone llevar a cabo un estudio más profundo y completo acerca de la inclusión de tejidos bidimensionales y tridimensionales reforzando matrices termoplásticas. La inclusión de estos refuerzos requerirá el desarrollo de técnicas adecuadas y factibles para elaborar los tejidos particularmente complicados debido a la rigidez de la fibra.
- + Se recomienda ampliar la gama de materiales obtenidos en este tipo de estudio reacondicionando los moldes y equipos de moldeo de modo que se pueda obtener materiales de mayor grosor, multicapas y de mayor longitud. Mientras mayores sean las variantes para la introducción de fibras de abacá en matrices polietilénicas se podrá conocer más acerca del impacto de las fibras sobre esta matriz.

## REFERENCIAS

- ✚ ADVANI, Suresh; SOZER, Murat. Process Modeling in Composites Manufacturing. Editorial Marcel Dekker Inc. New York. 2003.
- ✚ ALBUJA, Rosa. Aplicación del Jugo Extraído de la Planta de Abacá en el Teñido de Algodón. Escuela Politécnica Nacional. Carrera de Ingeniería Química. Quito, 2003.
- ✚ ASHBY, Michael; JONES, David. Engineering Materials an Introduction to their Properties. Tomos 1 y 2. Segunda Edición. Editorial Butterworth Heinemann. Oxford. 1996.
- ✚ BRADY, George, et al. Materials Handbook. Editorial Mc. Graw-Hill Handbooks. Décimo Quinta Edición.
- ✚ 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.
- ✚ CALLISTER, William. Fundamentals of Materials Science and Engineering. Editorial John Wiley & Sons. Quinta Edición. 2001.
- ✚ CEGARRA, PUENTE, VALLDEPERAS. Fundamentos científicos y aplicados a la Tintura de Materias Textiles. España. 1981.
- ✚ CHANDA, Manas; ROY, Salil. Plastics Technology Handbook. Editorial Taylor & Francis Group. Cuarta Edición. Florida. 2007.
- ✚ DELHAES, Pierre, et al. Fibers and Composites. Editorial Taylor & Francis. Londres. 2003.
- ✚ EDWARDS, Vicent, et al. Modified Fibers with Medical and Specialty Applications. Editorial Springer. Holanda. 2006.

- ✚ GUERRÓN, Ana. Caracterización y Modificación Alcalina de la Fibra de Abacá Variedad Bungalanón para la elaboración de Hilo Artesanal. Escuela Politécnica Nacional. Carrera de Ingeniería Química. Quito, 2005.
- ✚ HARPER, Charles. Handbook of Plastics Technologies. Editorial Mc. Graw-Hill. 1976.
- ✚ HARPER, Charles; PETRIE, E. Plastics Materials and Processes, a Concise Encyclopedia. Editorial Wiley Interscience. New Jersey. 2003.
- ✚ HATAKEYAMA, T., y QUINN, F. Thermal Analysis Fundamentals and Applications to Polymer Science. Editorial John Wiley & Sons. Quinta Edición. West Sussex. 1999.
- ✚ KAW, Awtar K. Mechanics of Composite Materials. Editorial Taylor & Francis Group. Segunda Edición. Florida. 2006.
- ✚ KIM, Jang-Kyo; MAI, Yiu-Wing. Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites. Quinta Edición. Editorial Elsevier Science Ltda. Oxford. 1998.
- ✚ LILHOT, H. y LAWTHER J. Comprehensive Composites Materials. Cap 1.10 - Natural Organic Fibers.
- ✚ LÓPEZ, Ángel. 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.
- ✚ MAZUMDAR, Sanjay. Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering. Editorial CRC Press LLC. Florida. 2002.
- ✚ MILLS, Nigel. Plastics: Microstructure and Engineering Applications. Tercera Edición. Editorial Elsevier Science & Technology Books. 2005.
- ✚ MITCHELL, Brian. An Introduction to Materials Engineering and Science for Chemical and Materials Engineers. Editorial Wiley Interscience. New Jersey. 2004.

- ✚ MOHANTY, Amar; MISRA, Manjusri. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2005.
- ✚ MOREJÓN, Sergio; NARVÁEZ, Leslye. Materiales Compuestos de Matrices Polietilénicas Reforzados con Fibras Naturales de Abacá y Cabuya. Escuela Politécnica Nacional. Carrera de Ingeniería Química. Quito. 2004.
- ✚ NIELSEN, Lawrence, LANDEL, Robert, Mechanical Properties of Polymers and Composites. Segunda Edición. Editorial Marcel Dekker Inc. 1994.
- ✚ NIETO J.Manuel, Procesamiento de Abacá para la obtención de tejidos. . Escuela Politécnica Nacional. 1975.
- ✚ ORCHIN, Milton, et al. The Vocabulary and Concepts of Organic Chemistry. Segunda Edición. Editorial Wiley Interscience. New Jersey. 2005.
- ✚ PÁEZ, Juan C. Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión. Escuela Politécnica Nacional. Carrera de Ingeniería Mecánica. Quito, 2007.
- ✚ PAREDES, Rubén; SALINAS, Ruth. Compatibilización de Polipropileno con Politereftalato de Etileno. Escuela Politécnica Nacional. Carrera de Ingeniería Química. Quito, 2007.
- ✚ ROESLER, Joachim, et al. Mechanical Behaviour of Engineering Materials Metals, Ceramics, Polymers, and Composites. Editorial Springer-Verlag. Berlin. 2007.
- ✚ SIMBAÑA, Andrés. Fibras Naturales. Alternativas para el desarrollo nacional. ECAA-PUCE. Quito – Ecuador.
- ✚ SMITH P. y WOLCOTT M. Opportunities for Wood/natural fiber- plastics composites in residential and Industrial applications. Forest products journal. Vol. 56 Número 3.

- ✚ VASILIEV, V. y MOROZOV, E. Mechanics and Analysis of Composite Materials. Editorial Elsevier. Reino Unido. 2001.
- ✚ WUNDERLICH, Bernhard. Thermal Analysis of Polymeric Material. Editorial Springer. Holanda. 2005.
- ✚ [Internet 1] CADE <http://www.sica.gov.ec/>
- ✚ [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>
- ✚ [Internet 6] <http://www.compositesiq.com/>
- ✚ [Internet 7] [http://es.wikipedia.org/wiki/Musa\\_textilis](http://es.wikipedia.org/wiki/Musa_textilis)
- ✚ [Internet 8] <http://www.arqhys.com/arquitectura/abaca.html>
- ✚ [Internet 9] <http://www.globalhemp.com/>
- ✚ [Internet 10] <http://www.edmunds.com/advice/alternativefuels/articles/>
- ✚ [Internet 11] <http://www.daimlerchrysler.com/>
- ✚ [Internet 12] CORPEI <http://www.ecuadorexporta.org/>
- ✚ [Internet 13] PLASTICO.- Información Técnica y de Negocios para América Latina <http://www.plastico.com/tp>
- ✚ [Internet 14] Industria Indonesia de Papel de abacá <http://www.isarogpulp.com>
- ✚ [Internet 15] ECOLOGY CENTER <http://www.ecocenter.org>
- ✚ [Internet 16] UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO <http://www.gipuzkoa.ehu.es>
- ✚ [Internet 17] ABOUT COMPOSITES <http://composite.about.com/library>

## ANEXOS

ANEXO 1. Tenacidad de fibras de abacá de diferentes grados.

ANEXO 2. Calorimetría diferencial de barrido de una muestra de Polietileno de baja densidad butileno Venelene 2213.

ANEXO 3. Hoja técnica polietileno de baja densidad butileno Venelene 2213.

ANEXO 4. Procedimiento para determinación absorción de agua de compuestos.

ANEXO 5. Propiedades mecánicas a la tracción de fibras de abacá grado 3 variedad bungalanón.

ANEXO 6. Termogravimetría del abacá.

ANEXO 7. Resultados de pruebas mecánicas sobre compuestos obtenidos y tabla de propiedades específicas la tracción.

ANEXO 8. Planos: 1) molde de acero usado para moldear el material de la matriz y el compuesto, y 2) troquel de corte de probetas para ensayos de flexión.

## ANEXO 1. TENACIDAD DE FIBRAS DE ABACÁ DE DIFERENTES GRADOS

### TENACIDADES [cN/TEX] DE FIBRAS DE ABACÁ DE DIFERENTES GRADOS Y MISMO ORIGEN\*

---

#### **GRADO 2**

Denominación Bodega	No Datos	Media	Desviación Estándar	"+/-"
C1	84	44.24	15.97	4.49
C2	19	35.29	14.39	8.74
C3	38	37.28	16.62	6.95
F1	15	41.83	15.74	10.84
F2	91	37.55	17.61	4.75

---



---

#### **GRADO 3**

Denominación Bodega	No Datos	Media	Desviación Estándar	"+/-"
C1	115	42.77	17.40	4.18
C2	50	51.71	15.99	5.82
C3	62	37.59	16.84	5.51
F1	24	43.14	14.29	7.68
F2	88	42.63	16.38	4.50

---



**GRADO 4**

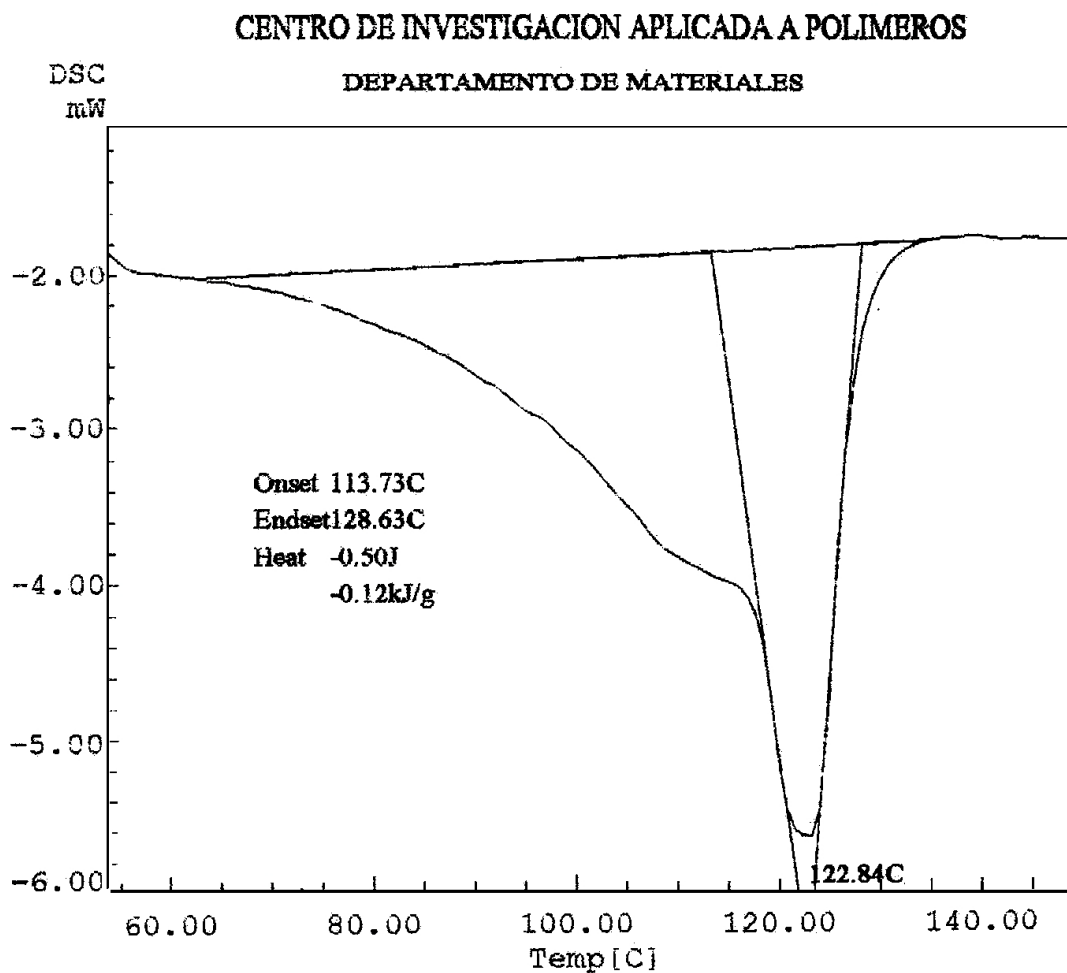
Denominación Bodega	No Datos	Media	Desviación Estándar	"+/-"
C1	81	48.98	17.78	5.09
C2	55	55.34	15.69	5.45
C3	61	42.98	15.91	5.25
F1	23	39.77	12.10	6.64
F2	153	51.11	17.65	3.68

**GRADO 5**

Denominación Bodega	No Datos	Media	Desviación Estándar	"+/-"
C1	47	44.63	14.75	5.54
C2	79	38.46	16.30	4.72
C3	40	34.03	11.48	4.67
F1	57	55.05	14.33	4.89
F2	73	45.91	18.89	5.70

\*Elaborado por: Centro Textil Politécnico, proyecto ""DESARROLLO DE NUEVAS ALTERNATIVAS DE USO DEL ABACÁ EN EL ECUADOR", Mayo 2007.

**ANEXO 2. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO DE UNA MUESTRA DE PE DE BAJA DENSIDAD 1-BUTENO – VENELENE 2213**



File Name: A6072121.D00  
 Detector Type: Shimadzu DSC-50  
 Acquisition Date: 83/06/07  
 Acquisition Time: 22:35:51  
 Sample Name: PE Venelene 2da  
 Weight: 4.310[mg]  
 Cell: Aluminum  
 Atmosphere: Nitrogen  
 Rate Flow: 20.00[ml/min]  
 Operator: Andres

Temp Program

Rate [C/min]	Hold Temp [C]	Hold Time [min]
10.0	180.0	10.0

## ANEXO 3. HOJA TÉCNICA POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD 1-BUTENO VENELENE 2213

### Venelene 2213

Polietileno Lineal de Baja Densidad (PELBD) Buteno  
Grado: Inyección

#### Elementos distintivos:

- ◆ Excelente procesabilidad
- ◆ Alta flexibilidad

#### Aplicaciones Típicas:

- ◆ Inyección de artículos para uso doméstico e industrial de pared delgada y geometrías intrincadas
- ◆ Inyección de tapas y sobre tapas
- ◆ Base para concentrados de aditivos y pigmentos

#### Recomendaciones de Procesamiento:

- ◆ Intervalo de temperaturas de inyección: 150 a 190°C
- ◆ Temperatura del molde: < 20°C

Propiedades	Norma <sup>(1)</sup> ASTM	Unidades	Valor de referencia <sup>(2)</sup>
Índice de Fluidez (190°C / 2.16 Kg.)	D 1238	g/10 min	42.00
Densidad	D 792	g/cm <sup>3</sup>	0.9260
Designación NORVEN: (Termoplástico) Covenin (3581)-PE, MH, 28-E400			
Propiedades generales <sup>(3)</sup>			
Módulo en flexión	D 790	MPa	220
Esfuerzo en flexión al 5% de deformación	D 790	MPa	8
Esfuerzo de fluencia en tensión	D 638	MPa	10
Deformación en fluencia	D 638	%	23
Esfuerzo de ruptura en tensión	D 638	MPa	12
Deformación hasta ruptura	D 638	%	> 500
Resistencia al impacto Gardner	D 5420	KJ/m	5
Temperatura VICAT	D 1525	°C	100
ESCR <sup>(4)</sup> ( F 50 / 10% Igepal)	D 1693	h	1
Aditivos:			
Antioxidantes		Dosis estándar	
Ayudante de procesamiento		No contiene	
Estabilizantes UV		No contiene	

(1) Las normas COVENIN equivalentes a las ASTM utilizadas son las siguientes: Densidad Covenin 461-96; Índice de fluidez Covenin 1152-93; Propiedades mecánicas Covenin 1357-79, Temperatura Vicat 479-77.

(2) Los valores típicos son resultados promedio obtenidos en laboratorio, se muestran aquí solo como guías y en ningún momento como especificaciones.

(3) Las propiedades fueron evaluadas sobre probetas moldeadas por inyección bajo las siguientes condiciones: Perfil de temperatura: 160-180°C; Presión de inyección 700 Bar; Presión de segunda etapa 500 Bar; Temperatura del molde 60°C. Tanto las propiedades mecánicas, como el ESCR dependen de las condiciones de procesamiento empleadas.

(4) ESCR: Resistencia al agrietamiento en medios químicamente activos (Environmental Stress Cracking Resistance).

Aviso al usuario: La información que se suministra es dada de buena fe y es correcta dentro de nuestros conocimientos. Sin embargo, POLIOLEFINAS INTERNACIONALES, C.A. declina toda responsabilidad por resultados obtenidos por el uso de esta información.

Este producto está registrado en el M.S.D.S. de Venezuela y cumple con los requisitos de la F.D.A. para el contacto con alimentos, incluyendo aplicaciones de cocción.

## ANEXO 4. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINACIÓN ABSORCIÓN DE AGUA DE COMPUESTOS



*The Society for engineering  
in agricultural, food, and  
biological systems*



Paper Number: MB04-305

### ***Flax Fiber-reinforced Composites and the Effect of Chemical Treatments on their Properties***

X. Li, S.A. Panigrahi, L.G. Tabil, W.J. Crerar

Department of Agricultural and Bioresource Engineering

University of Saskatchewan

57 Campus Drive, Saskatoon, SK, CANADA S7N 5A9

Written for presentation at the

**2004 North Central ASAE/CSAE Conference**

**Sponsored by the Manitoba Section of CSAE**

**Winnipeg, Manitoba, Canada**

**September 24-25, 2004**

#### ***Abstract.***

*Flax fibers as a reinforcing component for thermoplastic open up further possibilities in waste management. Natural fiber-reinforced composites have attracted increasing interest because of the advantages of fibers, such as low density, relatively high toughness, high strength and stiffness, good thermal properties and biodegradability. However, the main disadvantages of natural fibers in thermoplastics are the poor compatibility between the fibers and the matrix and the relative high moisture sorption. Therefore the chemical treatments were considered in modifying the properties of fibers. In this paper, the properties of flax fibers and different surface modifications of flax fibers were reviewed. Composites with reinforced with flax fiber by alkali, silane, potassium permanganate, sodium chlorite, and acrylic acid treatments were compared with untreated fiber-reinforced composites and the effect of chemical treatments on physical and mechanical properties were also discussed. Acrylic acid treatment showed a relatively good effect in improving the physical and mechanical properties of fiber/LLDPE composite.*

**Keywords.** *flax fiber-reinforced composites, chemical treatments, alkali, silane, potassium permanganate, sodium chlorite, acrylic acid*

#### **Introduction**

Using natural fibers as reinforcement in plastic composites has increased dramatically in recent years. Natural fiber-reinforced composites consist of polymer as the matrix material and natural fiber as the reinforcing element. They have been used in the plastics industry and automobile and packaging industries to cut down on material costs (Bledzki and Gassan 1999). Some of the potential applications of natural fiber-reinforced composites include door and instrument panels, package trays, glove boxes, arm rests, and seat backs (Pervaiz and Sain 2003). The advantages of natural fibers over that of man-made fibers are: low density, low cost, relatively low energy consumption, recyclability, and biodegradability (Mohanty et al. 2003; Voorn et al. 2001).

More than half of all Canadian flax is produced in Saskatchewan, with the remainder grown in Manitoba and Alberta (Warick 2001). Flax (*Linum usitatissimum*) fiber, which is a renewable resource, shows relative high mechanical properties (Voorn et al. 2001; Baley 2002) and is recognized as a potential replacement for glass fibers as reinforcing agent for composite materials.

The flax fiber surface is a complex heterogeneous polymer composed of cellulose hemicellulose, and lignin. The surface is influenced by polymer morphology, extractive chemicals, and processing conditions (Bledzki and Gassan 1999). Cellulose is a hydrophilic glucan polymer of D-glucopyranose units, which are linked together by  $\beta$ -(1-4)-glucosidic bonds (Rowell et al. 1997). This large amount of hydroxyl group gives flax fiber hydrophilic properties when used to reinforce hydrophobic matrices (Alvarez et al. 2003). The result is a very poor interface and poor resistance to moisture absorption. Chemical treatments were considered in modifying the properties of fibers.

Alkaline treatment is one of the most popular chemical treatments on natural fibers (Ray et al. 2001; Morrison et al. 2000; Mishar et al. 2001). Sodium hydroxide (NaOH) is used in this method to remove the hydrogen bonding in the network structure, thereby decreasing the surface roughness. Sarkar and Ray (2004) reported that the alkali treatment of jute fibers had significant effect on the mechanical, impact fatigue and dynamic mechanical behavior. The same results were obtained by Joseph and Thomas (1996), Velde and Kiekens (2003), Valadez-Gonzalez et al. (1999a), and Jacob et al. (2004). Silane-coupling agents were also found to be effective in modifying natural fiber-polymer matrix interface (Kim et al. 2001; Ishak et al. 2001; Lee et al. 2002; Debnath et al. 2003; de Weyenberg 2003). Valadez-Gonzalez et al. (1999b) treated henequén fibers with a 0.033% w/w aqueous silane solution and found that the efficiency of the silane treatment was higher than alkaline treatment. Permanganate treatment uses potassium permanganate (KMnO<sub>4</sub>) solution (in acetone) with different concentration for a soaking duration of 1-3 min (Paul et al. 1997; Joseph and Thomas 1996; Joseph et al. 1999; Sreekala et al. 2002). Mustata (1997) studied the sodium chlorite chemical treatment of the surface of bleached flax fiber. Acrylic acid was used in graft polymerization to modify the surface of fibers (Xu et al. 2002; Karlsson and Gatenholm 1999; Mishar et al. 2001).

Other chemical treatments such as acetylation (Hill et al. 1998; Rong et al. 2001; Sreekala and Thomas 2003), isocyanate treatment (Wu et al. 1996; Joseph and Thomas 1996; Sreekala and Thomas 2003), maleic anhydride treatment (Gassan and Bledzki 1997; Oever and Peijs 1998; Joseph et al. 2003), and benzoyl peroxide treatment (Joseph and Thomas 1996; Paul et al. 1997; Sreekala et al. 2000) were also used in modifying fiber surface or improving the interfacial adhesion of fiber and matrix.

The objective of this work is to investigate the effect of chemical pretreatments (alkali, silane, potassium permanganate, sodium chlorite, and acrylic acid treatments) on the physical and mechanical properties of treated flax fiber-reinforced composites against the untreated flax fiber-reinforced composites. Tensile testing, water absorption test, and scanning electron microscopy (SEM) were used in evaluating the properties of flax fiber-reinforced composites.

## Materials and Methods

### **Materials**

Short flax fibers (50%) were obtained from linseed flax grown in Saskatchewan and decorticated on a standard scutching mill at Durafibre Inc. in Canora, SK, Canada. Linear low density polyethylene (LLDPE) was used as polymer matrix (ExxonMobil Chemicals Canada, Toronto, ON, Canada).

### **Fiber Surface Treatments**

The flax fibers were washed with detergent solution and distilled water, then dried in an air oven for 24 h. The dried fibers were designated as untreated fibers. Various surface treatments were applied after the fibers were washed by detergent solution and dried.

**Alkali treatment:** Flax fibers were immersed in sodium hydroxide (NaOH) solution for 3 h. The fibers were then washed thoroughly with distilled water and dried.

**Silane treatment:** Flax fibers were soaked in NaOH solution for 0.5 h and washed with distilled water. Then the fibers were soaked in triethoxysilane coupling agent solution (alcohol water mixture at 60:40) for 0.5h, and the pH was adjusted between 3.5 and 4.0. Finally, the fibers were washed with distilled water and dried in the oven for 24 h.

**Potassium permanganate treatment:** Flax fibers were soaked in NaOH solution for 1 h, and then soaked in potassium permanganate (KMnO<sub>4</sub>) solution (in acetone) for 10min. Finally the fibers were put into thermostatic water bath at 50°C for 2 h, washed distilled water and dried.

**Sodium chlorite treatment:** Flax fibers were soaked in NaOH solution for 1 h, and then soaked in sodium chlorite solution at 70°C for 2 h, washed with distilled water and dried.

**Acrylic acid treatment:** Flax fibers were immersed in NaOH solution for 0.5 h, and then soaked in acrylic acid solution at 50°C for 1 h, washed with distilled water and dried.

### **Composite Preparation**

Chemical treated and untreated fibers were ground by the grinding mill (Falling Number, Huddinge, Sweden) and mixed with LLDPE in a blender (Waring Products Corporation, New York, NY, USA). The blend was fed into the twin-screw extruder (Werner & Pfleiderer, Ramsey, NJ, USA) at the Centre for Agri-Industrial Technology (CAIT, Edmonton, AB, Canada). Extruded strands were then pelletized using a grinding mill (Retsch GmbH 5657 HAAN, West Germany) and processed through an injection molding machine (Battenfeld Maschinen, Austria) at Saskatchewan Research Council (Saskatoon, SK, Canada).

### **Injection Molding**

The injection molding conditions used were: nozzle temperature of 70°C, ahead temperature of 180°C, back temperature of 160°C, 30 s cooling time, and injection pressure of 4.8 MPa. The dimensions design of specimen mold is according to test standard ASTM D638-97 (Table 1).

Table 1 Design dimensions for specimen mold.

Dimensions	mm (in)
Width of narrow section	13 (0.50)
Length of narrow section	57 (2.25)
Width overall	19 (0.75)
Length overall	165 (6.5)
Gage length	50 (2.00)
Distance between grips	115 (4.5)
Radius of fillet	76 (3.00)
Thickness	3.2 ± 0.4 (0.13 ± 0.02)

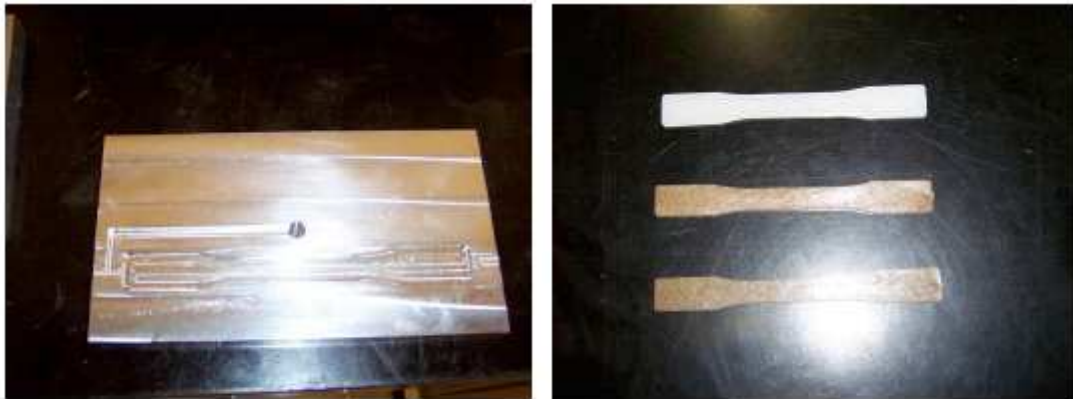


Fig.1 Tensile test specimen injection mold and specimens after injection molding.

### ***Water Absorption of Composites***

Rectangular specimens were cut from each sample with dimensions of 36 mm x 19 mm with 3.2~3.5 mm thickness. Four specimens were tested and the results were presented as average of tested specimens. The samples were dried in an oven at 50°C for 24 h, cooled in a desiccator, and weighed to the nearest 0.001g. Then all samples were immersed in water for 24 h at room temperature. The water on the surface of the samples was removed before weighing. Percent weight change during water sorption was determined as follows:

$$M\% = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100$$

where  $M_0$  is the dry initial weight,  $M_1$  is the weight after 24 h of immersion in water.

### ***Water Absorption of Composites***

Natural fiber/LLDPE composites have higher water absorption than LLDPE itself. Water absorption in a fibrous composite is dependent on temperature, fiber loading, orientation, permeability of the fiber, surface protection, area of the exposed surfaces, diffusivity, etc. (Sreekala et al. 2002). Chemical treatments of flax fibers can reduce the hydroxyl groups in the cell wall of flax fiber molecules, thus decreasing the water absorption of flax fiber-reinforced composites. But water absorption of treated fiber/LLDPE composites in experiment (Fig. 9) did not show the expected results. Potassium permanganate (P) and acrylic acid (A) treated fiber/LLDPE composites showed similar water absorption with untreated fiber/LLDPE composites. But alkali (N), silane (S), and sodium chlorite (C) treated fiber/LLDPE composites had higher water absorption instead. The reason here maybe because thermal shrinkage during injection molding was comparatively high and resulted in decohesion between the fibers and the LLDPE matrix resin. Shrinkage occurs in injection molding due to thermal contraction. As the material cools, the crystalline regions have higher density causing more shrinkage.

The reason why untreated fiber/LLDPE composite had lower water absorption than treated fiber/LLDPE composites and how to optimize injection molding to decrease water absorption need to be investigated further.

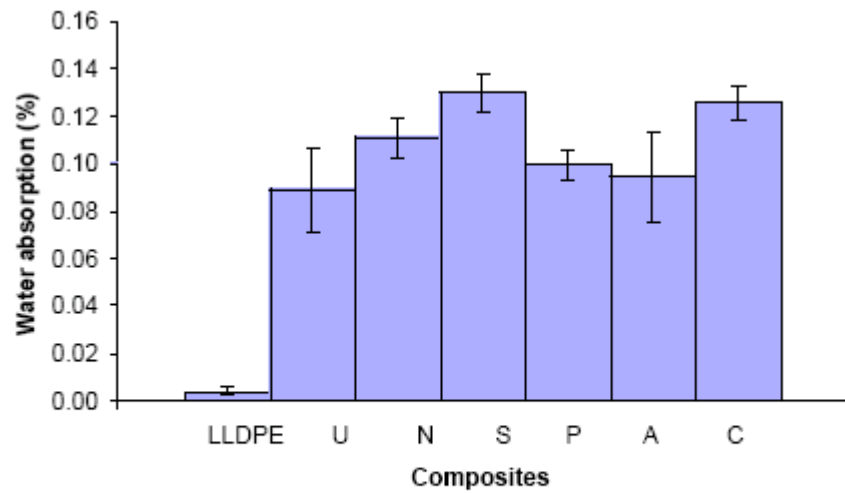


Fig.9 Water absorption of LLDPE and fiber/LLDPE composites (N = 4)

## Conclusion

The five chemical treatments: alkali, silane, potassium permanganate, sodium chlorite, and acrylic acid have significantly made the surface of flax fiber smooth according to SEM micrographs. Higher tensile strength was obtained for chemically treated flax fiber/LLDPE composites compared with pure LLDPE and untreated fiber/LLDPE composites. However, chemical treatments did not decrease the water absorption of composites in this experiment. Comparing the five treatments, acrylic acid treatment showed a relatively good effect at improving physical and mechanical properties of fiber/LLDPE composite. Research on choosing a polymer and optimizing the injection process parameters should be further studied.

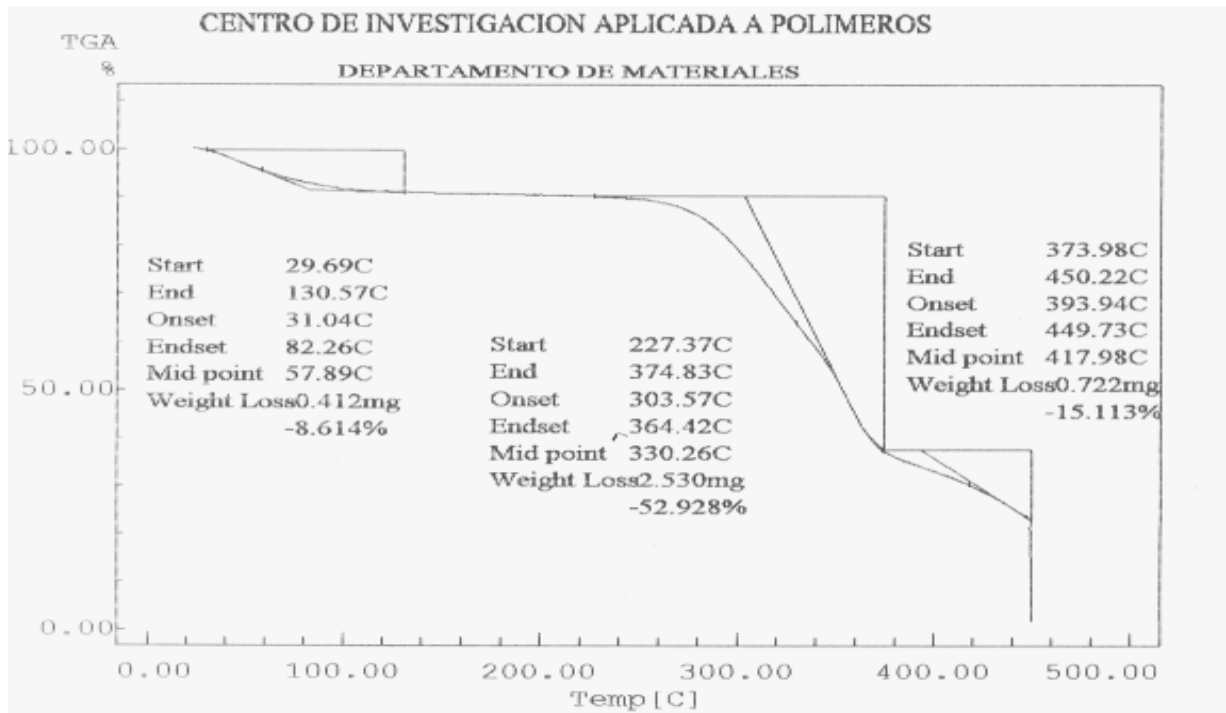


**ANEXO 5. PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN DE FIBRAS DE ABACÁ GRADO 3 VARIEDAD BUNGALANÓN**

<b>LONGITUD DE FIBRA: 150 mm</b>						
<b>VELOCIDAD DE PRUEBA: 30.0 mm/seg</b>						
<b>N°</b>	<b>PESO (g)</b>	<b>CARGA MAX (N)</b>	<b>DELTA LONGITUD (mm)</b>	<b>TITULO-TEX (g/m*1000)</b>	<b>TENACIDAD (cN/TEX)</b>	<b>Elongación a la Rotura</b>
1	0,0099	31,28	1,221	<b>66,00</b>	47,39	2,44
2	0,0049	15,26	0,9155	<b>32,67</b>	46,71	1,83
3	0,0052	17,55	0,9155	<b>34,67</b>	50,63	1,83
4	0,009	32,04	1,221	<b>60,00</b>	53,40	2,44
5	0,0089	27,85	0,9155	<b>59,33</b>	46,94	1,83
6	0,0108	43,87	1,221	<b>72,00</b>	60,93	2,44
7	0,0071	22,13	0,9155	<b>47,33</b>	46,75	1,83
8	0,0099	39,67	1,526	<b>66,00</b>	60,11	3,05
9	0,0064	27,47	1,221	<b>42,67</b>	64,38	2,44
10	0,0091	25,18	0,9155	<b>60,67</b>	41,51	1,83
11	0,0046	18,31	1,221	<b>30,67</b>	59,71	2,44
12	0,0089	31,66	0,9155	<b>59,33</b>	53,36	1,83
13	0,0074	30,9	0,9155	<b>49,33</b>	62,64	1,83
14	0,0094	31,66	1,221	<b>62,67</b>	50,52	2,44
15	0,0075	26,7	0,9155	<b>50,00</b>	53,40	1,83
16	0,0054	21,36	0,9155	<b>36,00</b>	59,33	1,83
17	0,0101	38,53	1,221	<b>67,33</b>	57,22	2,44
18	0,0046	19,07	0,9155	<b>30,67</b>	62,18	1,83
19	0,0072	25,56	0,6184	<b>48,00</b>	53,25	1,24
20	0,0065	26,32	0,9155	<b>43,33</b>	60,74	1,83
21	0,0097	42,34	1,221	<b>64,67</b>	65,47	2,44
22	0,006	25,94	1,221	<b>40,00</b>	64,85	2,44
23	0,0046	20,6	1,221	<b>30,67</b>	67,17	2,44

24	0,008	32,81	0,9155	<b>53,33</b>	61,52	1,83
25	0,0057	19,84	0,9155	<b>38,00</b>	52,21	1,83
26	0,0091	40,05	1,526	<b>60,67</b>	66,02	3,05
27	0,0081	34,71	1,221	<b>54,00</b>	64,28	2,44
28	0,0078	28,99	1,221	<b>52,00</b>	55,75	2,44
29	0,01	38,91	1,221	<b>66,67</b>	58,37	2,44
30	0,0109	46,54	1,221	<b>72,67</b>	64,05	2,44
			Promedio	<b>51,71</b>	<b>57,03</b>	<b>2,18</b>
			Desv. Est	<b>13,28</b>	<b>6,98</b>	<b>0,41</b>
			CV	<b>25,68</b>	<b>12,24</b>	<b>18,98</b>

## ANEXO 6. TERMOGRAVIMETRÍA DEL ABACÁ



### TGA DE LA FIBRA DE ABACÁ

Reporte:

Existen tres intervalos de temperatura a analizar:

- I. En el intervalo desde 29 hasta 130°C se puede apreciar una pérdida de peso debido a la pérdida de humedad de la fibra.
- II. Desde 227 hasta 374°C se observa la más importante pérdida de peso debido a la degradación de la fibra con la temperatura.
- III. Finalmente desde 373 hasta 450°C la pérdida de peso continúa en menor escala por la degradación de la celulosa combustionada.

Travez, Deisy

## ANEXO 7. RESULTADOS DE PRUEBAS MECÁNICAS SOBRE COMPUESTOS OBTENIDOS Y PROPIEDADES ESPECÍFICAS A TRACCIÓN

ENSAYOS DE TRACCIÓN								
15%20mm			25%20mm			35%20mm		
Especimen 1			Especimen 5			Especimen 5		
Área transversal cuello	13,93536		Área transversal cuello	15,70578		Área transversal cuello	19,35492	
Esfuerzo Máximo:	<b>9,413</b>		Esfuerzo Máximo:	<b>13,113</b>		Esfuerzo Máximo:	<b>14,061</b>	
Deformación Máxima:	22,61616		Deformación Máxima:	35,66160		Deformación Máxima:	35,98672	
Módulo de Young:	<b>263,71442</b>		Módulo de Young:	<b>384,14730</b>		Módulo de Young:	<b>373,40974</b>	
N° Dato	Deformación [%]	Esfuerzo [MPa]	N° Dato	Deformación [%]	Esfuerzo [MPa]	N° Dato	Deformación [%]	Esfuerzo [MPa]
1	0,31496	1,927	1	0,29464	1,795	1	0,31496	1,330
2	0,61976	2,815	2	0,60960	3,200	2	0,61976	2,406
3	0,95504	3,958	3	0,94488	4,059	3	0,95504	3,420
4	1,29032	4,839	4	1,27000	5,308	4	1,29032	4,877
5	1,62560	5,717	5	1,60528	6,868	5	1,61544	6,334
6	1,96088	6,422	6	1,94056	8,352	6	1,95072	7,662
7	2,28600	7,125	7	2,27584	9,601	7	2,27584	8,867
8	2,62128	7,655	8	2,61112	10,692	8	2,62128	9,944
9	2,95656	8,181	9	2,94640	11,629	9	2,95656	10,894
10	3,29184	8,622	10	3,28168	12,331	10	3,28168	11,020
11	3,61696	8,973	11	3,60680	12,799	11	3,62712	11,654
12	3,95224	9,148	12	3,94208	13,113	12	3,95224	11,528
13	4,28752	9,324	13	4,27736	12,799	13	4,28752	12,604
14	4,62280	9,413	14	4,61264	11,318	14	4,62280	13,174
15	6,26872	9,413	15	4,94792	10,692	15	4,95808	13,679
16	7,93496	8,883	16	5,28320	10,069	16	5,29336	13,996
17	8,60552	8,092	17	5,61848	9,522	17	5,62864	14,061
18	8,94080	7,300	18	5,95376	8,975	18	5,96392	13,870
19	9,26592	6,509	19	6,27888	8,429	19	6,29920	13,491
20	9,60120	5,893	20	6,61416	7,961	20	6,63448	12,856
21	9,93648	5,366	21	6,94944	7,415	21	6,96976	12,160
22	10,61720	4,574	22	7,27466	6,868	22	7,30504	11,590
23	11,27760	3,693	23	7,62000	6,477	23	7,64032	11,084
24	11,94816	3,167	24	8,28040	5,619	24	8,30072	9,944
25	12,61872	2,551	25	8,95096	4,917	25	8,97128	9,057
26	13,28928	2,023	26	9,61136	4,214	26	9,64184	7,979
27	14,28496	1,495	27	10,61720	3,435	27	10,30224	7,157
28	15,95120	1,144	28	12,28344	2,810	28	10,97280	6,270
29	17,61744	0,968	29	13,95984	2,341	29	11,97864	5,320
30	19,29384	0,880	30	15,62608	1,951	30	12,97432	4,433
31	20,96008	0,880	31	17,29232	1,870	31	14,30528	3,546
32	22,61616	0,792	32	18,95856	1,561	32	15,97152	2,850
33	0,00000	0,000	33	20,62480	1,405	33	17,64792	2,471
34	0,00000	0,000	34	22,30120	1,327	34	19,31416	2,090
35	0,00000	0,000	35	23,96744	1,171	35	20,97024	1,837
36	0,00000	0,000	36	25,64384	1,093	36	22,64664	1,647
37	0,00000	0,000	37	27,31008	1,015	37	24,32304	1,457
38	0,00000	0,000	38	28,97632	1,015	38	25,98928	1,330
39	0,00000	0,000	39	30,65272	0,937	39	27,65552	1,267
40	0,00000	0,000	40	32,31896	0,858	40	29,32176	1,140
41	0,00000	0,000	41	33,98520	0,858	41	30,99816	1,077
42	0,00000	0,000	42	35,66160	0,781	42	32,66440	1,077
43	0,00000	0,000	43	0,00000	0,000	43	34,32048	1,013
44	0,00000	0,000	44	0,00000	0,000	44	35,98672	1,013

ENSAYOS DE FLEXIÓN								
15%20mm			25%20mm			35%20mm		
Especimen 1			Especimen 4			Especimen 7		
Espesor:	2,2592		Espesor:	2,546		Espesor:	3,2174	
Separación apoyos:	36,1472		Separación apoyos:	40,736		Separación apoyos:	51,4784	
L/h6	7,0822		L/h6	6,2844		L/h7	4,9730	
Esfuerzo Máximo:	<b>16,931</b>		Esfuerzo Máximo:	<b>23,113</b>		Esfuerzo Máximo:	<b>21,030</b>	
Esfuerzo al 5% Deformación	<b>10,420</b>		Esfuerzo al 5% Deformación	<b>15,024</b>		Esfuerzo al 5% Deformación	<b>15,545</b>	
Deformación Máxima:	13,25259		Deformación Máxima:	13,15642		Deformación Máxima:	11,77772	
Módulo de Young:	<b>224,46873</b>		Módulo de Young:	<b>176,34389</b>		Módulo de Young:	<b>218,54027</b>	
N° Dato	Deformación [%]	Esfuerzo [MPa]	N° Dato	Deformación [%]	Esfuerzo [MPa]	N° Dato	Deformación [%]	Esfuerzo [MPa]
1	0,06324	0,000	1	0,06859	1,166	1	0,04934	0,914
2	0,15459	1,302	2	0,13718	2,311	2	0,10855	0,914
3	0,25297	0,000	3	0,21823	2,311	3	0,17269	1,829
4	0,34431	0,000	4	0,29929	3,466	4	0,23684	1,829
5	0,43566	1,302	5	0,38035	3,466	5	0,30098	1,829
6	0,52701	0,000	6	0,46141	4,621	6	0,36512	1,829
7	0,61836	1,302	7	0,54247	4,621	7	0,42927	2,743
8	0,70971	1,302	8	0,62353	5,778	8	0,49834	3,657
9	0,80808	1,302	9	0,70459	5,778	9	0,56249	4,572
10	0,89943	1,302	10	0,79188	5,778	10	0,62663	4,572
11	0,99078	1,302	11	0,87294	6,931	11	0,69078	5,485
12	1,08213	1,302	12	0,95400	6,931	12	0,75492	6,401
13	1,17348	1,302	13	1,03505	6,931	13	0,81906	6,401
14	1,26483	1,302	14	1,11611	6,931	14	0,88321	7,316
15	1,35618	1,302	15	1,19717	6,931	15	0,94735	7,316
16	1,44555	2,605	16	1,27823	6,931	16	1,01149	7,316
17	1,54590	2,605	17	1,36552	6,931	17	1,07564	7,316
18	1,63022	2,605	18	1,44658	6,931	18	1,13978	7,316
19	1,72860	3,907	19	1,52764	6,931	19	1,20886	7,316
20	1,81995	3,907	20	1,60870	6,931	20	1,27300	7,316
21	1,91130	3,907	21	1,68976	8,089	21	1,33714	7,316
22	2,00264	5,207	22	1,77082	8,089	22	1,40129	8,229
23	2,09399	5,207	23	1,85188	8,089	23	1,46543	8,229
24	2,18534	5,207	24	1,93293	8,089	24	1,53451	8,229
25	2,28372	5,207	25	2,01399	9,246	25	1,59865	8,229
26	2,37507	6,512	26	2,09505	9,246	26	1,66279	8,229
27	2,46642	6,512	27	2,18234	9,246	27	1,72694	8,229
28	2,55776	6,512	28	2,26340	10,399	28	1,79108	8,229
29	2,64911	6,512	29	2,34446	10,399	29	1,85522	8,229
30	2,83884	7,811	30	2,42552	10,399	30	1,91937	8,229
31	3,29558	9,115	31	2,50658	10,399	31	1,98845	8,229
32	3,75935	9,115	32	2,58764	11,556	32	2,04765	8,229
33	4,22312	9,115	33	2,67493	11,556	33	2,11180	8,229
34	4,40582	10,420	34	3,08022	12,709	34	2,18088	8,229
35	4,86959	10,420	35	3,49175	13,867	35	2,24502	8,229
36	5,23498	11,719	36	3,89704	15,024	36	2,30916	8,229
37	5,69875	11,719	37	4,30857	15,024	37	2,37331	8,229
38	5,97280	13,023	38	4,71386	15,024	38	2,43745	8,229
39	6,43657	13,023	39	5,12539	15,024	39	2,50653	8,229
40	6,90034	13,023	40	5,53692	15,024	40	2,57067	8,229
41	6,98466	14,323	41	5,94845	15,024	41	2,63481	8,229
42	7,44843	14,323	42	6,35374	15,024	42	2,69896	8,229
43	7,91220	14,323	43	6,76527	15,024	43	3,02461	9,145
44	8,00355	15,627	44	7,17680	17,334	44	3,34533	10,973
45	8,46732	15,627	45	7,58832	18,488	45	3,67098	11,889
46	8,92407	15,627	46	7,99362	18,488	46	3,99663	12,801
47	9,38784	15,627	47	8,40515	19,645	47	4,32228	13,717
48	9,85161	15,627	48	8,81044	19,645	48	4,64793	14,630
49	10,03430	16,931	49	9,22197	19,645	49	4,97358	15,545
50	10,49105	16,931	50	9,30302	20,798	50	5,29430	15,545
51	10,95482	16,931	51	9,71455	20,798	51	5,61995	16,458
52	11,41156	16,931	52	10,12608	20,798	52	5,94067	16,458
53	11,87533	16,931	53	10,53761	21,955	53	6,26632	16,458
54	12,33910	16,931	54	10,94914	21,955	54	6,58703	17,374
55	12,79585	16,931	55	11,35443	21,955	55	6,91269	17,374
56	13,25259	16,931	56	11,76596	21,955	56	7,23834	17,374
57	0,00000	0,000	57	11,93431	23,113	57	7,56399	18,289
58	0,00000	0,000	58	12,33960	23,113	58	7,88964	18,289
59			59	12,75113	23,113	59	8,21529	18,289
60			60	13,15642	23,113	60	8,53601	19,202
61			61			61	8,86166	19,202
62			62			62	9,18731	19,202
63			63			63	9,51296	19,202
64			64			64	9,83368	20,118
65			65			65	10,15933	20,118
66			66			66	10,48498	20,118
67			67			67	10,80570	20,118
68			68			68	11,13135	20,118
69			69			69	11,45700	21,030
70			70			70	11,77772	21,030

## ESFUERZO MÁXIMO Y MÓDULO DE YOUNG ESPECÍFICOS A LA TRACCIÓN

DENOMINACIÓN GRUPO DE PROBETAS	MÓDULO DE YOUNG ESPECÍFICO [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]	ESFUERZO MÁXIMO PROMEDIO ESPECÍFICO [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]
PE-SR-PO	92,100	12,389
COM-15%-10	169,122	9,756
COM-15%-20	267,998	8,944
COM-15%-30	264,791	11,020
COM-15%-CN	479,698	24,859
COM-25%-10	352,584	7,053
COM-25%-20	376,176	12,494
COM-25%-30	234,944	12,818
COM-25%-CN	1739,529	90,814
COM-35%-10	420,805	10,340
COM-35%-20	352,817	11,877
COM-35%-30	405,745	13,962
COM-35%-CN	1739,889	96,647

**ANEXO 8. PLANOS: 1) MOLDE DE ACERO USADO PARA MOLDEAR EL MATERIAL DE LA MATRIZ Y EL COMPUESTO, Y 2) TROQUEL DE CORTE DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN.**





