

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA**

### **DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE DOMOS DE POLIMETILMETACRILATO Y BALDOSAS DE RESINA POLIÉSTER INSATURADA REFORZADOS CON LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS DESECHADAS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
QUÍMICO**

**CARLA VANESA ARROYO MOYA**  
(carla\_vam@yahoo.com)

**CARLOS DAVID LOYO DÁVILA**  
(calosdavid\_1407@hotmail.com)

**DIRECTOR: ING. MIGUEL ALDÁS**  
(miguel.aldas@epn.edu.ec)

**Quito, abril 2015**

© Escuela Politécnica Nacional (2015)  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Carla Vanesa Arroyo Moya y Carlos David Loyo Dávila, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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.

---

Carla Vanesa Arroyo Moya

---

Carlos David Loyo Dávila

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carla Vanesa Arroyo Moya y Carlos David Loyo Dávila, bajo mi supervisión.

---

Ing. Miguel Aldás  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que nada a mis padres por su amor, paciencia y apoyo incondicional durante todo este proyecto.

A Oscar, por su amor, paciencia, y apoyo moral cada día para la terminación de este proyecto, por estar a mi lado en todos los momentos difíciles y por todas las cosas hermosas que hemos vivido.

A toda mi familia por estar siempre pendiente de mí, en especial en este momento de culminación de mi carrera profesional.

Al Ingeniero Miguel Aldás, por sus conocimientos, apoyo y amistad durante la realización de esta tesis. De igual manera al Ingeniero Ricardo Montero, por su colaboración durante el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos por su apoyo en los buenos y malos momentos a lo largo de esta etapa de formación profesional, ya que hicieron más alegre la vida universitaria.

A Iván, Liz, Inge Quiroz y al Inge Valle por su apoyo, y todas las personas que de alguna u otra manera colaboraron para alcanzar esta meta.

Finalmente a Dios por ser mi fortaleza y por su bendición en cada momento de mi vida.

**Carla**

## **AGRADECIMIENTOS**

Especialmente quiero expresar mi más grande agradecimiento a mis papis Ramiro y Martha, ya que este logro conseguido se lo debo enteramente a ellos y a su esfuerzo, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y especialmente durante mi carrera profesional, también les agradezco a mis hermanos Anghelo y Pame por su apoyo y sé que muy pronto ellos serán grandes profesionales.

A Denisse por su compañía y ayuda en los momentos más difíciles a lo largo de la universidad y del desarrollo proyecto, por haber compartido conmigo momentos muy hermosos y sé que los seguiremos compartiendo. A toda su familia por su amabilidad y gentileza.

Al Ingeniero Miguel Aldás por su confianza y apoyo desde el inicio hasta el final del proyecto, por brindarnos sus conocimientos, y porque más que nuestro director fue nuestro gran amigo. Al Ingeniero Ricardo montero por su ayuda a lo largo de todo el proyecto.

A mis amigos del CIAP: Andre, Pao, Jenny, José, Andrés (Champi), Pancho por su apoyo y compañía en el trascurso del proyecto. A Lis, Iván, Ing Quiroz, Ing Vladimir por su colaboración en el proyecto.

A Herman por ser siempre un amigo incondicional y sincero. A mis amigos: Raúl, Ily, Juan, Mauri, Ale, Lucy, Dj, Chalo, Capu, Wala, Anilu, Adrian y Sebas, por todos los momentos compartidos que hicieron de la universidad un mejor lugar ¡Disfruten!

A Dios por ser mi guía y darme la oportunidad de cumplir mis metas.

**Carlos**

## DEDICATORIA

*A mis padres América y Milton.*

*Carla*

*A mis padres Ramiro y Martha  
Mis hermanos Anghelo y Pame.*

*Carlos*

## ÍNDICES DE CONTENIDOS

	<b>PÁGINA</b>
RESUMEN	XVIII
INTRODUCCIÓN	XX
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1. Residuos electrónicos	1
1.1.1. Generalidades	1
1.1.2. Composición de los residuos electrónicos	2
1.1.2.1. Plásticos en los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	3
1.1.2.2. Tarjetas de circuitos impresos	5
1.1.3. Importancia ambiental	7
1.1.3.1. Directiva RAEE	8
1.1.3.2. Directiva ROSH	9
1.1.3.3. Disposición de los residuos de aparatos eléctricos y electrónico	9
1.1.4. Reciclaje físico de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos	9
1.1.4.1. Reciclaje de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos como carga en materiales compuestos con matriz de resina termoestable	10
1.1.4.2. Reciclaje de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos como carga en materiales compuestos con matriz de polímeros termoplásticos	12
1.1.4.3. Reciclaje de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos como materia prima de materiales de concreto	15
1.1.4.4. Reciclaje de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos como modificadores de materiales viscoelásticos	16
1.1.5. Reciclaje químico de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos	17
1.1.5.1. Reciclaje de la fracción no metálica de los residuos de tarjetas de circuitos impresos por procesos de pirolisis	18
1.1.5.2. Reciclaje de la fracción no metálica de los residuos de tarjetas de circuitos impresos por procesos de gasificación y co-combustión	19
1.1.5.3. Reciclaje de la fracción no metálica de los residuos de tarjetas de circuitos impresos por procesos de depolimerización con fluidos supercríticos	20
1.2. Materiales compuestos	21
1.2.1. Generalidades	21
1.2.1.1. Matriz polimérica del material compuesto	23
1.2.1.2. Mezclado dispersivo y distributivo	23
1.2.2. Resinas poliéster insaturadas	25
1.2.2.1. Generalidades	25
1.2.2.2. Síntesis de la resina poliéster insaturada	25

1.2.2.3.	Curado de resinas poliéster insaturadas	26
1.2.2.4.	Iniciadores	27
1.2.2.5.	Aceleradores o catalizadores	27
1.2.3.	Polimetilmetacrilato	28
1.2.4.	Propiedades mecánicas	29
1.2.4.1.	Ensayo de tracción	32
1.2.4.2.	Ensayo de flexión	34
1.2.4.3.	Ensayo de abrasión	35
1.2.5.	Métodos de caracterización de polímeros	35
1.2.5.1.	Espectroscopía de infrarrojo (FTIR)	35
1.2.5.2.	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	37
1.2.5.3.	Análisis termogravimétrico (TGA)	38
1.2.5.4.	Microscopía óptica (MO)	39
1.2.5.5.	Microscopía electrónica de barrido (MEB)	39
<b>2.</b>	<b>PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>40</b>
2.1.	Caracterización de la fracción no metálica obtenida de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas	40
2.1.1.	Obtención de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras	40
2.1.2.	Caracterización de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadora	43
2.1.2.1.	Análisis por espectroscopia de infrarrojo (FTIR)	43
2.1.2.2.	Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC)	44
2.1.2.3.	Análisis de termogravimetría (TGA)	45
2.1.2.4.	Análisis para la determinación toxicidad de lixiviados (TCLP)	45
2.2.	Producción de las mezclas de materiales compuestos por polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada con la porción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras	46
2.2.1.	Producción de las mezclas de material compuesto por polimetilmetacrilato y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras	47
2.2.2.	Producción de las mezclas de material compuesto por resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras	48
2.3.	Evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas compuestas preparadas (en concentración y tamaño de partícula)	48
2.3.1.	Ensayo de tracción	49
2.3.2.	Ensayo de flexión	50
2.3.3.	Ensayo de abrasión	51

2.4.	Evaluación del encapsulamiento mediante caracterización estructural de los materiales compuestos y determinación de toxicidad de lixiviados	52
2.4.1.	Evaluación del mezclado dispersivo-distributivo	52
2.4.2.	Microscopía óptica (MO)	53
2.4.3.	Microscopía electrónica de barrido (MEB)	53
2.4.4.	Análisis para la determinación toxicidad de lixiviados (TCLP)	54
2.5.	Diseño de una planta para procesar 600 toneladas de residuos electrónicos para la producción de materiales compuestos de polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada reforzados con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos desechadas	55
2.6.	Establecimiento de los costos de producción de domos y baldosas plásticas	56
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>57</b>
3.1.	Caracterización de la fracción no metálica obtenida de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas	57
3.1.1.	Obtención de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras	57
3.1.2.	Caracterización de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadora	61
3.1.2.1.	Análisis por espectroscopia de infrarrojo (FTIR)	61
3.1.2.2.	Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC)	66
3.1.2.3.	Análisis de termogravimetría (TGA)	67
3.1.2.4.	Análisis para la determinación toxicidad de lixiviados (TCLP)	70
3.2.	Producción de las mezclas de materiales compuestos por polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada con la porción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras	71
3.2.1.	Producción de las mezclas de material compuesto por polimetilmetacrilato y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras	72
3.2.2.	Producción de las mezclas de material compuesto por resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras	74
3.3.	Evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas compuestas preparadas (en concentración y tamaño de partícula)	76
3.3.1.	Ensayo de tracción	76
3.3.1.1.	Material compuesto por polimetilmetacrilato	76
3.3.1.2.	Material compuesto por resina poliéster insaturada	84
3.3.2.	Ensayo de flexión	91
3.3.2.1.	Material compuesto por polimetilmetacrilato	91
3.3.2.2.	Material compuesto por resina poliéster insaturada	97

3.3.3. Ensayo de abrasión	103
3.4. Evaluación del encapsulamiento mediante caracterización estructural de los materiales compuestos y determinación de toxicidad de lixiviados	105
3.4.1. Evaluación del mezclado dispersivo-distributivo	105
3.4.2. Microscopia óptica (MO)	107
3.4.3. Microscopia electrónica de barrido (MEB)	109
3.4.4. Análisis para la determinación toxicidad de lixiviados (TCLP)	111
3.5. Diseño de una planta para procesar 600 toneladas de residuos electrónicos para la producción de materiales compuestos de polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada reforzados con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos desechadas	114
3.5.1. Ingeniería conceptual	114
3.5.1.1. Definición del producto	114
3.5.1.2. Capacidad y localización de la planta	115
3.5.1.3. Disponibilidad de materias primas e insumos	116
3.5.1.4. Alternativa tecnológica	117
3.5.1.5. Identificación de los servicios	119
3.5.2. Ingeniería básica	119
3.5.2.1. Descripción del alcance del proyecto	119
3.5.2.2. Descripción detallada del proceso	120
3.5.2.3. Balance de masa	121
3.5.2.4. Diagrama de bloques (BFD) y diagrama de flujo (PFD) propuesto para la producción de materiales compuestos	122
3.5.2.5. Dimensionamiento y selección de equipos	122
3.6. Establecimiento de los costos de producción de domos y baldosas plásticas	127
3.6.1. Inversiones	127
3.6.2. Capital de operación	128
3.6.3. Ingresos por ventas	130
3.6.4. Indicadores económicos	131
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>133</b>
4.1. Conclusiones	133
4.2. Recomendaciones	134
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>136</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>144</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
<b>Tabla 1.1.</b>	Composición de los equipos eléctricos más importantes	3
<b>Tabla 1.2.</b>	Tipos de polímeros que se encuentran en los rae	5
<b>Tabla 1.3.</b>	Contenido de metales en placas de circuitos impresos de los más importantes aparatos eléctricos y electrónicos utilizados	7
<b>Tabla 1.4.</b>	Efecto del contenido de fracción no metálica en las propiedades de pcm	11
<b>Tabla 1.5.</b>	Efecto del tamaño de partícula de partícula de la fracción no metálica en las propiedades de pcm	11
<b>Tabla 1.6.</b>	Estudio de propiedades mecánica al usar la fracción no metálica en compuestos de resina epóxica	12
<b>Tabla 1.7.</b>	Concentración de cobre y bromo lixiviados en materiales compuesto de fracción no metálica (30%) y polipropileno	14
<b>Tabla 1.8.</b>	Rendimiento de la pirolisis de residuos de tarjetas de circuitos impresos a diferentes temperaturas de operación	18
<b>Tabla 1.9.</b>	Composición de la fracción líquida obtenida en la pirolisis a diferentes temperaturas	19
<b>Tabla 1.10.</b>	Sistemas de iniciador y acelerador con temperaturas óptimas para el curado de resina poliéster insaturada	28
<b>Tabla 2.1.</b>	Variable y niveles para la formulación de los materiales compuestos	46
<b>Tabla 2.2.</b>	Parámetros usados para realizar los ensayos de tracción	50
<b>Tabla 2.3.</b>	Parámetros usados para realizar los ensayos de flexión	51
<b>Tabla 2.4.</b>	Parámetros usados para realizar los ensayos de abrasión	52
<b>Tabla 3.1.</b>	Resultados de los pesos de las partes de las tarjetas que fueron removidas inicialmente	57
<b>Tabla 3.2.</b>	Resultados de las fracciones obtenidas después de la molienda en el molino de martillos	58
<b>Tabla 3.3.</b>	Resultados de la pérdida en peso del material durante la separación gravimétrica	59

<b>Tabla 3.4.</b>	Resultados obtenidos después de la separación gravimétrica.	59
<b>Tabla 3.5.</b>	Resultados de los pesos obtenidos en el tamizado con malla número 100 y 200	61
<b>Tabla 3.6.</b>	Resultados del análisis de grupos funcionales presentes en el espectro infrarrojo de la fracción no metálica con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm	63
<b>Tabla 3.7.</b>	Resultados del análisis de grupos funcionales presentes en el espectro infrarrojo de la fracción no metálica con tamaño de partícula menor a 0,075 mm	65
<b>Tabla 3.8.</b>	Resultados del análisis termogravimetría para ambos tamaños de partícula	69
<b>Tabla 3.9.</b>	Resultados obtenidos del análisis de toxicidad de lixiviados tanto para el material con tamaño de partícula 0,075-0,15 mm y 0,075 mm	71
<b>Tabla 3.10.</b>	Resultados obtenidos en el ensayo de tracción realizado al material compuesto por polimetilmetacrilato y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos	76
<b>Tabla 3.11.</b>	Resultados obtenidos en el ensayo de tracción realizado al material compuesto por resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos	84
<b>Tabla 3.12.</b>	Resultados obtenidos en el ensayo de flexión realizado al material compuesto por polimetilmetacrilato y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos	91
<b>Tabla 3.13.</b>	Resultados obtenidos en el ensayo de flexión realizado al material compuesto por resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos	97
<b>Tabla 3.14.</b>	Resultados obtenidos en los ensayos de abrasión para el material compuesto por polimetilmetacrilato	103
<b>Tabla 3.15.</b>	Resultados obtenidos en los ensayos de abrasión para el material compuesto por resina poliéster insaturada	105
<b>Tabla 3.16.</b>	Resultados obtenidos de la evaluación de distribución y dispersión de los materiales compuestos de polimetilmetacrilato	105
<b>Tabla 3.17.</b>	Resultados obtenidos de la distribución y dispersión de los materiales compuestos de resina poliéster insaturada	106

<b>Tabla 3.18.</b>	Resultados de tclp para los materiales compuestos seleccionados para el diseño de planta	112
<b>Tabla 3.19.</b>	Resultados de las concentraciones de lixiviados en condiciones reales	113
<b>Tabla 3.20.</b>	Propiedades mecánicas de los productos	115
<b>Tabla 3.21.</b>	Nomenclatura de los equipos utilizados para el diseño de la planta	121
<b>Tabla 3.22.</b>	Balance de masa de corrientes 1-12	123
<b>Tabla 3.23.</b>	Balance de masa corrientes 12-25	124
<b>Tabla 3.24.</b>	Inversión requerida para el terreno y construcción de la planta	127
<b>Tabla 3.25.</b>	Inversión requerida para los equipos	128
<b>Tabla 3.26.</b>	Inversión fija requerida para la planta	128
<b>Tabla 3.27.</b>	Inversión anual en mano de obra	129
<b>Tabla 3.28.</b>	Inversión en materia prima e insumos	130
<b>Tabla 3.29.</b>	Egresos anuales	130
<b>Tabla 3.30.</b>	Ingresos por ventas	131
<b>Tabla 3.31.</b>	Flujo de caja para el primer año de operación de la planta	132
<b>Tabla 3.32.</b>	Indicadores económicos	132
<b>Tabla AIV. 1.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material de polimetilmetacrilato puro	151
<b>Tabla AIV. 2.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,15 mm	152
<b>Tabla AIV. 3.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,15 mm	152
<b>Tabla AIV. 4.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm	153
<b>Tabla AIV. 5.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm	153

<b>Tabla AIV. 6.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,075 mm	154
<b>Tabla AIV. 7.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm	154
<b>Tabla AIV. 8.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material de resina poliéster insaturada puro	155
<b>Tabla AIV. 9.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm	155
<b>Tabla AIV. 10.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos de tamaño 0,15 mm	156
<b>Tabla AIV. 11.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de tamaño 0,15 mm	156
<b>Tabla AIV. 12.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,075 mm	157
<b>Tabla AIV. 13.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos de tamaño 0,075 mm	157
<b>Tabla AIV. 14.</b>	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de tamaño 0,075 mm	158
<b>Tabla AIV. 15.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material de polimetilmetacrilato puro	158
<b>Tabla AIV. 16.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,15 mm	159
<b>Tabla AIV. 17.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,15 mm	159
<b>Tabla AIV. 18.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm	160
<b>Tabla AIV. 19.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm	160

<b>Tabla AIV. 20.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,075 mm	161
<b>Tabla AIV. 21.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm	161
<b>Tabla AIV. 22.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material de resina poliéster insaturada puro	162
<b>Tabla AIV. 23.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm	162
<b>Tabla AIV. 24.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos de tamaño 0,15 mm	163
<b>Tabla AIV. 25.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de tamaño 0,15 mm	163
<b>Tabla AIV. 26.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,075 mm	164
<b>Tabla AIV. 27.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos de tamaño 0,075 mm	164
<b>Tabla AIV. 28.</b>	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de tamaño 0,075 mm	165
<b>Tabla AV. 1.</b>	Valor-p para cada parámetro estudiado en los ensayos de tracción del material compuestos de polimetilmetacrilato	166
<b>Tabla AV. 2.</b>	Valor-p para cada parámetro estudiado en los ensayos de flexión del material compuestos de polimetilmetacrilato	166
<b>Tabla AV. 3.</b>	Valor-p para cada parámetro estudiado en los ensayos de tracción del material compuestos de resina poliéster insaturada	167
<b>Tabla AV. 4.</b>	Valor-p para cada parámetro estudiado en los ensayos de flexión del material compuestos de resina poliéster insaturada	167
<b>Tabla AVI. 1.</b>	Propiedades mecánicas de domos comercializados marca stabilit	168

<b>Tabla AVI. 2.</b>	Propiedades mecánicas de las baldosa para uso interior, según la norma une 127-020	168		
<b>Tabla AVIII. 1.</b>	Hoja de especificación de banda transportadora	172		
<b>Tabla AVIII. 2.</b>	Hoja de especificación de cizalla hidráulica	173		
<b>Tabla AVIII. 3.</b>	Hoja de especificación de molino de martillos	174		
<b>Tabla AVIII. 4.</b>	Hoja de especificación del tamiz vibratorio	175		
<b>Tabla AVIII. 5.</b>	Hoja de especificación de separador gravimétrico	176		
<b>Tabla AVIII. 6.</b>	Hoja de especificación del secador	177		
<b>Tabla AVIII. 7.</b>	Hoja de especificación del molino de discos	178		
<b>Tabla AX. 1.</b>	Energía eléctrica requerida por día	183		
<b>Tabla AXI. 1.</b>	Flujo de caja para los primeros 5 años	184		
<b>Tabla AXI. 2.</b>	Flujo de caja a partir del sexto año; <b>ERROR! DEFINIDO.</b>		<b>MARCADOR</b>	<b>NO</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
<b>Figura 1.1.</b>	Peso físico y peso ambiental para un teléfono móvil	8
<b>Figura 1.2.</b>	Resistencia a la tracción (-) y módulo de tracción (...) para materiales compuesto de fracción no metálica y polipropileno	13
<b>Figura 1.3.</b>	Resistencia a la flexión (-) y módulo de flexión (...) para materiales compuesto de fracción no metálica y polipropileno	14
<b>Figura 1.4.</b>	Resistencia a la compresión de los residuos de PCBs añadidos a cemento mortar con diferentes porcentajes de carga	16
<b>Figura 1.5.</b>	Viscosidad vs contenido de no metales en material compuestos de asfalto	17
<b>Figura 1.6.</b>	Diferencias entre mezclado dispersivo y distributivo	24
<b>Figura 1.7.</b>	Reacción entre anhídrido maleico y el propanodiol para la formación de un poliéster	26
<b>Figura 1.8.</b>	Estructura del polimetilmetacrilato	29
<b>Figura 1.9.</b>	Esfuerzo de tracción y esfuerzo flexión	30
<b>Figura 1.10.</b>	Esfuerzo de compresión y esfuerzo cortante	30
<b>Figura 1.11.</b>	Módulo de young para un material elástico	31
<b>Figura 1.12.</b>	Esquema del ensayo de tracción	32
<b>Figura 1.13.</b>	Formación de cuello del material sometido al ensayo de tracción	33
<b>Figura 1.14.</b>	Deflexión producida durante un ensayo de flexión	34
<b>Figura 1.15.</b>	Longitud de onda vs absorbancia en el espectro infrarrojo del poliestireno.	36
<b>Figura 2.1.</b>	Tarjeta de circuitos impresos	40
<b>Figura 2.2.</b>	Cizalladora utilizada para cortar las tarjetas de circuitos impresos	41
<b>Figura 2.3.</b>	Molino de martillos utilizado para la reducción de tamaño de las tarjetas de circuitos impresos	42
<b>Figura 2.4.</b>	Molino discos utilizado para la remolienda de la fracción no metálica	43

<b>Figura 2.5.</b>	a) máquina universal para ensayos mecánicos, b) soportes para ensayos de flexión, c) mordazas para ensayos de tracción.	49
<b>Figura 2.6.</b>	a) abrasímetro rotatorio, b) ruedas abrasivas utilizadas para el ensayo de abrasión, c) equipo para condicionar la rueda abrasiva	49
<b>Figura 2.7.</b>	Dimensiones de las placas usadas para los ensayos de tracción	50
<b>Figura 2.8.</b>	Dimensiones de las placas usadas para los ensayos de flexión	51
<b>Figura 2.9.</b>	Microscopio electrónico de barrido tescan	54
<b>Figura 3.1.</b>	Fracción metálica obtenida de la separación gravimétrica	60
<b>Figura 3.2.</b>	Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm.	62
<b>Figura 3.3.</b>	Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula menor a 0,075 mm	64
<b>Figura 3.4.</b>	Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm	66
<b>Figura 3.5.</b>	Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula 0,075 mm	67
<b>Figura 3.6.</b>	Diagrama termogravimétrico obtenido de la muestra con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm	68
<b>Figura 3.7.</b>	Diagrama termogravimétrico obtenido de la muestra con tamaño de partícula menor a 0,075 mm	68
<b>Figura 3.8.</b>	Placa obtenida de polimetimetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,15 mm para ensayo de abrasión	72
<b>Figura 3.9.</b>	Placa obtenida de polimetimetacrilato y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm para ensayo de flexión	73
<b>Figura 3.10.</b>	Placa obtenida de polimetimetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm para ensayo de abrasión	74
<b>Figura 3.11.</b>	Placas de resina poliéster insaturada y 35% de concentración de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula 0,15 mm	75
<b>Figura 3.12.</b>	Placa de material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos con tamaño de partícula 0,075 mm	75

<b>Figura 3.13.</b>	Resultados del desplazamiento al pico obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	77
<b>Figura 3.14.</b>	Resultados de la deformación al pico obtenida en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	78
<b>Figura 3.15.</b>	Resultados de la carga al pico obtenida en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	79
<b>Figura 3.16.</b>	Resultados de esfuerzo al pico obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	80
<b>Figura 3.17.</b>	Resultados de módulo de young obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	81
<b>Figura 3.18.</b>	Resultados de las fracturas de las placas en ensayos de tracción. A) material puro, b) material compuesto con residuos de tamaño <0,075 mm, c) material compuesto con residuos de tamaño 0,15-0,075 mm	82
<b>Figura 3.19.</b>	Resultados de desplazamiento al pico obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	85
<b>Figura 3.20.</b>	Resultados de deformación al pico obtenida en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	86
<b>Figura 3.21.</b>	Resultados de la carga al pico obtenida en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	87
<b>Figura 3.22.</b>	Resultados de esfuerzo al pico obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	87
<b>Figura 3.23.</b>	Resultados del módulo de young obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	89
<b>Figura 3.24.</b>	Resultados de las fracturas de las placas en ensayos de tracción. A) material puro, b) material compuesto con residuos de tamaño 0,15-0,075 mm, c) material compuesto con residuos de tamaño <0,075 mm	89

<b>Figura 3.25.</b>	Resultados del desplazamiento al pico obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	92
<b>Figura 3.26.</b>	Resultados de deformación al pico obtenida en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	93
<b>Figura 3.27.</b>	Resultados de carga al pico obtenida en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	94
<b>Figura 3.28.</b>	Resultados de esfuerzo al pico obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	94
<b>Figura 3.29.</b>	Resultados del módulo de flexión obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato	95
<b>Figura 3.30.</b>	Resultados de desplazamiento al pico obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	98
<b>Figura 3.31.</b>	Resultados de deformación al pico obtenida en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	99
<b>Figura 3.32.</b>	Resultados de carga al pico obtenida en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	100
<b>Figura 3.33.</b>	Resultados de esfuerzo al pico obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	100
<b>Figura 3.34.</b>	Resultados del módulo obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada	101
<b>Figura 3.35.</b>	Placa obtenida de polimetilmetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,075 mm para ensayo de abrasión	104
<b>Figura 3.36.</b>	Resultado de microscopía óptica con 100 aumentos del material compuesto de polimetilmetacrilato y 20% de residuos de tamaño 0,075 mm	107

<b>Figura 3.37.</b>	Resultado obtenido de microscopía óptica con 100 aumentos del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,075 mm	108
<b>Figura 3.38.</b>	Resultado obtenido mediante microscopía electrónica de barrido del material compuesto de 20% de residuos de tamaño 0,075 mm. A) 300 aumentos, b) 500 aumentos, c) 1 000 aumentos y d) 2 000 aumentos	109
<b>Figura 3.39.</b>	Imagen del material compuesto de resina poliéster insaturada con 35% de residuos y tamaño de partícula de 0,075 mm a) 300 aumentos, b) 500 aumentos, c) 1 000 aumentos y d) 2 000 aumentos	110
<b>Figura 3.40.</b>	Localización de la planta de producción	116
<b>Figura 3.41.</b>	Diagrama de bloques (BFD) propuesto para la producción de materiales compuestos	125
<b>Figura 3.42.</b>	Diagrama de flujo (PFD) propuesto para la producción de materiales compuestos	126
<b>Figura AI. 1.</b>	Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm para la segunda muestra	145
<b>Figura AI. 2.</b>	Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm para la tercera muestra	145
<b>Figura AI. 3.</b>	Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula menor a 0,075 mm para la segunda muestra	146
<b>Figura AI. 4.</b>	Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula menor a 0,075 mm para la tercera muestra	146
<b>Figura AII. 1.</b>	Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm para la segunda muestra	147
<b>Figura AII. 2.</b>	Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm para la tercera muestra	147
<b>Figura AII. 3.</b>	Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula menor a 0,075 mm para la segunda muestra	148
<b>Figura AII. 4.</b>	Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula menor a 0,075 mm para la tercera muestra	148

- Figura AIII. 1.** Diagrama termogravimétrico obtenido de la segunda muestra con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm 149
- Figura AIII. 2.** Diagrama termogravimétrico obtenido de la tercera muestra con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm 149
- Figura AIII. 3.** Diagrama termogravimétrico obtenido de la segunda muestra con tamaño de partícula menor a 0,075 mm 150
- Figura AIII. 4.** Diagrama termogravimétrico obtenido de la tercera muestra con tamaño de partícula menor a 0,075 mm 150

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO I</b> Resultados de espectroscopia de infrarrojo	145
<b>ANEXO II</b> Resultados de calorimetría diferencial de barrido	147
<b>ANEXO III</b> Resultados de termogravimetría	149
<b>ANEXO IV</b> Resultados completos de pruebas de tracción y flexión	151
<b>ANEXO V</b> Análisis ANOVA	166
<b>ANEXO VI</b> Propiedades de domos y baldosas comercializadas	168
<b>ANEXO VII</b> Cálculos para el balance de masa	169
<b>ANEXO VIII</b> Hojas de especificaciones de equipos	172
<b>ANEXO IX</b> Calculo de la dimensión de los reactores	179
<b>ANEXO X</b> Resumen de costos	181
<b>ANEXO XI</b> Flujo de caja	184

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de una planta productora de domos de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada reforzados con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras, para lo cual se llevó a cabo la recuperación, caracterización de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos y finalmente la producción de los materiales compuestos.

Para la producción de los materiales compuestos se llevó a cabo las mezclas con polimetilmetacrilato con 10%, 15% y 20% de la fracción no metálica y resina poliéster insaturada con 20%, 30% y 35% de la fracción no metálica con tamaños de partícula 0,15-0,075 mm y <0,075 mm. Los materiales compuestos obtenidos se los sometió a pruebas mecánicas de tracción, flexión y abrasión para seleccionar el material compuesto para el diseño de la planta.

El material de polimetilmetacrilato con 20% de la fracción no metálica de tamaño de partícula <0,075 mm y el material con resina poliéster insaturada y 35% de la fracción no metálica de tamaño de partícula <0,075 mm fueron los materiales compuestos seleccionados para el diseño de la planta debido a que presentaron, en general las propiedades mecánica, más altas; especialmente el esfuerzo al pico que fue de 45,74 y 17,36 MPa para el polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada respectivamente en ensayos de tracción.

Los materiales seleccionados fueron analizados mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, donde se determinó que existe una buena adherencia de los residuos al polimetilmetacrilato mejorando sus propiedades mecánicas, lo cual no sucede en el caso de la resina poliéster insaturada ya que se formaron agujeros que ocasionaron la disminución de las propiedades mecánicas con respecto al material puro.

Los parámetros considerados para la producción de los materiales compuestos sirvieron de base para el diseño de la planta, para una capacidad de procesamiento

de 600 toneladas de residuos electrónicos al mes. Por último se realizó un análisis económico que permitió evaluar la rentabilidad de la planta obteniéndose un VAN de 313 364,92 USD y un TIR de 23,55%.

## INTRODUCCIÓN

Los residuos de aparatos electrónicos son todos los aparatos electrónicos que pasan a ser residuos una vez que ha terminado su vida útil, los cuales comprenden a todos los componentes, subconjunto y consumibles que forman parte del producto al momento que se desecha. Estos residuos electrónicos son producto de la creciente cantidad de aparatos electrónicos en los últimos años (Directiva de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, 2006, p.1).

Los residuos de aparatos electrónicos son parte de los residuos sólidos que se generan en el mundo, ya que los aparatos electrónicos como celulares y computadoras se renuevan en un tiempo corto de 3 a 5 años. Estos residuos requieren de un tratamiento adecuado porque si se los desecha producen un gran impacto ambiental debido a sus componentes como por ejemplo los metales pesados, retardantes a la llama bromados entre otros. Por esto existen ciertos países con políticas que tratan de mitigar este tipo de impactos ambientales, estas políticas provocaron la creación de ciertas directivas, una de las más importantes es la directiva RAEE la cual establece leyes para la reparación, reúso y reciclaje de estos aparatos en el continente europeo (Román, 2014, p. 3; Goodship y Stevels, 2012, p. 93).

En la mayoría de países de América Latina el reciclaje de los RAEE se limita al desmontaje de los aparatos para ser comercializados a países europeos y asiáticos, como es el caso de Ecuador que para este año 2015 se estima que el 84% de los hogares contará con al menos un aparato electrónico, generando alrededor de 14 000 toneladas de residuos electrónicos. Sin embargo, en países como Argentina, Colombia, Chile, Brasil y Perú se realiza el reciclaje de metales pero en cantidades muy bajas (Román, 2014, p. 19, Boeni; Silva y Ott, 2008, pp. 2,3).

Las placas de circuitos impresos son la plataforma sobre la cual los elementos microelectrónicos son colocados, proporcionan las interconexiones eléctricas entre sus componentes, se encuentran en prácticamente todos los aparatos eléctricos y

electrónicos. Estas placas son una mezcla de fibra de vidrio, resina polimérica y metales, debido a esta compleja mezcla y sus características hacen que su reciclaje se dificulte (LaDou, 2006, p. 211; Guo, Guo y Xu, 2009, p. 568).

El reciclaje de estas placas consiste en la recuperación de la fracción metálica y la fracción no metálica que corresponde entre el 70% y 80% de las placas. Esta fracción no metálica está comprendida por fibra de vidrio (65%), resina epóxica (32%), impurezas (cobre:<3%, soldadura<0.1%) y retardantes a la llama bromados (Guo et al, 2009, p. 569).

La disposición y recuperación de la fracción no metálica de los residuos de los aparatos electrónicos tiene un alto impacto ambiental debido a su contenido de sustancias peligrosas como retardantes a la llama, cadmio y plomo, lo cual implica un alto costo de producción (Wager, Schlupe, Muller y Gloor, 2011, p. 628).

Existen varias técnicas de reciclaje de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos, como el reciclaje químico, que consiste en la descomposición de los polímeros en sus monómeros o compuestos químicos, y el reciclaje físico, el cual combina la fracción no metálica con diferentes materiales los cuales pueden ser plásticos, concreto o materiales viscoelásticos, formando un material compuesto y mejorando las propiedades de la matriz utilizada como resistencia, tracción, durabilidad y permeabilidad (Guo et al, 2009, p. 571, 579).

El objetivo general del presente proyecto de titulación consiste en el diseño de una planta productora de domos de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada reforzados con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras. El diseño de la planta parte de la recuperación y caracterización de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos, y la producción de los materiales compuestos que tienen como finalidad ser un producto comercial. Este proceso es una alternativa del reciclaje y reúso de la fracción no metálica de los residuos electrónicos, para disminuir el impacto ambiental que estos producen al ser desechados sin el debido tratamiento.

# **1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

## **1.1. RESIDUOS ELECTRÓNICOS**

La directiva de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos define a los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) como: “todos los aparatos que para funcionar debidamente necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos, y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes y campos, y que están destinados a utilizarse con una tensión nominal no superior a 1000 voltios en corriente alterna y 1500 voltios en corriente continua” y a los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) como: “Todos los aparatos eléctricos o electrónicos que pasan a ser residuos, este término comprende todos aquellos componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto en el momento en que se desecha” (Directiva de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, 2006, p.1).

### **1.1.1. GENERALIDADES**

La cantidad de aparatos eléctricos y electrónicos producidos en el mundo ha incrementado notablemente en los últimos años, y estima que existirá un incremento de la producción de nuevos equipos eléctricos y electrónicos de 20 millones de toneladas en el año 1990 a 75 millones de toneladas en el año 2015, estos equipos electrónicos están compuestos por una variedad de materiales y sustancias, a las cuales se les debe dar un tratamiento adecuado una vez terminada su vida útil, ya que si se los desecha se produce un gran impacto ambiental y un desperdicio de dinero debido a sus costosos componentes. Es por esta razón que se han creado en ciertos países políticas que tratan de contener este tipo de impactos ambientales, estas políticas han provocado la creación de ciertas directivas, una de las más importantes es la directiva RAEE europea la cual se dedica a promulgar leyes para reparación, reúso y reciclaje de este tipo de equipos (Goodship y Stevels, 2012, p. 93).

En ciertos países de América Latina la producción de aparatos eléctricos y electrónicos cada vez se acerca a los niveles de países industrializados, debido a esto el incremento de los RAEE también ha aumentado provocando que se creen nuevas oportunidades para la industria del reciclaje de este tipo de aparatos. En la mayoría de empresas de América Latina el reciclajes de los RAEE se ha restringido al desmontaje de los aparatos para ser comercializados a países europeos o asiáticos; sin embargo, el reciclaje de metales en países como Chile, Argentina, Perú, Colombia y Brasil han descubierto un amplio mercado pero las cantidades procesadas son aún muy bajas, ya que ni el marco político ni la infraestructura logística permiten el reciclaje de mayores cantidades (Boeni, Silva y Ott, 2008, pp. 2,3).

### **1.1.2. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS ELECTRÓNICOS**

Uno de los factores más importantes para determinar o seleccionar la tecnología apropiada para el reciclaje de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos es su composición. Sin embargo el progreso en cuanto a la producción de los AEE ha llevado a las industrias a utilizar una gran variedad de material para su fabricación, ya sea para mejorar su funcionamiento o debido a leyes que prohíban el uso de ciertas sustancias peligrosas.

Es por esta razón que para determinar la composición de los residuos electrónicos es necesario separarlos dependiendo de cada tipo de aparato, a continuación se presenta la tabla de resultados obtenidos en un estudio realizado en el año 2013, donde se muestra el peso promedio de tres tipos de metales: hierro, aluminio y cobre, además del porcentaje de plásticos y finalmente el porcentaje en peso de las tarjetas de circuitos impresos (PCB por sus siglas en inglés) debido a estas son una mezcla compleja de metales y plásticos (Oguchi, Sakanakura y Terazono, 2013, p. 1126).

**Tabla 1.1.** Composición de los equipos eléctricos más importantes

Tipo de Equipo	Número	Fracción en peso (%) de los materiales				
		Materiales de hierro	Materiales de Aluminio	Materiales de Cobre	Plástico	PCB
Refrigerador	2	47,6	1,3	3,4	4,7	5
Lavadora	3	51,7	2	3,1	35,3	1,7
Acondicionador de aire	2	45,9	9,3	17,8	17,7	2,7
CRT TV	15	12,7	0,1	3,9	17,9	87
PDP TV	3	33,6	15,1	1,2	10,1	7,8
LCD TV	5	43	3,8	0,8	31,8	11,6
PC de escritorio	6	47,2	-	0,9	2,8	9,4
PC portátil	10	19,5	2,4	1	25,8	13,7
DVD	4	62,5	-	3,6	15,3	14
Equipo de sonido	4	41,4	1,7	1,7	18,9	11,1
Fax	5	33,3	1,7	6,1	49,1	12,2
Teléfono	2	-	-	10,3	53,2	12,6
Impresora	6	35,5	0,2	3,2	45,8	7,4
Celular	16	0,8	-	0,3	37,6	30,3
Cámara digital	2	5,2	4,3	0,3	31,8	20,2
Videocámara	2	5	-	2,9	29	17,7
CD player	2	0,8	-	0,4	72,3	10,1
Microondas	5	71,9	0,4	4	6,5	4,7

Fuente: (Oguchi, Sakanakura y Terazono, 2013, p. 1127)

Elaboración: Oguchi, Sakanakura y Terazono

### 1.1.2.1. Plásticos en los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Desde 1980 el uso de materiales plásticos para la fabricación de aparatos eléctricos y electrónicos ha ido incrementando, alrededor de 14% a 16% en 1992, 22% en el 2000. En el 2008 se realizó un estudio de los RAEE recolectados en Europa, donde se estimó que más de 20.6% de los residuos corresponde a los plásticos. En este año se trataron alrededor de 15 millones de toneladas de residuos, de las cuales se encontraron 300 000 toneladas de plásticos (Wager, Schlupe, Muller y Gloor, 2011, p.628).

Los diseñadores de equipos eléctricos y electrónicos tienen una amplia gama de materiales poliméricos a su disposición, los cuales deben ser utilizados dependiendo de ciertos factores como costos, propiedades, disponibilidad, etc. Entre los materiales más usados se encuentran los siguientes:

Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es el polímero más utilizado en volumen, se maneja en la industria automotriz; Polioximetileno (POM) se utiliza por su resistencia a la oxidación y a solventes y combustibles; IXEF poliarilamida es uno de los polímeros más rígidos disponibles utilizado en los chasis y carcasas de teléfonos móviles; Polímeros líquidos cristalinos (LCP) con los cuales se puede trabajar constantemente a temperaturas sobre los 240°C; Poliamida (PA) los más usados en componentes eléctricos por sus buenas propiedades químicas, mecánicas y eléctricas; Tereftalato de polibutileno (PBT) muy usado por su alta estabilidad dimensional y su buena superficie de acabado (Schlummer, Gruber, Mäurer, Wolz y Van Eldik, 2007, p. 1866).

No existen datos consistentes de los tipos y cantidades de materiales plásticos que son recolectados y reciclados de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos; sin embargo, los más investigados son los polímeros de ingeniería. Los polímeros de ingeniería son materiales que poseen buenas propiedades mecánicas y térmicas (Tarantili, Mitsakaki y Petoussi, 2010, p. 405).

En la Tabla 1.2 se presentan ejemplos de los materiales poliméricos que se encuentra típicamente en los RAEE.

**Tabla 1.2.** Tipos de polímeros que se encuentran en los RAEE

Polímero	Abreviación	Aplicaciones	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Acrilonitrilo estireno acrilonitrilo</b>	ASA	Carcasas	1,00-1,20
<b>Acrilonitrilo butadieno estireno</b>	ABS	Carcasas	0,35-1,26
<b>Polimetilmetacrilato</b>	PMMA	Lentes, Iluminación	1,05-1,20
<b>Politetrafluoretileno</b>	PTFE	Engranajes, rodamientos	0,30-0,60
<b>Polímero líquido cristalino</b>	LCP	Recubrimientos , protecciones	1,38-1,82
<b>Poliacetal</b>	POM	Engranajes, rodamientos, aisladores	1,4
<b>Poliamida</b>	PA	Estructuras, carcasas	1,05-1,15
<b>Polibutileno tereftalato</b>	PBT	Interruptores, conectores, aisladores	1,10-1,60
<b>Tereftaato de polietileno</b>	PET	Films, pantallas	1,4
<b>Policarbonato</b>	PC	Pantallas, carcasas	1,2
<b>Polietileno</b>	PE	Empaques	0,90-0,96
<b>Polieteretercetona</b>	PEEK	Bisagras, interruptores, membranas	1,25-1,30
<b>Polieterimida</b>	PEI	sensores, conectores	1,30-1,70
<b>Óxido de polifenileno</b>	PPO	Carcasas , alojamientos	1,10-1,30
<b>Sulfuro de polifenileno</b>	PPS	Conectores	1,35-2,26
<b>Polipropileno</b>	PP	Empaques, Cajas	0,90-0,91
<b>Poliestireno</b>	PS	Carcasas	1,05-1,13
<b>Polisulfona</b>	PSU	Aplicaciones de alta temperatura	1,24-1,40
<b>Poliuretano</b>	PU	Conectores, recubrimientos	1,05-1,25
<b>Polivinilcloruro</b>	PVC	Sellos	1,39-1,40
<b>Estireno-Acrilonitrilo</b>	SAN	Carcasas	0,91-1,17

Fuente: (Schlummer, Gruber, Mäurer, Wolz y Van Eldik, 2007, p. 1866)

Elaboración: Schlummer, Gruber, Mäurer, Wolz y Van Eldik

### 1.1.2.2. Tarjetas de circuitos impresos

Las tarjetas de circuitos impresos (PCB por sus siglas en inglés) son la plataforma sobre la cual los componentes microelectrónicas se montan. Las PCBs proporcionan las interconexiones eléctricas entre sus componentes. Las PCBs se encuentran en prácticamente todos los aparatos eléctricos y electrónicos, además se encuentran en todos los sistemas de armamento y equipos aeroespaciales, siendo así una parte esencial del funcionamiento de los equipos. Las placas de circuitos impresos son la base de la industria electrónica, siendo su producción

crucial para la fabricación y venta de más de un billón de equipos electrónicos al año (LaDou, 2006, p. 211).

Las placas de circuitos impresos son una mezcla compleja de fibra de vidrio, resina polimérica y múltiples tipos de metales. Esta mezcla compleja y sus características hacen de su reciclaje uno de los más difíciles de realizar. Sin embargo, el reciclaje de estas placas no solo es importante ambientalmente, sino también es importante económicamente ya que está compuesta de varios metales valiosos (Guo, Guo y Xu, 2009, p. 568).

Oguchi et al (2013), realizó un estudio para determinar la cantidad de ciertos metales que contenían las placas de circuitos impresos de los más importantes aparatos eléctricos y electrónicos utilizados, los resultados de dicho estudio se presentan en la Tabla 1.3 (p. 1128).

El proceso de recuperación de la fracción metálica de las PCBs a nivel mundial ya está muy avanzado, sin embargo, la recuperación y reciclaje de la fracción no metálica no ha sido aún implementado, pese a que entre el 70% y 80% de las PCB corresponde a la parte no metálica. Esta fracción está comprendida por fibra de vidrio (65%), resina epóxica (32%), impurezas (cobre:<3%, soldadura<0.1%) y retardantes a la llama bromados. Esta falta de exploración en el reciclaje de la fracción no metálica se debe a que este reciclaje no constituye un beneficio altamente económico como es el reciclaje de la fracción metálica (Sohaili, Kumari, Suhaila, 2011, p. 946; Guo et al, 2009, p. 569).

**Tabla 1.3.** Contenido de metales en placas de circuitos impresos de los más importantes aparatos eléctricos y electrónicos utilizados

Tipo de Equipo	Contenido de metales de las placas de circuitos impresos (mg/Kg)										
	Metales tóxicos			Metales Comunes					Metales preciosos		
	Ba	Cr	Pb	Al	Cu	Fe	Sn	Zn	Ag	Au	Pd
<b>Refrigerador</b>	82	27	21 000	16 000	170 000	21 000	83 000	17 000	42	44	-
<b>Lavadora</b>	65	39	2 200	1 000	70 000	95 000	91 000	2 400	51	17	-
<b>Acondicionador de aire</b>	320	11	5 800	6 900	75 000	20 000	19 000	4 900	58	15	-
<b>CRT TV</b>	2 400	57	14 000	62 000	72 000	34 000	18 000	5 300	120	5	20
<b>PDP TV</b>	3 900	100	7 100	38 000	210 000	20 000	15 000	12 000	400	300	-
<b>LCD TV</b>	3 000	-	17 000	63 000	180 000	49 000	29 000	20 000	600	200	-
<b>PC de escritorio</b>	1 900	270	23 000	18 000	200 000	13 000	18 000	2 700	570	240	150
<b>PC portátil</b>	5 600	610	9 800	18 000	190 000	37 000	16 000	16 000	1 100	630	200
<b>DVD</b>	4 300	320	12 000	54 000	220 000	11 000	22 000	26 000	710	150	20
<b>Equipo de sonido</b>	1 400	5	19 000	29 000	150 000	12 000	22 000	14 000	57	6	-
<b>Teléfono</b>	4 700	3 500	19 000	67 000	96 000	150 000	34 000	8 600	2 400	-	-
<b>Impresora</b>	3 000	32	10 000	180 000	140 000	17 000	16 000	4 200	70	38	21
<b>Celular</b>	19 000	1 100	13 000	15 000	330 000	18 000	35 000	5 000	3 800	150	300
<b>Cámara digital</b>	16 000	2 500	17 000	24 000	270 000	30 000	39 000	8 800	3 200	780	200
<b>Videocámara</b>	18 000	300	30 000	29 000	210 000	45 000	38 000	13 000	5 000	530	970
<b>CD player</b>	8 600	770	12 000	68 000	200 000	46 000	50 000	20 000	3 700	370	10
<b>Microondas</b>	2 000	560	17 000	14 000	320 000	400 000	15 000	28 000	2 000	-	-

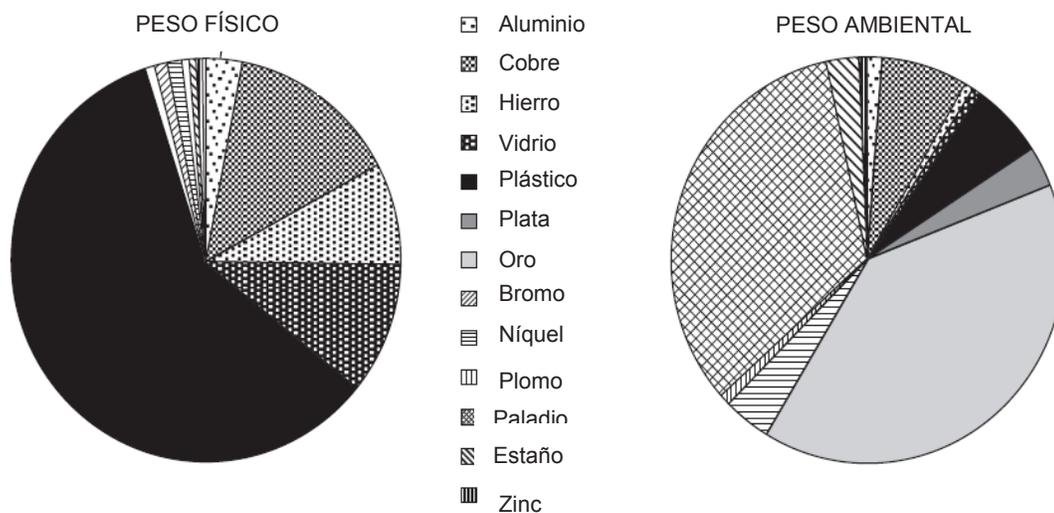
Fuente: (Oguchi et al, 2013, p. 1127)

Elaboración: Oguchi et al

### 1.1.3. IMPORTANCIA AMBIENTAL

La disposición y recuperación de los residuos de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos tiene altas implicaciones ambientales, en especial la fracción no metálica de dichos residuos, debido a que esta contiene sustancias peligrosas como cadmio, plomo o retardantes a la llama bromados. Por un lado se tiene los altos costos de producción para eliminar estas sustancias, y por otro la salud y el medioambiente (Wager, Schlupe, Muller y Gloor, 2011, p.628).

En cuanto a costos, el reciclaje se basa en dos tipos: el costo medioambiental y el desempeño económico, para determinar el costo ambiental se toma en cuenta todos los impactos ambientales que cierta sustancia tendría al ser desechada, el destino de las sustancias peligrosas, la carga ambiental adicional al procesamiento, transporte y uso de energía y además todos los impactos ambientales provocados por los materiales recuperados. Un ejemplo de esto se presenta en la siguiente figura, aquí se ilustra de manera efectiva los pesos de los diferentes materiales importantes contenidos en un teléfono celular, tanto su peso físico como su peso medioambiental (Goodship y Stevels, 2012, pp. 109,110).



**Figura 1.1.** Peso físico y peso ambiental para un teléfono móvil  
(Goodship y Stevels, 2012, p. 110)

### 1.1.3.1. Directiva RAEE

Esta directiva creada el 27 de enero de 2003 tiene por objetivo de que en lo posible no se generen los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos, y cuando esto no sea posible promover la reutilización, reciclado y recuperación con el fin de evitar la disposición de estos residuos en rellenos sanitarios. La directiva establece diez categorías para los diferentes tipos de materiales y además determina objetivos del proceso a seguirse para la recuperación de las sustancias peligrosas de cada tipo (Wager, Schlupe, Muller, 2010, p. 16).

### **1.1.3.2. Directiva RoSH**

La directiva RoSH instaurada en el año 2006 pone como los responsables medioambientales a los productores de los AEE. Según la directiva, los fabricantes no pueden usar cualquier material homogéneo, partes o sub partes que contengan un valor máximo de 0.1% en peso de plomo, mercurio, cromo, bifenilos polibromados (PBB) y éteres difenil polibromados (PBDE), y del 0.01% en peso de cadmio en materiales homogéneos. En esta directiva se considera materiales homogéneos a los materiales que no se pueden separar las sustancias en el desmantelamiento mecánico de las piezas (Nnorom, Osibanjo, 2009, pp. 185,186).

### **1.1.3.3. Disposición de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos**

En el pasado, una vez ya extraída la fracción metálica de los RAEE, la fracción no metálica era depositada en rellenos sanitarios o combustionada. Este tipo de métodos son considerados los de más bajo costo y más fácil implementación en el mundo, pero la combustión de la fracción no metálica causa la formación de dibenzodioxinas polibromadas y dibenzo furanos (PBDD/FS) las cuales son altamente tóxicas, mientras que en los rellenos sanitarios esta fracción da lugar a una contaminación secundaria causado principalmente por los residuos de metales pesados y retardantes a la llama bromados, los cuales también pueden lixiviar y llegar a aguas subterráneas (Guo et al, 2009, p. 569; Schlummer, Maurer, Leitner y Spruzina, 2006, pp.573-583).

### **1.1.4. RECICLAJE FÍSICO DE LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS**

El reciclaje físico se refiere a una combinación de los residuos con diferentes materiales, los cuales pueden ser: Plásticos (termoplásticos o termoestables), concreto o materiales viscoelásticos.

La fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos puede ser carga de los materiales plásticos, ya sean termoplásticos o termoestables. La carga en los materiales poliméricos tiene dos funciones: disminuir el costo del material o mejorar alguna o varias propiedades, para esto es fundamental el conocimiento de las propiedades de la carga. El concreto es el material más utilizado para la construcción, y el uso de la fracción no metálica en el concreto puede mejorar propiedades como resistencia, tracción durabilidad y permeabilidad. La viscoelasticidad es una propiedad de los materiales que poseen tanto características viscosas como elásticas cuando son expuestos a deformaciones, la implementación de la fracción no metálica en materiales viscoelásticos puede mejorar la susceptibilidad a la temperatura (Guo et al, 2009, p. 571).

#### **1.1.4.1. Reciclaje de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos como carga en materiales compuestos con matriz de resina termoestable**

La resina fenólica es una de las resinas más utilizadas en el mundo para formar materiales compuestos, a estos materiales se los conoce como compuestos de moldeo fenólico (PMC por sus siglas en inglés), estos materiales suelen ser utilizados por industrias muy diversas como la aeroespacial, aérea, transporte, marítima y de infraestructura. Este tipo de compuestos son muy solicitados debido a su bajo costo, resistencia a la temperatura, ligereza en peso, etc. (Pilato, 2010 p. 263).

En un estudio realizado por Guo, Li, Rao y Zu (2008), se formularon diferentes materiales compuestos con matriz de resina fenólica, pero utilizando la fracción no metálica de las tarjetas en reemplazo de harina de madera. Se varió la cantidad de residuos utilizados entre 0% y 40 %; y el tamaño de partícula entre 0.3 mm y 0.07 mm (pp. 624-625).

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos por este estudio tanto para la variación del tamaño de partícula como para la variación del porcentaje de carga.

**Tabla 1.4.** Efecto del contenido de fracción no metálica en las propiedades de PCM

Propiedades	0	10%	20%	30%	40%
Densidad relativa	1,40	1,40	1,39	1,39	1,38
Resistencia al impacto (KJ/m <sup>2</sup> )	2,1	2,4	2,3	2,4	2,7
Temperatura de deflexión térmica (°C)	154	157	168	164	169
Resistencia a la flexión (MPa)	71	64	70	70	71
Rigidez dieléctrica (90°C) (mV/m)	3,9	3,3	3,9	3,9	5,0
Fluidez (mm)	135	132	103	75	62

Fuente: (Guo et al, 2008, p. 627)

Elaboración: Guo et al

**Tabla 1.5.** Efecto del tamaño de partícula de partícula de la fracción no metálica en las propiedades de PCM

Propiedades	PMC de referencia	0,3-0,15 mm	1,15-0,07 mm	<0,07 mm
Densidad relativa	1,40	1,39	1,39	1,39
Resistencia al impacto (KJ/m <sup>2</sup> )	2,1	2,4	2,2	2,0
Temperatura de deflexión térmica (°C)	154	162	157	150
Resistencia a la flexión (MPa)	71	64	60	86
Rigidez dieléctrica (90°C) (mV/m)	3,9	3,6	3	4,5
Fluidez (mm)	135	143	123	117

Fuente: (Guo et al, 2008, p. 627)

Elaboración: Guo et al

La resina epóxica también ha sido utilizada para como matriz para formar compuestos con la fracción no metálica de los RAEE.

En un estudio realizado por Yokoyama e Iji (2005), desarrollan un proceso práctico para formar compuestos de resina epóxica combinada con cargas ordinarias como talco, carbonato de calcio y sílice. En este estudio se estudió la diferencia en propiedades mecánicas que existía al reemplazar el polvo de sílice por la fracción no metálica de las PCBs en compuestos de resina epóxica, En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos por este estudio (pp. 132-136).

**Tabla 1.6.** Estudio de propiedades mecánica al usar la fracción no metálica en compuestos de resina epóxica

Carga (% en peso)	Porcentaje en peso de carga (%)	Resistencia a la flexión kgf/cm <sup>2</sup>	Resistencia al impacto (kgf cm/cm <sup>2</sup> )	Viscosidad (Poise)
Sílice	30	1040	1,4	96
Sílice	50	1070	1,5	240
<b>Fracción no metálica</b>	30	860	1,2	116
<b>Fracción no metálica</b>	40	780	1,1	294
<b>Fracción no metálica</b>	50	890	1,2	1380

Fuente: (Yokoyama e Iji, 2005, p. 136)

Elaboración: Ypkooja et al

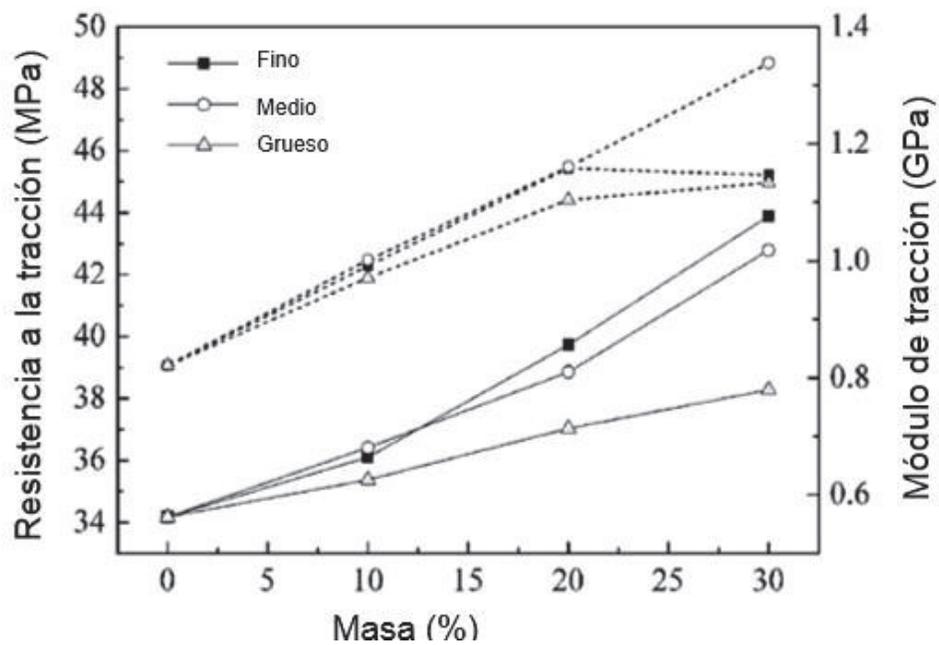
#### **1.1.4.2. Reciclaje de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos como carga en materiales compuestos con matriz de polímeros termoplásticos**

El principal problema que existe al reciclar la fracción no metálica con resinas termoestables es su estructura reticulada que hace imposibles fundir dicho compuesto una vez polimerizado. Es por esta razón que una de las mejores alternativas para reciclar la fracción no metálica es utilizarla como carga de polímeros termoplásticos.

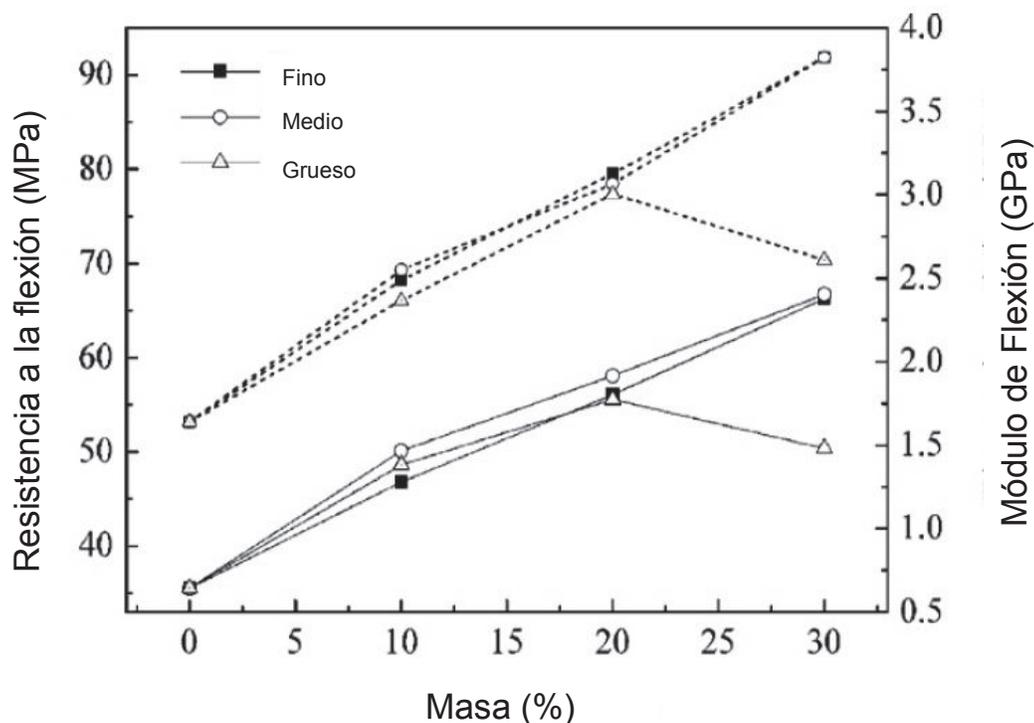
En un estudio realizado por Zhen, Shen, Cai, Ma y Xing (2009), se utiliza la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos como carga de refuerzo en materiales de polipropileno (PP) (p. 600).

El polipropileno es el más importante polímero commodity ampliamente utilizado por su buena procesabilidad, gran capacidad de reciclaje y su bajo costo. Sin embargo, debido a la baja resistencia mecánica sus aplicaciones de ingeniería aún son limitadas (Liang, 2005, pp. 105-109).

En el estudio realizado por Zhen et al (2009), se llevó a cabo una caracterización tanto química como física de diferentes muestras obtenidas mediante la mezcla de polipropileno y la fracción no metálica de las PCBs. En la Figura 1.2 se muestran los resultados obtenidos de resistencia a la tracción y módulo de tracción. En la Figura 1.3 se presentan los resultados obtenidos de resistencia a la flexión. Finalmente, se realizó en este estudio un análisis de la cantidad de cobre y bromo lixiviado para muestras que contenía un 30% de fracción no metálica, estos resultados se indican en la Tabla 1.7.



**Figura 1.2.** Resistencia a la tracción (-) y módulo de tracción (...) para materiales compuesto de fracción no metálica y polipropileno (Zhen et al, 2009, p. 603)



**Figura 1.3.** Resistencia a la flexión (-) y módulo de flexión (...) para materiales compuesto de fracción no metálica y polipropileno (Zhen et al, 2009, p. 603)

**Tabla 1.7.** Concentración de cobre y bromo lixiviados en materiales compuesto de fracción no metálica (30%) y polipropileno

Tamaño de la fracción no metálica	Porcentaje en peso de Cu en la fracción no metálica (%)	Porcentaje en peso de fibra de vidrio en la fracción no metálica (%)	Concentración de cobre lixiviado (ppm)	Concentración de bromo lixiviado (ppm)
<b>Fino</b>	1,64	71,50	0,030	6,320
<b>Medio</b>	1,05	55,50	0,018	4,880
<b>Grueso</b>	0,48	46,00	0,010	3,370

Fuente:(Zhen et al, 2009, pp. 602,605)

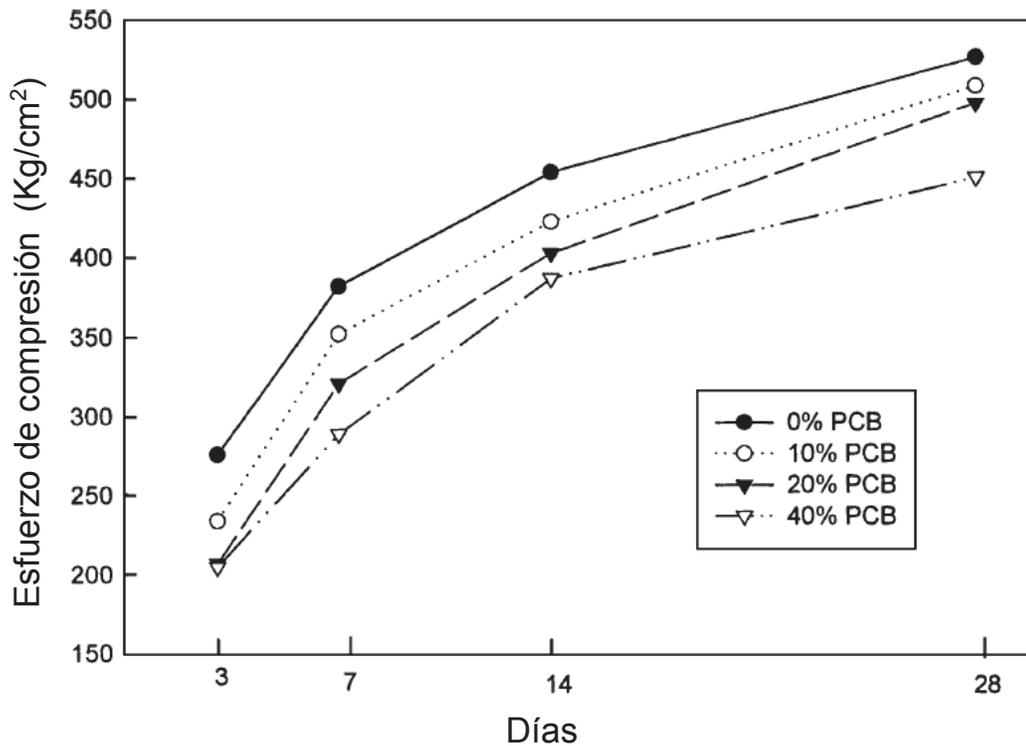
Elaboración: Zhen et al

### **1.1.4.3. Reciclaje de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos como materia prima de materiales de concreto**

El uso de desechos para la producción de nuevos materiales es una buena solución para los diferentes problemas ambientales. El uso de estos materiales no solo ayuda a reducir el costo de cemento o concreto, sino que también beneficia indirectamente al ambiente, ya que reduce los desechos que son enterrados en rellenos, disminuye los costos de su remediación y previene una posible contaminación de suelos y agua. El uso de desechos eléctricos y electrónicos en la fabricación de material de concreto y cemento se realiza con el fin de reemplazar los agregados finos y gruesos del concreto (Lakshmi y Nagan, 2010, p.270).

En un estudio realizado por Ban et al (2006), se investigó el efecto de la adición de residuos de tarjetas de circuitos impresos como un aditivo para el cemento Mortar. Como resultado de esta investigación se obtuvo que las partículas con tamaños menores a 8.0 mm no pueden ser utilizadas como aditivos ya que el grado de expansibilidad en inmersión al agua supera el 2% permitido, mientras que con partículas de mayor tamaño satisfacen los requerimientos. En cuanto al esfuerzo de compresión se determina que mientras menos porcentaje de residuos se adicionen tendrá un menor esfuerzo a la compresión, como se muestra en la Figura 1.4 (pp. 648-650).

En un estudio realizado por Wang, Zhang y Wang (2012), se investiga igualmente el comportamiento del cemento Mortar mezclado con polvo de los residuos de las tarjetas de circuitos impresos. En este estudio se determinó que la resistencia a la compresión y a la flexión se mantiene constantes hasta un porcentaje de carga de 15% mientras que si se aumenta la carga la resistencia va a disminuir. Además en este estudio se concluye que el cemento Mortar fabricado con residuos no metálicos de tarjetas de circuitos impresos es un nuevo material amigable con el medio ambiente con amplias perspectivas de aplicación (p. 1444).



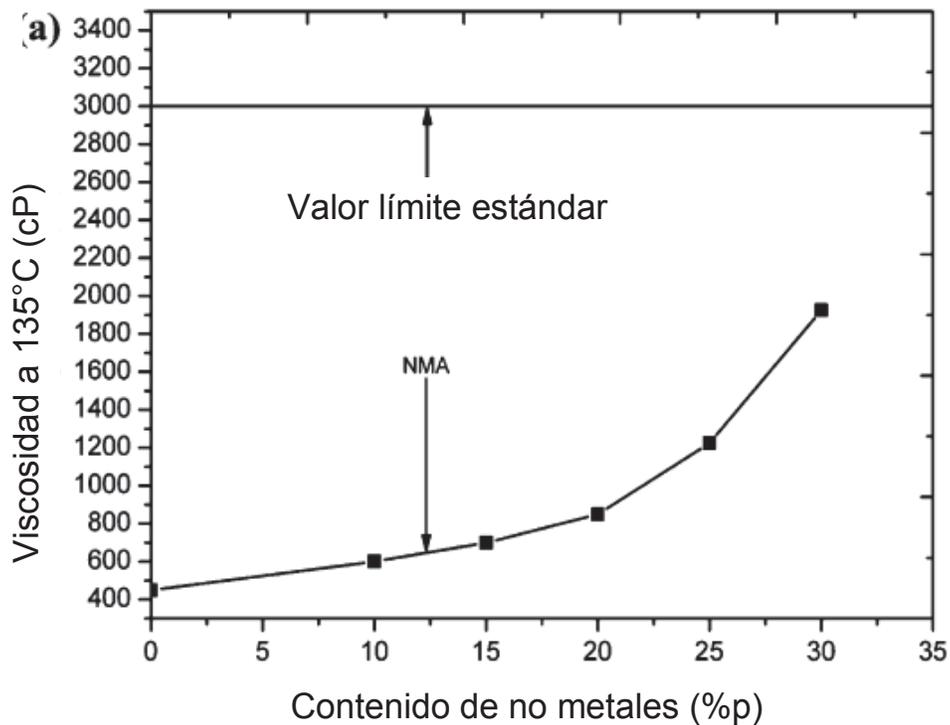
**Figura 1.4.** Resistencia a la compresión de los residuos de PCBs añadidos a cemento Mortar con diferentes porcentajes de carga  
(Ban et al, 2006, p. 650)

#### 1.1.4.4. Reciclaje de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos como modificadores de materiales viscoelásticos

El asfalto es uno de los materiales más utilizados para el pavimento de calles, se han realizado estudios del comportamiento de este tipo de materiales al adicionarle fracción no metálica de circuitos impresos. Pero debido a las propiedades reológicas del asfalto es muy susceptible a cualquier tipo de cambio (Sengoz y Isikyakar, 2008, p. 1897).

El uso de residuos poliméricos como cargas para asfalto comprende dos importantes aspectos, en primer lugar la utilización de materiales desechados y en segundo lugar el mejoramiento de las propiedades del asfalto, ya que es muy importante controlar sus propiedades, especialmente la viscosidad, sino podría ser imposible su utilización (Guo, Guo y Xu, 2009, p. 579).

Según un estudio realizado por Guo, Guo, Wang y Xu (2009), la viscosidad de los materiales compuestos por asfalto y fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos aumenta con la adición de material no metálico. Este incremento de la viscosidad es causado por la fibra de vidrio y las partículas finas de los no metales, y pese a que al adicionar un 25% en peso el incremento de la viscosidad es muy significativo, no se exceden los valores aceptables de viscosidad a 135°C que es de 3000 Cp, como se muestra en la siguiente figura (p.505).



**Figura 1.5.** Viscosidad vs contenido de no metales en material compuestos de asfalto (Guo, Guo, Wang y Xu, 2009, 504)

### 1.1.5. RECICLAJE QUÍMICO DE LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

El reciclaje químico de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impreso comprende la descomposición de los polímeros en sus respectivos monómeros o en algún compuesto químico que puede ser útil. El reciclaje químico tiene que estar comprendido por una o varias reacciones químicas, estos procesos pueden ser:

pirolisis, gasificación, co-combustión y depolimerización con fluidos supercríticos (Guo, Guo, y Xu, 2009, 579).

### 1.1.5.1. Reciclaje de la fracción no metálica de los residuos de tarjetas de circuitos impresos por procesos de pirolisis

El proceso de pirolisis se realiza calentando la muestra a temperaturas altas sin presencia de oxígeno, provocando que la materia orgánica de la muestra se descomponga en gases y líquidos, los cuales pueden ser útiles como combustibles o como materia prima para la fabricación de productos químicos. Una ventaja de este proceso es que los componentes inorgánicos de la muestra permanecen inalterados, permitiendo así su futura recuperación y reutilización. La pirolisis es especialmente utilizada para separar mezclas complejas que contiene plásticos mezclados con diferentes materiales (metales, fibra de vidrio, etc.) como es el caso de las tarjetas de circuitos impresos (De Marco et al, 2008, p. 180).

Hoe, Salmiaton, Hizam (2014), realizaron un estudio sobre la pirolisis de las tarjetas de circuitos impresos a diferentes temperaturas, los resultados de este estudio se presentan en las siguientes tablas. En la Tabla 1.1 se presentan las cantidades de líquidos, sólidos y gases obtenidos a las diferentes temperaturas de pirolisis. La fracción líquida obtenida es una mezcla de compuestos acuosos y orgánicos, el análisis de la composición de esta fracción se muestra en la Tabla 1.9 (pp. 228-233).

**Tabla 1.8.** Rendimiento de la pirolisis de residuos de tarjetas de circuitos impresos a diferentes temperaturas de operación

Temperatura (°C)	250	275	300	350
Sólido (%)	60,98	57,12	54,42	49,6
Líquido (%)	12,81	16,03	12,82	17,61
Gas (%)	26,21	26,85	32,76	32,79

Fuente: (Hoe, 2014, p. 231)

Elaboración: Hoe

**Tabla 1.9.** Composición de la fracción líquida obtenida en la pirolisis a diferentes temperaturas

Compuesto	Tiempo de retención (min)	Abundancia relativa (%)			
		250°C	275°C	300°C	350°C
Fenol	7,975	39,89	41,28	46,61	43,60
1-hidroxi-2-metilbenceno	9,350	2,20	2,27	3,71	5,23
p-metilfenol	9,717	2,39	2,23	3,93	5,26
1-hidroxi-2,4-dimetilbenceno	10,967	1,22	1,35	2,78	3,79
1-etil-4-hidroxibenceno	11,242	0,40	0,57	0,96	1,04
m-Isopropilfenol	12,175	2,31	2,38	3,53	3,00
3-etil-5-metilbenceno	12,350	0,34	0,10	0,18	0,19
N-(fenilmetileno)	19,917	0,52	0,55	0,68	0,54
fosfato de trifenil	25,283	48,54	47,96	37,44	36,16
ftalato de diisooctil	26,083	2,19	2,31	0,18	1,15

Fuente: (Hoe, 2014, p. 232)

Elaboración: Hoe

### 1.1.5.2. Reciclaje de la fracción no metálica de los residuos de tarjetas de circuitos impresos por procesos de gasificación y co-combustión

El proceso de gasificación se emplea para convertir materiales orgánicos en monóxido de carbono e hidrógeno, a este compuesto generado se le conoce como gas de síntesis o syngas por sus siglas en inglés, esta transformación se produce debido a la reacción del material orgánico a altas temperaturas (>1230°C) con una cantidad controlada de oxígeno. El syngas se lo utiliza como combustible en turbinas de gas para generar energía eléctrica. Tanto la co-combustión y la gasificación son dos procesos que tiene el fin de producir energía eléctrica (Luda, 2011, pp. 292,293).

Uno de los principales problemas al utilizar este método de reciclaje, son los compuestos clorados y bromados que contienen estos desechos. Según Yamawaki (2004), se puede suprimir la emisión de dioxina cloradas y bromadas si primero se realiza un tratamiento a 1200°C y posteriormente un enfriamiento súbito hasta los

200°C, impidiendo la generación de estos gases tóxicos. En este estudio se concluye que la gasificación no solo previene la generación de las dioxinas bromadas, sino también la regeneración de las mismas, esto igualmente sucede con las dioxinas cloradas en condiciones de funcionamiento adecuadas (pp. 315,316, 319).

### **1.1.5.3. Reciclaje de la fracción no metálica de los residuos de tarjetas de circuitos impresos por procesos de depolimerización con fluidos supercríticos**

En los últimos años los fluidos supercríticos han tenido una gran importancia para la conversión de desechos en materiales reutilizables, los fluidos supercríticos son sustancias que se encuentran sobre sus temperaturas y presiones críticas. El agua supercrítica (SCW por sus siglas en inglés) es utilizada para la descomposición de materia orgánica, sin embargo, al encontrarse el agua en condiciones supercríticas ( $T_c=374^\circ\text{C}$ ,  $P_c=22.1\text{ MPa}$ ) causa una mayor corrosión en los equipos que el agua normal, por esta razón se necesitan equipos más costosos debido a los materiales de los que son fabricados (Xiu y Zhang, 2010, p. 628).

Además del agua supercrítico, otros fluidos también son utilizados para el reciclaje de PCBs, uno de ellos es el dióxido de carbono supercríticos mezclado con una cantidad pequeña de agua. Este dióxido de carbono supercrítico separa los componentes de las PCBs en láminas de cobre, fibra de vidrio y polímeros. También se ha utilizado metanol supercrítico, con el cual a bajas temperaturas se obtiene residuos de retardantes a la llama mientras que a altas temperaturas se alcanzaba una descomposición completa de dichos contaminantes (Hadi Xu, Lin, Hui y McKay, 2014, p. 237).

Se ha observado que al utilizar fluidos supercríticos en el reciclaje de desechos electrónicos no hay la formación de hidrocarburos y sustancias nocivas, ampliando así su carácter ecológico (Hadi Xu, Lin, Hui y McKay, 2014, p. 238).

## **1.2. MATERIALES COMPUESTOS**

### **1.2.1. GENERALIDADES**

Un material compuesto es la combinación de dos o más materiales, con el objetivo de mejorar las propiedades o disminuir los defectos de los componentes individuales. Un material compuesto consiste en una matriz y uno o varios materiales de refuerzo. Las principales ventajas de la fabricación de materiales compuestos es que se pueden utilizar materiales más resistente y ligeros para mejorar las propiedades mecánicas, físicas y químicas del producto final, generalmente el material de refuerzo utilizado es una fibra o partículas. Los materiales compuestos por lo general tienen un porcentaje menor al 50% en peso del material de refuerzo, debido a las dificultades de procesamiento y fragilidad (Campbell, 2010, p. 1).

Materiales compuestos de polímeros o PMC abreviado así por su nomenclatura (Polymer-matrix composites) en inglés, son clasificados en dos grupos dependiendo de la matriz utilizada que puede ser un polímero termoplástico o uno termoestable. Materiales compuestos con polímeros termoestables son más comunes que aquellos que utilizan polímeros termoplásticos. Los materiales compuestos por polímeros termoplásticos muestran ventajas frente a los que utilizan polímeros termoestables. Los materiales compuestos por polímeros termoplásticos presentan bajo costo de manufactura, un ilimitado tiempo de vida útil, un reciclaje posterior a su utilización, menos riesgos para la salud debido a las sustancias químicas utilizadas para el procesamiento, mejor rendimiento por su alta resistencia, buenas propiedades contra el calor y humedad y alta tolerancia ambiental (Chung, 2010, pp. 8,9).

Los materiales compuestos por polímeros termoestables presentan desventajas como son: la limitación en los métodos de procesamiento, requieren altas temperaturas de procesamiento, son altamente viscosos, para formar un material compuesto con fibras necesita un precursor del polímero y los tratamientos para el

procesamiento de los materiales compuestos no están completamente desarrollados (Chung, 2010, p.9).

Los compuestos de matriz polimérica fibrosos se clasifican de acuerdo a la fibra utilizada en fibra corta o continua. Las fibras continuas tienen mayor efecto en las propiedades del material compuesto como mayor resistencia eléctrica, conductividad térmica, entre otras. Las fibras continuas pueden ser utilizadas unidireccionalmente o en forma de una tela tejida. El procesamiento de este tipo de materiales compuestos es mucho más fácil ya que se realizan a bajas temperaturas en comparación con materiales compuestos con matriz cerámica o de carbono. Para polímeros termoestables como resina epóxica, resina fenólica y resina de furfurilo la temperatura de procesamiento esta alrededor de 200°C, mientras que para polímeros termoplásticos como poliamida, polietersulfona, polietercetona, entre otras el rango de temperatura va desde 300°C a 400°C (Chung, 2010, pp.9,10).

Las resinas epóxicas son las más utilizadas como matriz de materiales compuestos con fibra, el curado de estos materiales compuestos se realiza en presencia de calor y presión estable, la resina termoestable se endurece gradualmente al finalizar la polimerización y la reticulación de sus moléculas. Los polímeros termoplásticos son importantes como matriz de materiales compuestos debido a su mayor ductilidad y facilidad de procesamiento, esto debido a que al calentarlos a temperaturas mayores que su temperatura de transición vítrea el material se ablanda y se lo puede conformar fácilmente con un posterior enfriamiento (Chung, 2010, p.10).

Materiales compuestos de fibra corta o partículas se fabrican mediante la mezcla con una resina líquida para formar una suspensión y luego moldear el compuesto. La resina líquida o no polimerizada es la matriz en el caso de un termoestable, y para un termoplástico es el polímero disuelto. Los métodos de moldeo para los termoplásticos son el moldeo por inyección, extrusión, calandrado y termoformado. Para los termoestables los métodos de moldeo se da por compresión y la fundición de la suspensión en un molde para endurecer al termoestable. En general para la

producción de materiales compuestos con matriz polimérica se requiere de calor, en los termoestables el calor provoca la reticulación de las moléculas de la resina, mientras que en los termoplásticos se utiliza calor para ablandar o fundir la matriz (Chung, 2010, pp.10, 11).

#### **1.2.1.1. Matriz polimérica del material compuesto**

Para obtener un material compuesto con propiedades mejoradas es necesario una interacción entre la matriz y el material de refuerzo. La matriz del material compuesto cumple con varias funciones para el rendimiento del producto final. Si las fibras se orientan en la dirección de los esfuerzos aplicados a la matriz, estos esfuerzos aplicados son transferidos a las fibras, que por lo general las fibras soportan mayores esfuerzos, aumentando así la carga máxima que soporta un material cuando es expuesto a tracción, compresión, flexión y cizallamiento, el aumento de la carga máxima que soportan estos materiales está relacionado directamente con la adhesión que presenta la matriz con las fibras (Barbero, 2011, p. 1,2)

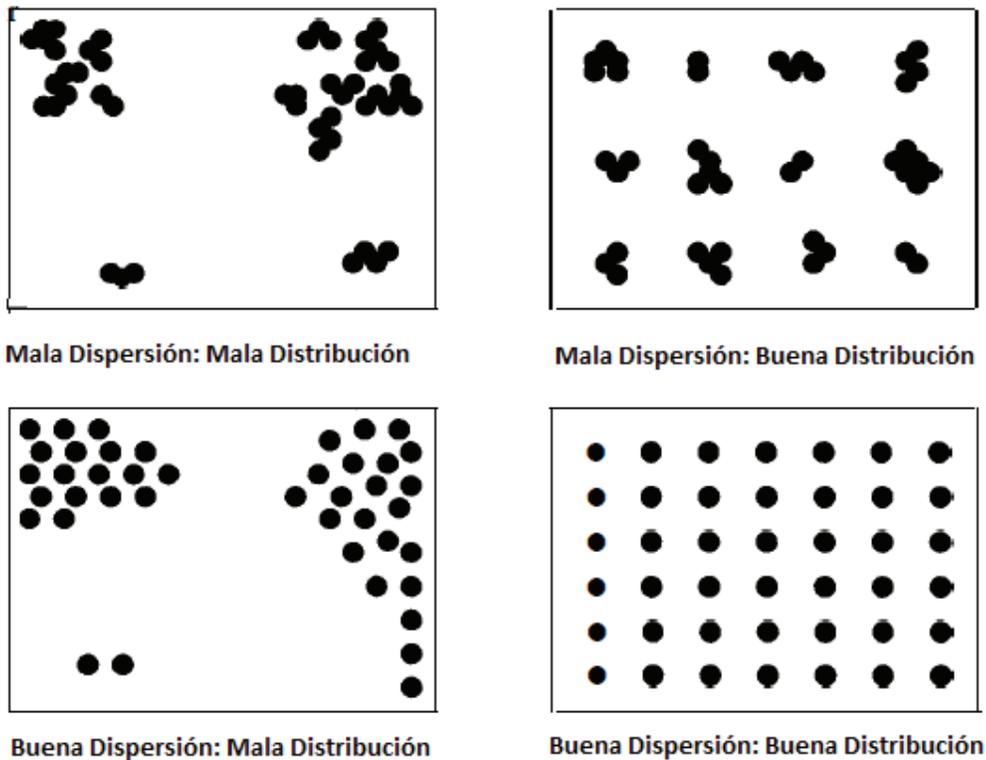
Cuando un polímero es susceptible a ser degradado por el incremento de temperatura, es este caso si el polímero es termoplástico se puede incorporar ciertos refuerzos que impidan la degradación, o que incremente la temperatura de degradación, pero en el caso de los materiales termoestables la incorporación de refuerzos no altera la degradación producida por altas temperaturas (Barbero, 2011, p. 48-53)

#### **1.2.1.2. Mezclado dispersivo y distributivo**

El mezclado es un proceso importante en el procesamiento de polímeros, ya que puede afectar las propiedades del polímero, y se requiere considerar su facilidad y costo. Los polímeros se combinan para mejorar sus propiedades o incrementar sus características físicas, existen varios aditivos y agentes de refuerzo que se mezclan

los polímeros para mejorar sus propiedades mecánicas y dar características específicas a la mezcla (Manas, I. 2010, p. 5).

Entre los tipos de mezclado más importante están el distributivo y el dispersivo. El mezclado dispersivo involucra la reducción de tamaño del componente cohesivo como conglomerados de partículas sólidas o gotas de un líquido. El mezclado distributivo consiste en difundir el componente en menor cantidad en la matriz para obtener una buena distribución espacial. En cualquier proceso de mezclado de polímeros pueden ocurrir simultáneamente el mezclado distributivo y dispersivo o paso a paso. En la Figura 1.6 se puede observar la diferencia entre un mezclado dispersivo y distributivo (Manas, I. 2010, p. 5).



**Figura 1.6.** Diferencias entre mezclado dispersivo y distributivo  
(Manas, 2010, p. 5)

## **1.2.2. RESINAS POLIESTER INSATURADAS**

### **1.2.2.1. Generalidades**

Las resinas poliéster insaturadas son producto de la policondensación de ácidos saturados e insaturados con un diol. Tienen gran aplicación en la industria ya que al curar se vuelven sólidos termoestables, que pueden utilizarse en forma pura, con cargas o como material reforzado, esto debido a su bajo costo, fácil procesamiento, buena resistencia química y buenas propiedades mecánicas (Deli, Ebdon, Kandola y Krishman, 2013, p. 6930; Ishan, 2007, p. 1258).

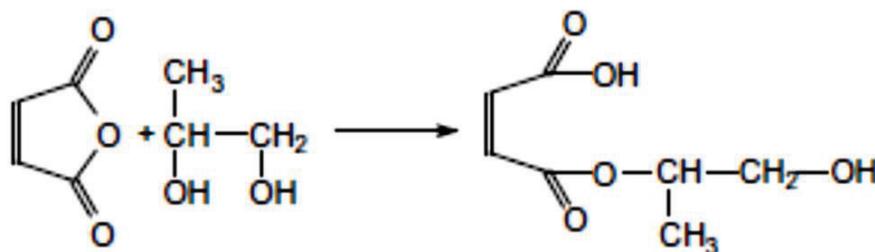
Los primeros usos que se le dio a las resinas poliéster insaturadas fueron para producir piezas fundidas como mangos de cuchillos y paraguas, encapsulación de artículos de decoración y ensamblajes electrónicos, debido a la gran versatilidad de las resinas poliéster insaturadas en la industria, se la utiliza en la fabricación de botones, concreto de poliéster debido a que presenta mayor resistencia mecánica que el convencional. Las resinas poliéster insaturadas reforzadas se las utiliza para la fabricación de muebles, paneles, tubos, etc. (Fink, 2013, pp. 31-34).

### **1.2.2.2. Síntesis de la resina poliéster insaturada**

Para la preparación de la resina poliéster insaturada se utiliza ácidos - anhídridos como: anhídrido maleico, anhídrido ftálico, ácido succínico, adípico y sebácico, entre otros y alcoholes como el etilen glicol, dietilen glicol, prolilen glicol entre otros, y monómeros de vinilo necesarios para la reticulación, la reacción entre un componente hidróxido y el anhídrido se lleva a cabo en dos etapas (Penczekl, Czubz y Pielichowskiz, 2005, pp. 6-14; Ishan, 2007, pp. 1258-1259).

En la primera etapa se lleva a cabo la formación de un monoéster en un rango de temperatura de 60°C a 130°C, en la segunda etapa se lleva a cabo la policondensación a una temperatura de 160°C, producto de esta reacción se genera agua, la cual es removida constantemente, durante esta etapa suele

perderse el glicol por lo cual se lo añade con un 5% en exceso. En la Figura 1.7 se observa la reacción de formación de la resina poliéster insaturada (Fink, 2013, p. 8; Malik et al, 2004, p. 143).



**Figura 1.7.** Reacción entre anhídrido maleico y el propanodiol para la formación de un poliéster  
(Fink, 2013, p. 8)

Una vez alcanzado el número ácido deseado se añade inhibidores como la hidroquinona para evitar la polimerización, el poliéster se enfría entre 90°C y 100°C y se añade el monómero de vinilo, por lo general estireno (Fink, 2013, p 9; Malik et al, 2004, p. 143).

### 1.2.2.3. Curado de resinas poliéster insaturadas

El curado de poliéster insaturados se lleva a cabo con la adición de iniciadores y catalizadores. El iniciador en conjunto con el acelerador inician la reticulación del poliéster insaturado lineal, las moléculas de poliéster son los agentes reticulantes y las moléculas del estireno ayudan en la unión de las moléculas de poliéster, esta reacción de reticulación se lleva a cabo en cuatro etapas. En la primera etapa se lleva a cabo un período de inducción en el que los radicales libres son consumidos por el inhibidor, se produce muy poca polimerización. En la segunda etapa se forman estructuras esféricas (partículas de microgel) con alta densidad de reticulación. En la tercera etapa dobles enlaces de carbono del microgel se someten a reticulación intramolecular, mientras que los de la superficie reaccionan con monómeros o microgeles, dando lugar al crecimiento del microgel. En la etapa final se da una macrogelación que tiene lugar por los microgeles intermoleculares

produciendo un aumento de viscosidad (Fink, 2013, p. 25; Malik et al, 2004, pp. 143-155).

#### **1.2.2.4. Iniciadores**

Existe una gran variedad de iniciadores los más utilizados son los peróxidos ya que se pueden utilizar para un curado en frío o en caliente. Los iniciadores de peróxidos incluyen a los peróxidos de cetonas, como el metiletilcetona peróxido y acetilacetona peróxido, los hidroperóxidos como hidroperóxido de cumeno, los peróxidos de diacilo como el peróxido de benzoilo, los peróxidos de dialquilo como peróxido de dicumilo, los perésteres de alquilo como terc-butilperoxibenzoato y los percarbonatos como el peroxidicarbonato. Estos iniciadores se los utiliza solos o en combinación, dependiendo de la aplicación que se le quiera dar a la resina poliéster insaturada. También existen los fotoiniciadores, que se los utiliza generalmente para aplicaciones de revestimientos, el problema que surge con la utilización de estos iniciadores es que al momento de curado de la resina la vuelve de color amarillento (Penczekl et al, 2005, pp. 62,63; Fink, 2013, pp. 22,23).

#### **1.2.2.5. Aceleradores o catalizadores**

Dependiendo del iniciador utilizado se debe escoger el catalizador para el curado de la resina poliéster insaturada, por ejemplo para el iniciador metiletilcetona peróxido se utiliza el cobalto naftaleno ya que estimula la descomposición de este iniciador promoviendo el proceso de curado. El ión cobalto puede oxidarse o reducirse dependiendo de su valor, si se añade demasiado catalizador la reacción producida puede ser muy exotérmica dando lugar a la formación de burbujas de gas, debido a la baja conductividad térmica de los polímeros y el calor de reacción no puede ser transportador fuera de la resina (Fink, 2013, p. 24; Penczekl et al, 2005, p. 63).

Los catalizadores pueden ser jabones metálicos, como el octoato de cobalto u octoato de manganeso, o más quelatos metálicos tales como acetilacetato de cobalto y acetilacetato de vanadio. Estos catalizadores son promotores redox y amina compuestos tales como N, N-dimetilanilina. Los catalizadores pueden ser utilizados solos o en combinación, dependiendo de la aplicación que tenga al final la resina poliéster insaturada (Fink, 2013, pp. 24-25; Penczekl et al, 2005, pp. 63,64).

El curado de resina poliéster insaturada puede llevarse a cabo en frío o caliente. Para el curado en frío o a temperatura ambiente se utiliza el peróxido de metil-etil-cetona (MEK) o el peróxido de dibenzoilo. Para el curado en caliente se utiliza el peróxido de di-t-butil peróxido o perbenzoato de t-butilo. En la Tabla 1.10 se observan los sistemas de iniciador y acelerador con temperaturas óptimas para el curado de la resina poliéster insaturada (Malik et al, 2004, p. 153).

**Tabla 1.10.** Sistemas de iniciador y acelerador con temperaturas óptimas para el curado de resina poliéster insaturada

Iniciador	Acelerador	Temperatura (°C)
Peróxido de metiletilcetona	Octoato de cobalto	20-25
Peróxido de dibenzoilo	N,N-dimetilanilina	60
Peróxido de di-ter-butilo	Calor	130
Ter-butilperoxi-benzoato	Calor	130

Fuente: (Fink, 2013, p. 25)

Elaboración: Autor

### 1.2.3. POLIMETILMETACRILATO

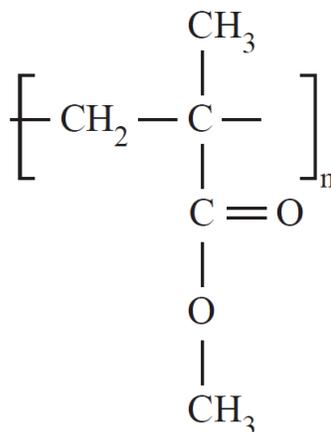
EL polimetilmetacrilato (PMMA) pertenece a la clase de los polímeros vinilídenos (Mark, 2004, 655).

El polimetilmetacrilato es el más importante polímero de la familia de los acrílicos. El polimetilmetacrilato es duro claro, incoloro. Generalmente el polimetilmetacrilato está disponible como pellets para molde y para extrusión, jarabes reactivos, hojas,

barras y tubos. Generalmente se comercializan polímeros atácticos (75%), aunque también se ha logrado sintetizar polímeros sindiotácicos e isotácicos (Ebewele, 2009, p. 436).

Entre las propiedades de mayor interés se tiene: la transparencia óptica (transmisión de 92% límite teórico de la incidencia normal en la región visible), muy poca absorción óptica hasta los 260nm, buenas propiedades mecánicas, gran resistencia a la intemperie y alta sensibilidad a la radiación de electrones (Mark, 2004, 655).

La estructura del polimetilmetacrilato se muestra en la siguiente figura.



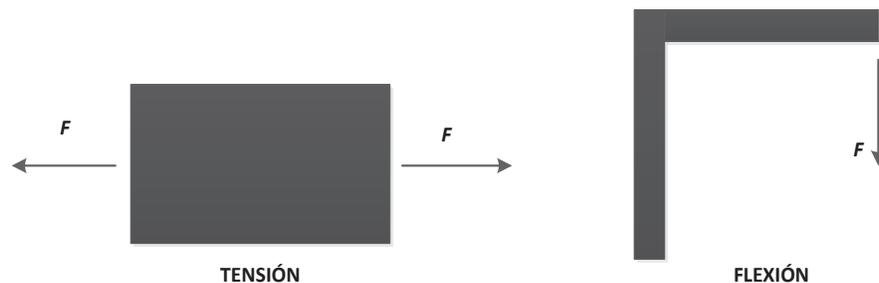
**Figura 1.8.** Estructura del polimetilmetacrilato  
(Mark, 2004, 655)

#### 1.2.4. PROPIEDADES MECÁNICAS

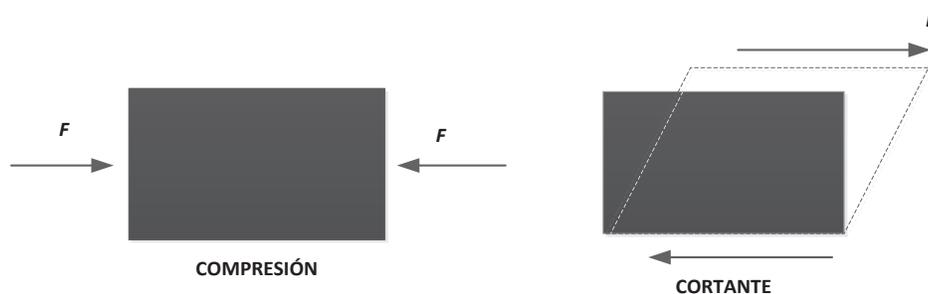
La mayoría de polímeros son utilizados debido a sus propiedades mecánicas y costo de producción, razón por la cual las propiedades mecánicas de los polímeros son muy importantes al momento de elegir un polímero para una aplicación específica. Las propiedades mecánicas pueden variar dependiendo de la estructura química de los polímeros como peso molecular, cristalinidad, orientación molecular, tipos de enlaces formados, entre otros. Dependiendo de esto pueden presentar características de líquidos y cauchos blandos a muy duros y sólidos rígidos,

también dependen de factores externos como temperatura, presión, tiempo de procesamiento, entre otros (Askeland y Phulé, 2004, pp. 234,235).

Existen diferentes clases de fuerzas o “esfuerzos” que intervienen en las propiedades mecánicas de los polímeros. Se define como esfuerzo a la fuerza que actúa sobre un área unitaria en que se aplica. Existen los esfuerzos de tracción, flexión, compresión y corte o cizalla. La deformación al pico unitaria que se produce al ejercer un esfuerzo a un material es el cambio de dimensión por unidad de longitud. El esfuerzo se mide en pascales (Pa) o en libras por pulgada cuadrada (psi). En la Figura 1.9 y Figura 1.10 se observan los diferentes tipos de esfuerzo (Askeland y Phulé, 2004, pp. 234,235).



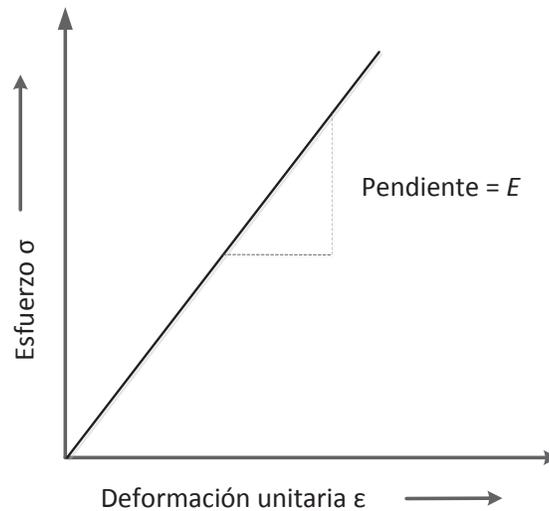
**Figura 1.9.** Esfuerzo de tracción y esfuerzo flexión  
(Askeland y Phulé, 2004, p. 235)



**Figura 1.10.** Esfuerzo de compresión y esfuerzo cortante  
(Askeland y Phulé, 2004, p. 235)

**La deformación al pico elástica (unitaria)** es una deformación al pico que se puede restaurar debido al esfuerzo aplicado y se presenta tan pronto como se aplica la fuerza es decir es instantánea. Permanece mientras se aplica la fuerza y desaparece cuando ya no aplica dicha fuerza. En muchos materiales la

deformación al pico elástica se explica a través de una ley lineal. La pendiente en la región lineal de la curva esfuerzo contra la deformación al pico elástica define el módulo de Young o de elasticidad ( $E$ ) como se muestra en la Figura 1.11 se mide en pascales (Pa) o en libras por pulgada cuadrada (psi) (Askeland y Phulé, 2004, p. 235).



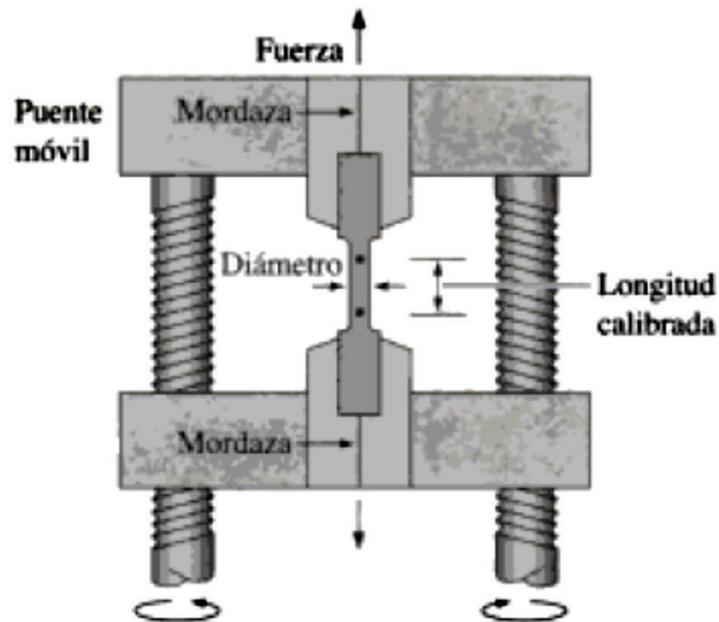
**Figura 1.11.** Módulo de Young para un material elástico  
(Askeland y Phulé, 2004, p. 235)

En polímeros como en elastómeros las deformaciones elásticas son grandes, debido a que la relación esfuerzo – deformación al pico elástica no es lineal, para esto se utiliza la pendiente de la tangente en cualquier valor del esfuerzo o deformación al pico elástica, valor variable que reemplaza al módulo de Young (Askeland y Phulé, 2004, p. 235).

**La deformación al pico plástica** se produce cuando se quita la fuerza de un material y sufre una deformación al pico permanente. La rapidez con la que se produce una deformación al pico se define como velocidad de deformación al pico que se mide en  $s^{-1}$ . Materiales dúctiles se vuelven sólidos frágiles cuando la velocidad de deformación al pico es alta. Un ejemplo de esto es la masilla cuando se lo estira con rapidez sus moléculas no pueden reordenarse y extenderse por lo que el material se rompe, lo cual no sucede cuando se lo estira lentamente. A la carga que ejerce sobre los materiales a grandes velocidades de deformación al pico

se la denomina carga de impacto o dinámica. Un material viscoso es aquel que desarrolla una deformación al pico permanente al aplicar una fuerza por cierto tiempo. En un material viscoelástico la deformación al pico desaparece en cierto tiempo (Askeland y Phulé, 2004, p. 235).

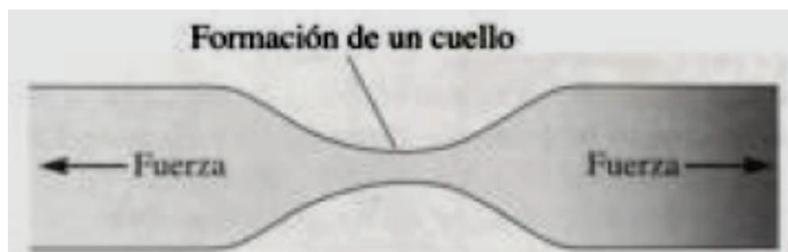
#### 1.2.4.1. Ensayo de tracción



**Figura 1.12.** Esquema del ensayo de tracción  
(Askeland y Phulé, 2004, p. 240)

El ensayo de tracción es una prueba que mide la resistencia de un material a la fuerza elástica. Para los polímeros se realiza el ensayo según la norma ASTM D638, mientras que para materiales compuestos con matriz polimérica se realiza el ensayo según la norma ASTM D3039. Para llevar a cabo la prueba se coloca el espécimen (muestra) de longitud y diámetro específicos en la máquina universal de pruebas en la que se aplica una fuerza, denominada carga, como se muestra en la Figura 1.12 para medir la cantidad que se estira la muestra se utiliza un extensómetro, midiéndose el cambio de longitud de la muestra. Los resultados del ensayo de tracción proporcionan información sobre la resistencia, módulo de Young y ductilidad del material (Askeland y Phulé, 2004, p. 240).

Al aplicar un esfuerzo a un material se produce primero una deformación al pico elástica, el material puede presentar tanto una deformación al pico elástica y plástica al aumentar el esfuerzo aplicado, el valor necesario para producir la deformación al pico plástica se denomina límite elástico. En los polímeros el esfuerzo necesario es para desenredar las cadenas moleculares o el deslizamiento de las mismas. El esfuerzo obtenido con la máxima fuerza aplicada es la **resistencia a la tracción**, que es el esfuerzo al pico en la curva esfuerzo – deformación al pico. Durante el ensayo se da la formación de un cuello en el material este fenómeno se produce debido a que hay regiones que se deforman más que otras como se observa en la Figura 1.13 (Askeland y Phulé, 2004, p. 246).



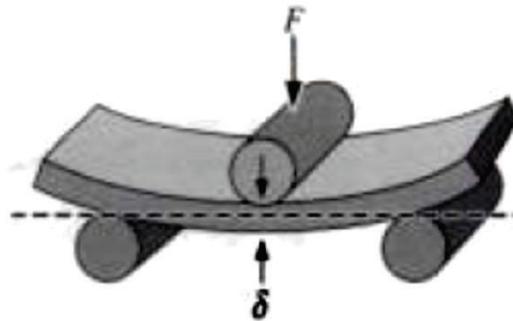
**Figura 1.13.** Formación de cuello de un material sometido al ensayo de tracción (Askeland y Phulé, 2004, p. 246)

**El módulo de Young (E)** es la pendiente de la curva esfuerzo – deformación al pico en la región elástica. El módulo se relaciona con la energía del enlace atómico. Una pendiente pronunciada indica que se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se estire, así el material presenta un módulo de Young grande. El módulo de Young en materiales compuestos depende de la rigidez de los componentes individuales. Otra información que se obtiene del ensayo de tracción es la tenacidad a la tracción, la cual corresponde a la energía absorbida por un material antes de fracturarse, la misma que está representada por el área bajo la curva de la gráfica esfuerzo-deformación. Además se puede determinar la cantidad de deformación al pico que resiste un material sin romperse, que se le conoce generalmente como ductilidad, para lo cual se mide las marcas de calibración de la muestra antes y después del ensayo (Askeland y Phulé, 2004, pp. 246-250).

Durante el ensayo de tracción es necesario considerar el efecto de la temperatura ya que propiedades como resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad disminuyen con la temperatura, mientras que la ductilidad aumenta, estas son consideraciones necesarias al momento de elegir un material para aplicaciones específicas (Askeland y Phulé, 2004, p. 250).

#### 1.2.4.2. Ensayo de flexión

El ensayo de flexión es una prueba que por lo general se realiza a materiales frágiles en los cuales es difícil llevar a cabo la prueba de tracción, para polímeros el ensayo se lleva bajo la norma ASTM D790, mientras que para materiales compuestos con matriz polimérica se realiza el ensayo bajo la norma ASTM D7264. Para llevar a cabo esta prueba se aplica una carga en tres puntos de la muestra provocando una flexión, como se muestra en la Figura 1.14 lo cual produce un esfuerzo de tracción en un punto opuesto al punto de aplicación de la fuerza central, entonces la fractura comienza en este punto (Askeland y Phulé, 2004, p. 256).



**Figura 1.14.** Deflexión producida durante un ensayo de flexión  
(Askeland y Phulé, 2004, p. 256)

La resistencia del material es la resistencia de flexión o el módulo de ruptura y se calcula mediante la ecuación 1.1, entonces dependiendo de las aplicaciones que se quiera dar a los polímeros se los puede elegir de acuerdo a su resistencia a la flexión (Askeland y Phulé, 2004, p. 256).

$$\sigma_{\text{flexión}} = \frac{3FL}{2wh^2} \quad [1.1]$$

Donde:

$\sigma_{\text{flexión}}$ : Resistencia a la flexión en el ensayo de tres puntos

F: fuerza aplicada a la muestra

L: longitud de la muestra

w: ancho de la muestra

h: espesor de la muestra

#### **1.2.4.3. Ensayo de abrasión**

El ensayo de abrasión es una prueba que permite conocer la resistencia del material a ciertas acciones como frotamiento o rasgamiento que producen desgaste del material de la superficie de una muestra. Para llevar a cabo este ensayo se toma en cuenta la norma ASTM D1044 y la D1242. Esta prueba por lo general se utiliza para el análisis de materiales plásticos transparentes para evaluar su calidad óptica. Dependiendo de las características del material al que se le realiza la prueba existen varios abrasivos que permiten su estudio, los resultados de esta prueba se analizan con base al porcentaje en peso perdido durante la prueba (ASTM, 2013, p. 2).

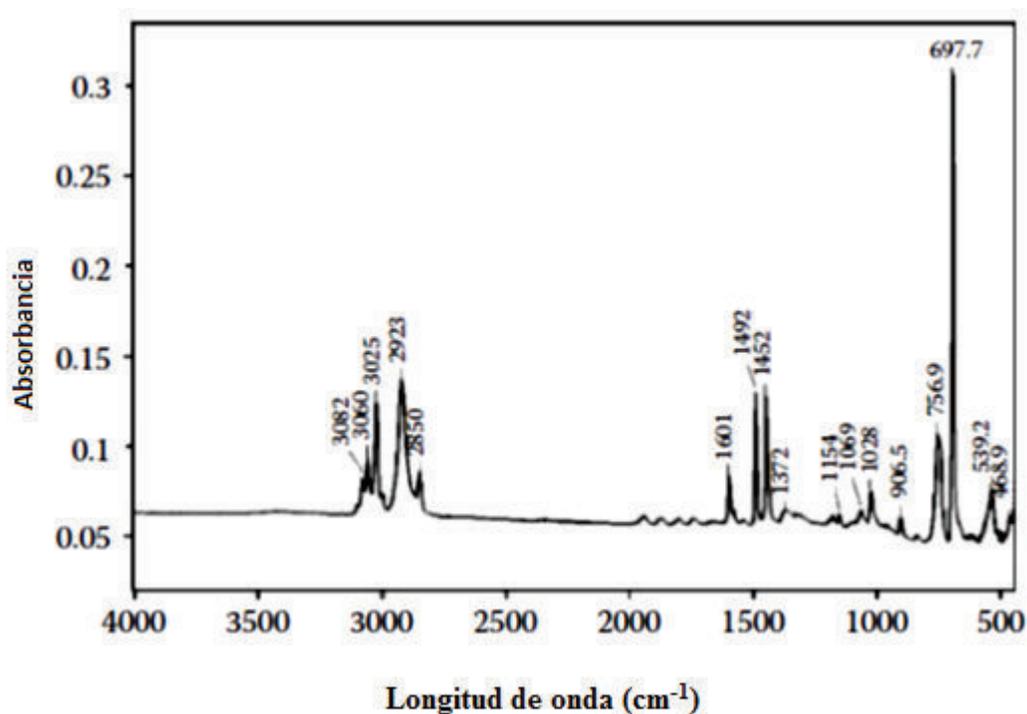
### **1.2.5. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE POLÍMEROS**

#### **1.2.5.1. Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR)**

La espectroscopía de infrarrojo (FTIR) es uno de los análisis más utilizados, ya que se puede realizar el análisis de cualquier tipo de muestra en cualquier estado, ya sean líquidas, sólidas, pastas, películas, entre otras, con una adecuada técnica de muestreo, este análisis da a conocer el tipo de moléculas que encontramos en las muestras analizadas y la concentración en que se encuentran. Debido a la

versatilidad de este análisis se lo utiliza en la industria farmacéutica, alimenticia, de pulpa y papel, entre otras, así como en campos como la agricultura, estudio de polímeros, estudio de moléculas orgánicas e inorgánicas, además de aplicaciones ambientales (Stuart, 2004, p. 2; Smith, 2011, p. 1).

El análisis FTIR se basa en las vibraciones de los átomos y moléculas, el espectro se obtiene haciendo pasar radiación a través de la muestra y determinando la radiación incidente, a determinada longitud de onda, esto se realiza en una longitud de onda que va desde los 4000  $\text{cm}^{-1}$  hasta los 500  $\text{cm}^{-1}$  como se observa en la Figura 1.15, las posiciones de los picos se relacionan con la estructura molecular de la muestra analizada, el área bajo la curva representa la concentración, la cual se determina a través de la ley de Beer (Stuart, 2004, p.2; Smith, 2011, pp. 7,8).



**Figura 1.15.** Longitud de onda vs absorbancia en el espectro infrarrojo del poliestireno. (Smith, 2011, p. 3)

### 1.2.5.2. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es un método de caracterización física que permite el estudio de las propiedades térmicas de los polímeros, copolímeros y materiales compuestos, es decir aquellas que suceden al elevar la temperatura como la temperatura de fusión, temperatura de transición vítrea y calor de fusión, además de su pureza y estabilidad. Debido a los resultados que se obtienen de este análisis tiene gran aplicación en la industria farmacéutica, alimenticia y biotecnología (Gregorova, 2013, p. 3,4; Menczel, J. Judovits, L. Prime, R. Bair, H. Reading, M y Swier, S, 2009, p. 8).

El análisis DSC de una muestra se lleva a cabo bajo determinados parámetros como temperatura definida en varias combinaciones ya sean ciclos de calentamiento o enfriamiento, presión estable y una atmósfera inerte o reactiva dependiendo de la muestra a analizar. En general la muestra y la referencia se mantienen a la misma temperatura, mientras que cualquier transición producida en la muestra necesita un suministro de energía que es registrada por el DSC (Gregorova, 2013, p. 3).

**Punto de fusión y calor de fusión:** el punto de fusión es la temperatura a la cual un sólido cristalino cambia a líquido amorfo. El punto de fusión de equilibrio de un polímero cristalino es la más baja temperatura a la cual los cristales macroscópicos de equilibrio completamente funden. El punto de fusión para polímeros semicristalinos es difícil de determinar ya que se funden en su totalidad en un rango amplio de temperatura. El calor de fusión es la cantidad de calor que tiene que ser suministrado a 1 g de una sustancia para cambiar desde un sólido cristalino a un líquido isotrópico (Menczel et al, 2009, p. 16, 17).

**Temperatura de cristalización:** es la temperatura a la cual un líquido amorfo se convierte en un sólido cristalino mediante un enfriamiento, como resultado de un sobreenfriamiento, el punto de congelación es casi siempre menor que el punto de fusión. Para polímeros semicristalinos la temperatura de cristalización es la temperatura más alta de la isoterma de cristalización (Menczel et al, 2009, p. 17).

**Temperatura de transición vítrea:** la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) es la temperatura que corresponde a movimientos de traslación de los segmentos de la cadena del polímero, en la cual el polímero amorfo o semicristalino cambia de estado rígido y frágil a un estado flexible. Por debajo de la temperatura de transición vítrea los movimientos de polímeros disponibles son limitados, pero por encima de esta temperatura los movimientos son posibles (Menczel et al, 2009, p. 17).

### 1.2.5.3. Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) o termogravimetría (TG) es una técnica en la cual se mide la masa de un polímero en función de la temperatura o tiempo, esto mientras la muestra se somete a un programa de temperatura controlada en una atmósfera controlada. El rango de temperatura utilizado para el análisis de polímeros va desde temperatura ambiente hasta  $1000^{\circ}\text{C}$ , mediante una purga de gas crea una atmósfera inerte, oxidante o reductora. Para polímeros por lo general se utiliza una atmósfera inerte u oxidante. Durante el proceso los polímeros presentan una disminución en su masa, así como una degradación conforme transcurre el calentamiento (Prime, R. Bair, H. Vyazovkin, S. Gallagher, P y Riga, A, 2009, p. 241).

De acuerdo a la pérdida de masa de los polímeros, los componentes se pueden clasificar como volátiles que generalmente se evaporan entre la temperatura ambiente y  $300^{\circ}\text{C}$ , componentes productos de la reacción de agua y formaldehído del curado de resina, que generalmente se forman entre  $100^{\circ}\text{C}$  y  $250^{\circ}\text{C}$  y la generación de productos de degradación volátiles a temperaturas superiores a  $200^{\circ}\text{C}$  pero menores a  $800^{\circ}\text{C}$ . Todas estas masas pérdidas durante el proceso pueden caracterizarse mediante el TGA obteniendo como resultado la composición, el grado de curado y la estabilidad térmica de los polímeros, debido a los procesos térmicos y termo-oxidativos (Prime et al, 2009, p. 242).

#### **1.2.5.4. Microscopia Óptica (MO)**

La microscopia óptica consiste en el estudio estructural y morfológico de polímeros, a través de un microscopio óptico que utiliza luz, el mismo que amplifica la imagen varias veces permitiendo observar los detalles estructurales y morfológicos de la muestra estudiada. Para el estudio de muestras sólidas se requiere de un espécimen delgado que permita el paso de luz a través de la muestra, la misma que se dispersa y es recogida por un sistema de lentes para formar la imagen ampliada en un rango de aumento de 2 x a 2 000 x, resolución de alrededor de 24:05 (Sawyer, L. Grubb, D y Meyers, G, 2008, pp. 28,31).

#### **1.2.5.5. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)**

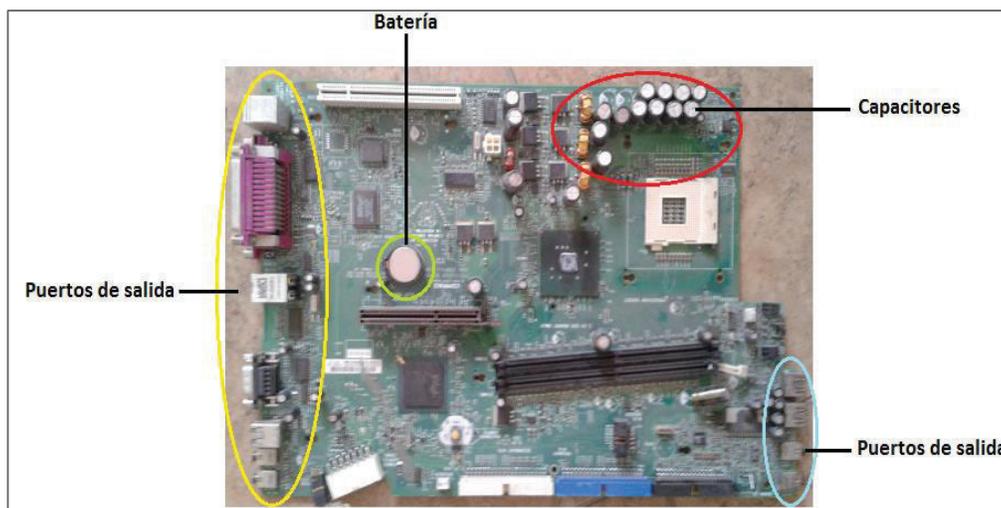
La microscopia electrónica de barrido es una técnica que permite el estudio estructural y morfológico más detallado de objetos, a través de un microscopio electrónico de barrido que utiliza electrones, el rango de amplificación de la imagen va de 20 a  $1 \times 10^5$ , con una resolución de 10 nm. El fundamento de la microscopia electrónica de barrido radica en que los electrones emitidos por un cátodo pasan a través de una columna en que se ha hecho un vacío, en la cual un haz inicial es concentrado por una serie de lentes electromagnéticas, la intensidad de corriente disminuye, el haz de electrones se vuelve puntual y se desplaza sobre la superficie de la muestra, esta interacción del haz electrónico y la muestra produce electrones secundarios que son captados por un detector, estos son amplificados y son dirigidos hacia un tubo similar a un osciloscopio de rayos catódicos produciendo la imagen ampliada (Sawyer et al, 2008, pp. 36-39).

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN NO METÁLICA OBTENIDA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS DESECHADAS

#### 2.1.1. OBTENCIÓN DE LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS

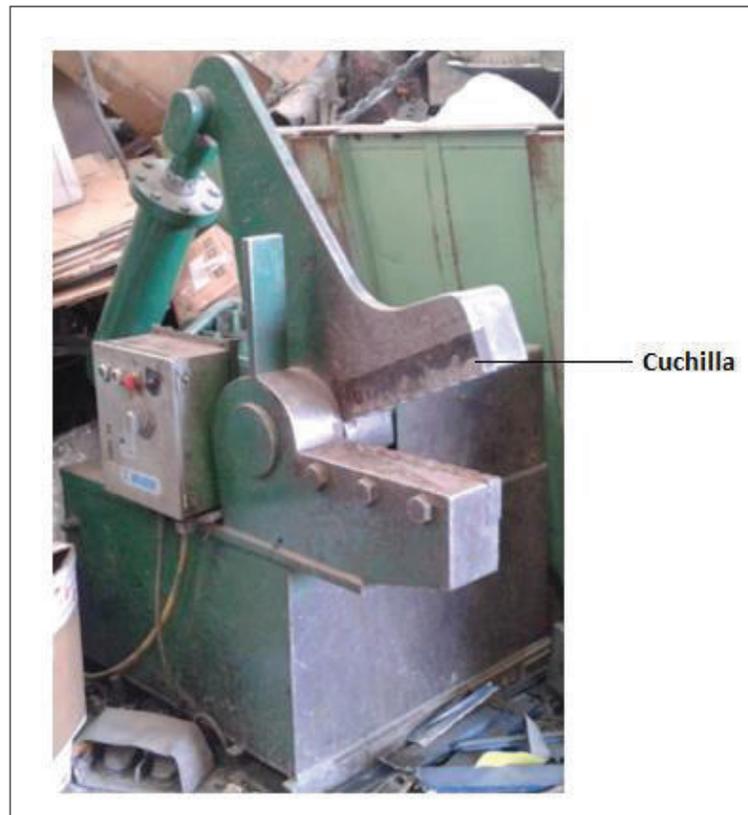
La obtención de tarjetas de circuitos impresos de computadoras se realizó a través de la empresa Recicla Metal, dicha empresa está dedicada al reciclaje de todo tipo de material pero en especial de implementos de oficina como computadoras, sillas, archivadores, entre otros materiales. De la empresa Recicla Metal se obtuvieron 30 tarjetas de circuitos impresos de computadoras marca COMPAQ. En la Figura 2.1 se observa un ejemplo de la tarjeta de circuitos impresos utilizada para el presente proyecto.



**Figura 2.1.** Tarjeta de circuitos impresos

Para mayor facilidad de manejo de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras y disminuir la cantidad de metal presente en estas, se cortaron los puertos de salida USB, audio, video, serie, paralelo y VGA, se extrajo la batería y

los capacitores. Una vez retirados estos materiales de la tarjeta se procedió a cortarla en ocho partes para que el tamaño del material no sea mayor a 6 cm a través de una máquina cizalladora que se observa en la Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Cizalladora utilizada para cortar las tarjetas de circuitos impresos

Los pedazos de la tarjeta de circuitos impresos de computadoras se los molió a través de un molino de martillo modelo D6431 marca Condux, con capacidad de 500 g, el equipo consta de un tolva de alimentación rectangular de 16,1 cm de ancho y 31,2 cm de longitud, una cámara de trituración en la que se encuentran un malla metálica con agujeros de 2 mm de diámetro y un juego de cuchillas metálicas. Como la eficiencia del molino de martillos no es 100% se remolió el material no metálico hasta obtener la mayor cantidad de material de menor partícula. En la Figura 2.3 se muestran fotografías del equipo utilizado.

Una vez realizada la molienda de las tarjetas de circuitos impresos se tamizó a través de la malla 16 de la cual se obtuvo el material fino y el material que no se

molió adecuadamente. El material que pasó la malla 16 es decir con tamaño de partícula de 1,18 mm se lo separó a través de una separación gravimétrica.



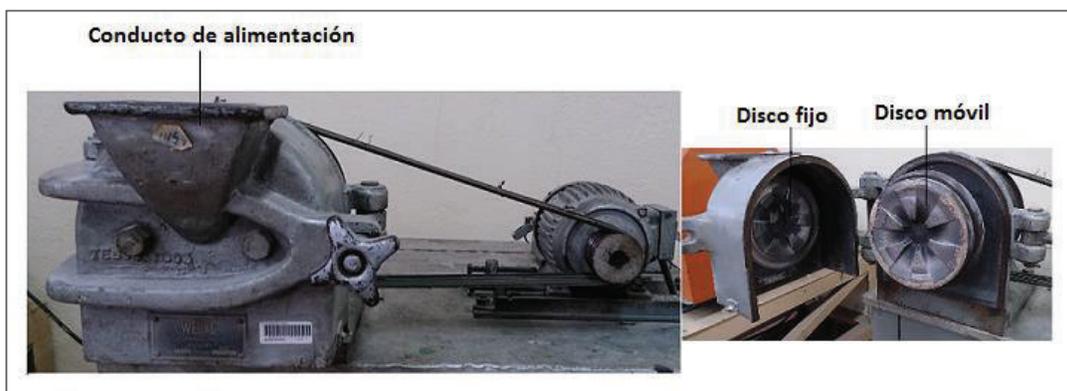
**Figura 2.3.** Molino de martillos utilizado para la reducción de tamaño de las tarjetas de circuitos impresos

Para la separación gravimétrica fue necesario humedecer el material y añadir jabón para facilitar su manejo ya que es bastante hidrófobo, de esta manera se reduce la tensión superficial. Del proceso de separación se obtuvieron tres fracciones la primera de finos en la que se encontró la mayor cantidad de material polimérico, la segunda de mixtos en la que había una porción de material no metálico y una porción de metales, y una tercera que corresponde a los gruesos donde se encontró la mayor cantidad de metales. Debido a la cantidad de fracción no metálica que se observó en la fracción mixta se procedió a reprocesar dicha fracción, obteniéndose de esta manera mayor cantidad de material no metálico.

La fracción no metálica obtenida de la separación gravimétrica se dejó sedimentar por 1 día y luego de esto se colocó en la estufa marca Memmert modelo DIN 12880-

KI por 24 horas a una temperatura de 80°C para eliminar completamente la humedad.

La fracción no metálica libre de humedad se tamizó a través de las mallas número 100 y 200 obteniéndose dos tamaños de partícula: entre 0,15 mm y 0,075 mm y menor a 0,075 mm para la formación de los materiales compuestos. La fracción no metálica que no pasó las malla 100 se molió en un molino de discos de marca Wedag.



**Figura 2.4.** Molino discos utilizado para la remolienda de la fracción no metálica

## **2.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORA**

### **2.1.2.1. Análisis por Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR)**

Para el análisis de espectroscopia de infrarrojo de los tamaños de partícula 0,075 mm y 0,15 mm de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras, se llevó a cabo la eliminación de humedad para lo cual se colocó la muestra en la estufa de marca Venticell por dos horas a 100°C. Como las muestras para analizar eran un material sólido muy fino se llevó a cabo la formación de una pastilla con bromuro de potasio. Para esto se tomó una cantidad de muestra de tamaño de partícula 0,075 mm y bromuro de potasio, en una relación 1:100 y se los homogenizó en un mortero, una vez homogenizada la muestra se colocó en el

instrumento para formación de pastillas y se lo prensó para obtener una pastilla delgada, de igual manera se realizó el proceso para la muestra de 0,15 mm.

Las pastillas delgadas de muestras de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras fueron analizadas por transmitancia desde los  $4\ 000\ \text{cm}^{-1}$  hasta los  $400\ \text{cm}^{-1}$  con el espectrofotómetro de infrarrojo Perkin Elmer modelo Spectrum One. Para obtener una buena resolución de los espectros se llevó a cabo una normalización, suavizado de los picos y corrección de la línea base, mediante el software del equipo.

Se realizaron tres análisis de espectroscopia de infrarrojo para cada tamaño de partícula (0,15-0,075 m y <0,075 mm).

#### **2.1.2.2. Análisis por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)**

El análisis de calorimetría diferencial de barrido se llevó a cabo para la determinación de las propiedades térmicas de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras mediante un calorímetro diferencial de barrido Netzsch, modelo DSC 204 F1 Phoenix. El análisis se llevó a cabo con base en la norma ASTM D3818 (ASTM, 2008, p.1).

Se pesó la muestra y se colocó en la celda de aluminio sellada. Los ensayos se llevaron a cabo en una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 20 mL/min con los siguientes barridos:

- a) Primer calentamiento:** desde temperatura ambiente hasta  $250^{\circ}\text{C}$  a una tasa de calentamiento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- b) Paso isotermal:** se mantuvo la temperatura de  $250^{\circ}\text{C}$  por 10 minutos
- c) Primer enfriamiento:** desde  $250^{\circ}\text{C}$  hasta temperatura ambiente
- d) Segundo calentamiento:** desde temperatura ambiente hasta  $250^{\circ}\text{C}$  a una tasa de calentamiento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- e) Segundo enfriamiento:** desde  $250^{\circ}\text{C}$  hasta temperatura ambiente

Mediante el software Proteus Analysis se determinó la temperatura de fusión, transición vítrea y calor de fusión.

Se realizaron tres análisis de calorimetría diferencial de barrido para cada tamaño de partícula (0,15-0,075 m y <0,075 mm).

#### **2.1.2.3. Análisis de Termogravimetría (TGA)**

Se pesó aproximadamente 10 mg de muestra y se lo colocó en el porta muestras de equipo TGA-50 marca Shimadzu y se llevó a cabo el procedimiento con base a la norma ASTM E2105. La prueba se llevó a cabo con una tasa de calentamiento de 10 °C/min hasta alcanzar los 900 °C y un flujo de nitrógeno de 50 mL/min (ASTM, 2010, p.1).

Se realizaron tres análisis de termogravimetría para cada tamaño de partícula (0,15-0,075 m y <0,075 mm).

#### **2.1.2.4. Análisis para la determinación de toxicidad de lixiviados (TCLP)**

Para el análisis de lixiviados se tomó 10 g de cada muestra, se realizó el muestreo por cuarteo para obtener una muestra representativa. Se colocó la muestra en un vaso de precipitación, se añadió 200 mL de agua destilada y 0.5 mL de ácido acético ya que el análisis se lleva a cabo a pH 4, y se dejó en agitación por 21 horas. Este análisis se lo realizó siguiendo el método 1311 de la EPA. (EPA, 1992, pp.1)

Una vez obtenida la muestra se llevó a cabo la caracterización mediante un equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica ubicado en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Facultad de Ingeniería Química, modelo Analyst 300 para determinar la concentración de los elementos presentes en la fracción no

metálica de las tarjetas de circuitos impresos. Los elementos analizados fueron los presentados en la Ordenanza Metropolitana de Quito 404.

## 2.2. PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS DE MATERIALES COMPUESTOS POR POLIMETILMETACRILATO Y RESINA POLIÉSTER INSATURADA CON LA PORCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS

**Tabla 2.1.** Variable y niveles para la formulación de los materiales compuestos

<b>Matriz del material compuesto</b>	<b>Variabes</b>	<b>Niveles</b>
<b>Resina poliéster insaturada</b>	Concentración de material no metálico	25%
		30%
		35%
	Tamaño de partícula de material no metálico	0,075-0,15 mm (malla 100)
		<0,075 mm (malla 200)
<b>Polimetilmetacrilato</b>	Concentración de material no metálico	10%
		15%
		20%
	Tamaño de partícula de material no metálico	0,075-0,15 mm (malla 100)
		<0,075 mm (malla 200)

Para la formulación tanto del material compuesto por resina poliéster insaturada y polimetilmetacrilato con la fracción no metálica de los residuos de tarjetas de circuitos impresos se utilizaron dos variables que fueron: concentración de material no metálico y tamaño de partícula. Para la variable concentración se tomaron tres niveles; mientras que para la variable tamaño de partícula se tomaron dos niveles. Los niveles y las variables para cada material compuesto formado se detallan en la Tabla 2.1. El diseño experimental seleccionado fue un diseño completamente al azar 3x2, ya que se deseó determinar la influencia que tiene tanto el tamaño de

partícula como la concentración de carga en las propiedades mecánicas para la selección del material compuesto para el diseño de la planta.

### **2.2.1. PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS DE MATERIAL COMPUESTO POR POLIMETILMETACRILATO Y LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS**

Los reactivos que se utilizaron para la producción del material compuesto de polimetilmetacrilatos fueron: monómero metilmetacrilato destilado de la casa comercial Poliacrilarit Cia. Ltda, y como iniciador se utilizó peróxido de benzoilo con 50% de pureza de la casa comercial Merck.

Para la producción del material compuesto se mezcló en un balón aforado de 250 ml aproximadamente 100 mL de monómero metilmetacrilato con 0,5% en peso de iniciador peróxido de benzoilo, a esta mezcla se añadió la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula y concentración de acuerdo a la Tabla 2.1. La mezcla se calentó sobre una plancha de calentamiento marca Cimarec a una temperatura de 60°C, se utilizó un tubo de vidrio refrigerante sobre el balón aforado para evitar que se escape el metilmetacrilato debido a su alta volatilidad. El calentamiento se realizó durante un tiempo aproximado de una hora hasta obtener el prepolímero del polimetilmetacrilato (líquido con viscosidad considerable). Una vez obtenido el prepolímero se vertió en moldes de vidrio previamente sellados con silicón. El tamaño y forma del molde de vidrio dependerá de los requerimientos para realizar las pruebas mecánicas y la caracterización estructural del material, dichos tamaños se presentan posteriormente en la sección 2.3 en cada ensayo realizado.

Los moldes rellenos del material compuesto se colocaron en un baño térmico a una temperatura de 65°C durante un tiempo aproximado de 5 horas, esto se realizó con la finalidad de que termine la polimerización del polimetilmetacrilato.

### **2.2.2. PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS DE MATERIAL COMPUESTO POR RESINA POLIÉSTER INSATURADA Y LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS**

Para la elaboración de mezclas de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras con la resina poliéster insaturada se utilizó una resina poliéster insaturada, peróxido de metil-etil-cetona y octoato de cobalto. Los reactivos fueron de marca Reuce de la casa comercial Casa del Pintor.

Se llevó a cabo el curado de la resina sola, se colocó 100 mL de resina poliéster en un envase plástico, y la mezcla se colocó en moldes de radiografías previamente elaborados para su posterior curado.

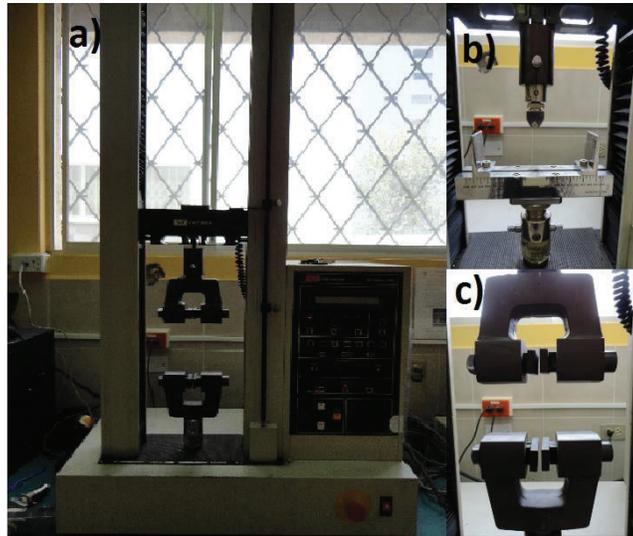
Para la producción del material compuesto se mezcló en un recipiente de plástico 100 mL de resina poliéster insaturada, se añadió 2 mL de peróxido de metil-etil-cetona como iniciador y se mezcló por 15 s, se añadió 4 gotas de octoato de cobalto que es catalizador y se mezcló por 10 s, a esta mezcla se añadió la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula y concentración de acuerdo a la Tabla 2.1.

Una vez obtenido el material compuesto se colocó en moldes de radiografía previamente elaborado con los requerimientos de tamaño y forman para realizar las pruebas mecánicas y la caracterización estructural del material, dichos tamaños se presentan posteriormente en la sección 2.3 en cada ensayo realizado.

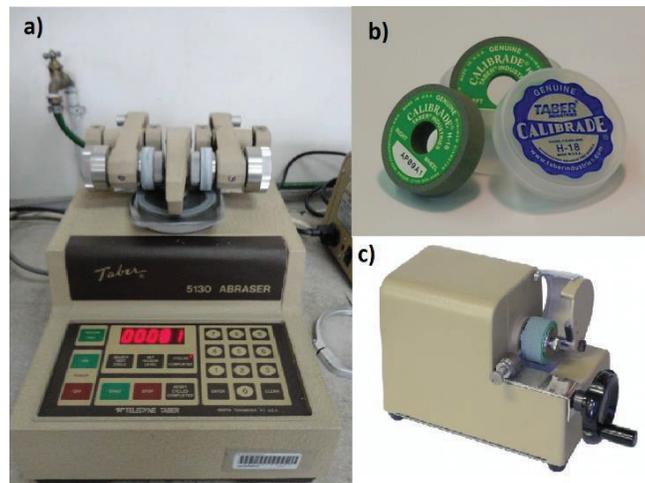
### **2.3. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS COMPUESTAS PREPARADAS (EN CONCENTRACIÓN Y TAMAÑO DE PARTÍCULA)**

Para el ensayo de tracción y flexión se utilizó la máquina universal para ensayos mecánicos marca INSTRON modelo 1011 que se muestra en la Figura 2.5. Para el

ensayo de abrasión se utilizó un abrasímetro rotatorio marca Taber modelo 5130 que se muestra en la Figura 2.6.



**Figura 2.5.** a) Máquina universal para ensayos mecánicos, b) soportes para ensayos de flexión, c) mordazas para ensayos de tracción.



**Figura 2.6.** a) abrasímetro rotatorio, b) ruedas abrasivas utilizadas para el ensayo de abrasión, c) equipo para condicionar las ruedas abrasivas

### 2.3.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

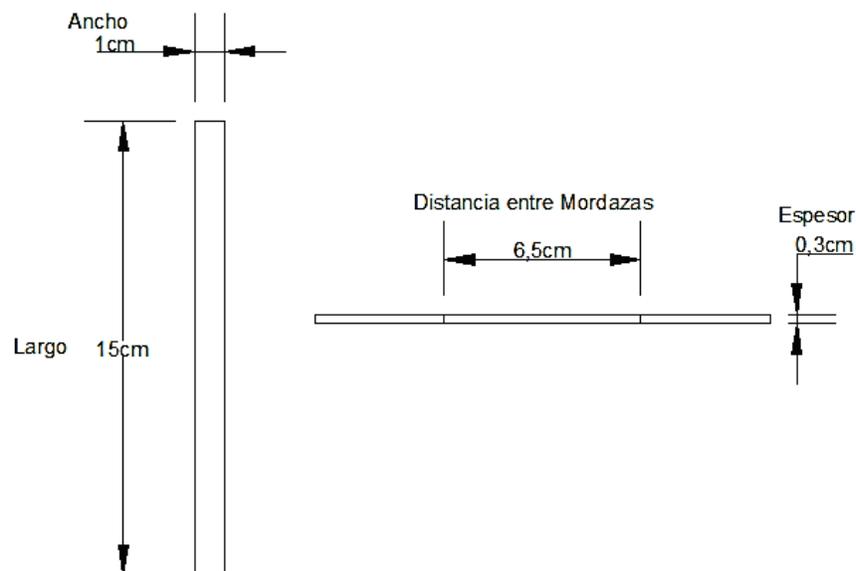
Los ensayos de tracción se realizaron siguiendo la norma ASTM D3039 “Método de prueba estándar para propiedades de tracción para materiales compuestos con

matriz polimérica” (ASTM, 2008, p. 1). En la Figura 2.7 se exponen las dimensiones de las placas usadas para los ensayos de tracción para el material compuesto de polimetilmetacrilato y el de resina poliéster insaturada.

Se realizó un total de 10 ensayos de tracción para cada concentración y tamaño de partícula de material no metálico presentado en la Tabla 2.1. En la Tabla 2.2 se muestra los parámetros que se utilizaron para realizar los ensayos de tracción.

**Tabla 2.2.** Parámetros usados para realizar los ensayos de tracción

Parámetro	Valor
Capacidad de la celda	5 kN
Frecuencia de muestra	5 pts/s
Velocidad del cabezal	5 mm/min
Distancia entre mordazas	6,5 cm



**Figura 2.7.** Dimensiones de las placas usadas para los ensayos de tracción

### 2.3.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

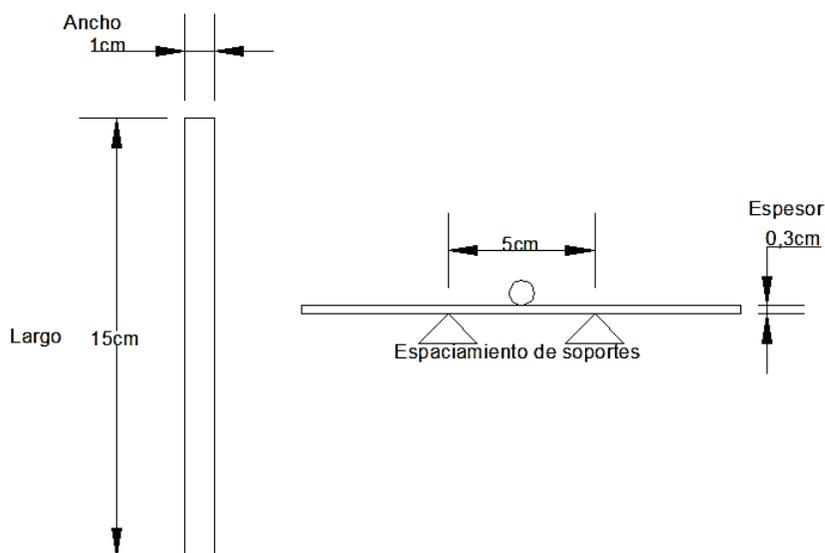
Los ensayos de flexión se realizaron siguiendo la norma ASTM D7264 “Método de prueba estándar para propiedades de flexión para materiales compuestos con

matriz polimérica” (ASTM, 2007, p. 1). En la Figura 2.8 se exponen las dimensiones de las placas usadas para los ensayos de flexión para el material compuesto de polimetilmetacrilato y el de resina poliéster insaturada.

Se realizó un total de 10 ensayos de flexión para cada concentración y tamaño de partícula de material no metálico presentado en la Tabla 2.1 . En la Tabla 2.3 se muestra los parámetros que se utilizaron para realizar los ensayos de flexión.

**Tabla 2.3.** Parámetros usados para realizar los ensayos de flexión

Parámetro	Valor
Capacidad de la celda	0,5 kN
Frecuencia de muestra	1 pts/s
Velocidad del cabezal	1 mm/min
Espaciamento entre soportes	5 cm



**Figura 2.8.** Dimensiones de las placas usadas para los ensayos de flexión

### 2.3.3. ENSAYO DE ABRASIÓN

Los ensayos de abrasión se realizaron siguiendo la guía ASTM G195 “Guía estándar para la realización de pruebas de desgaste utilizando un abrasímetro

rotatorio” (ASTM, 2013, p. 1). Se utilizaron placas cuadradas de 10 cm de lado para realizar los ensayos de abrasión para el material compuesto de polimetilmetacrilato y el de resina poliéster insaturada.

Se realizó un total de 3 ensayos de abrasión para cada concentración y tamaño de partícula de material no metálico presentado en la Tabla 2.1. En la Tabla 2.4 se muestra los parámetros que se utilizaron para realizar los ensayos de abrasión. Los datos obtenidos en las pruebas de abrasión fueron las diferencias de pesos entre la muestra original y la muestra desgastada.

**Tabla 2.4.** Parámetros usados para realizar los ensayos de abrasión

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Tipo de rueda abrasiva</b>	H-18
<b>Número de ciclos</b>	100
<b>Peso de los contrapesos</b>	500 gf
<b>Número de ciclos para acondicionamiento</b>	300

## **2.4. EVALUACIÓN DEL ENCAPSULAMIENTO MEDIANTE CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS MATERIALES COMPUESTOS Y DETERMINACIÓN DE TOXICIDAD DE LIXIVIADOS**

### **2.4.1. EVALUACIÓN DEL MEZCLADO DISPERSIVO-DISTRIBUTIVO**

Para evaluar el mezclado dispersivo-distributivo se formaron placas cuadradas de 10 cm de lado para cada concentración y tamaño de partícula presentados en la Tabla 2.1, estas placas fueron escaneadas realizando una cuadrícula sobre ellas, obteniendo así 100 cuadrados del mismo tamaño. Se realizó la evaluación de mezclado dispersivo-distributivo para tres muestras para cada concentración y tamaño de partícula de material no metálico presentado en la Tabla 2.1.

Para determinar la distribución se contabilizaron los cuadros que contenían material no metálico y se determinó el porcentaje de distribución de cada muestra. Para determinar la dispersión, de los cuadros que contenían material no metálico, se contabilizaron los cuadros que contenían mayor concentración de residuos y se determinó el porcentaje de dispersión.

#### **2.4.2. MICROSCOPIA ÓPTICA (MO)**

Las mezclas de fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos tanto con resina poliéster insaturada como con polimetilmetacrilato seleccionadas para el diseño de la planta fueron analizadas mediante microscopia óptica, con el equipo Thomas Scientific. Las mezclas fueron cortadas para obtener una superficie plana y fueron colocadas en el portamuestras del microscopio y se procedió a realizar el análisis estructural.

#### **2.4.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)**

Las mezclas seleccionadas para el diseño de planta de fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos tanto con resina poliéster insaturada como con polimetilmetacrilato, fueron analizadas mediante microscopia electrónica de barrido con el equipo Tescan con analizador de Rayos X Quantax. Las mezclas fueron cortadas para obtener una superficie plana y revestida de oro para aumentar su conductividad, mejorando así la imagen visualizada en el microscopio. Las muestras fueron colocadas en la cámara del microscopio y se procedió a realizar el análisis estructural con el programa Esprit 1.8 (Bruker). En la Figura 2.9 se muestra el equipo empleado. Los parámetros utilizados para la microscopía electrónica de barrido fueron los siguientes:

- Voltaje de aceleración: 10 kV
- Tipo de señal: Electrones secundarios
- Aumentos: 300X, 500X, 1 000X y 2 000X



**Figura 2.9.** Microscopio electrónico de barrido TESCAN  
(Montero, 2012, p. 41)

#### **2.4.4. ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN TOXICIDAD DE LIXIVIADOS (TCLP)**

Se realizó el análisis TCLP para los materiales compuestos seleccionados para el diseño de planta, de resina poliéster insaturada y polimetilmetacrilato, siguiendo los mismos parámetros de punto 2.1.2.4.

Debido a que no se obtuvo resultados coherentes del primer análisis TCLP, se procedió a realizar un nuevo análisis de lixiviados pero esta vez no fueron pulverizadas las muestras como menciona la norma del ensayo. Las muestras fueron trituradas en el molino de martillos obteniéndose partes de mayor tamaño (aproximadamente 1 cm). Al igual que los ensayos de TCLP, se dejó lixiviar durante 24 horas y se realizó la medición de los elementos en la solución mediante absorción atómica. Se realizaron dos TCLP para cada material compuesto seleccionado para el diseño de la planta.

## **2.5. DISEÑO DE UNA PLANTA PARA PROCESAR 600 TONELADAS DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE POLIMETILMETACRILATO Y RESINA POLIÉSTER INSATURADA REFORZADOS CON LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DESECHADAS**

Para la obtención de mezclas de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con resina poliéster insaturada y polimetilmetacrilato, se elaboró el diagrama de bloques y un diagrama de flujo del proceso considerando como materia prima las tarjetas de circuitos impresos de computadoras, en el cual se inicia con la obtención de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos y se termina al obtener una mezcla compuesta que da como producto baldosas plástica de resina poliéster insaturada y domos de polimetilmetacrilato.

Para la localización de la planta se consideraron factores como la facilidad de adquirir servicios industriales como agua potable, energía eléctrica, así como la disponibilidad de materias primas, la facilidad de transporte y la fuerza laboral.

A partir de los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas tanto a la fracción no metálica como a las mezclas compuestas se logró determinar la mejor composición de los materiales compuestos, y mediante esta composición se elaboró el proceso para la obtención de domos y baldosas plásticas.

A partir del material compuesto que presentó propiedades mecánicas mayores en comparación al material puro se diseñó la planta cuya capacidad será el 60% del total de los residuos de computadoras generados en el país, es decir 600 toneladas (Aguas, 2013, p.1). Se destinó el 30% a materiales compuestos de polimetilmetacrilato y el 70% a materiales compuestos de resina poliéster. A través del balance de masa se determinó la cantidad de materia prima, insumos y servicios industriales requeridos para la obtención de los productos, así como las capacidades de los diferentes equipos para su diseño y selección

## 2.6. ESTABLECIMIENTO DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE DOMOS Y BALDOSAS PLÁSTICAS

Con base en la información obtenida en el punto anterior se estimó la inversión y costos de operación de la planta, se consideró una inversión fija en la que se toma en cuenta costos de terreno, construcción, equipos y maquinaria para la operación de la plana. Además se consideró los costos operativos en los que se incluye valores del personal de la planta como jefe de planta, operarios y personal administrativo, de materia prima e insumos y por último el valor de los servicios como electricidad y agua.

A través del flujo de caja anual realizado se calculó los indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) que facilitan la evaluación económica.

El VAN se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{I_n - E_n}{(1+i)^n} \quad [2.1]$$

Donde:

VAN: valor actual neto de la inversión

$I_n$ : ingresos iniciales

$E_n$ : egresos generados

N: es el número de períodos considerados

$i$ : tasa de interés

El valor del TIR se calcula con la ecuación antes presentada, considerando que el VAN es igual a cero, este indicador financiero representa la tasa de interés en la cual el valor actual neto de los costos de inversión es igual al valor presente de los beneficios.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN NO METÁLICA OBTENIDA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS DESECHADAS

##### 3.1.1. OBTENCIÓN DE LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS

En la Tabla 3.1 se muestran los pesos de las partes de las tarjetas que fueron removidas inicialmente debido a su alto contenido de metales.

**Tabla 3.1.** Resultados de los pesos de las partes de las tarjetas que fueron removidas inicialmente

Número de tarjeta	Peso total tarjeta (g)	Peso capacitores, puertos de salida y batería (g)	Peso de tarjetas sin capacitores, puertos de salida y baterías (g)
1	560,41	69,06	491,35
2	546,48	60,15	486,33
3	548,42	59,83	488,59
4	541,28	60,60	480,68
5	560,66	68,10	492,56
6	547,68	60,06	487,62
7	549,28	59,09	490,19
8	548,42	59,61	488,81
9	544,42	58,09	486,33
10	566,18	66,88	499,30
<b>Promedios</b>	551,32	62,15	489,18
<b>Porcentaje</b>	100,00%	11,27%	88,73%
		<b>Total</b>	4891,76

En la Tabla 3.1 se observa que se retiró un promedio del 11,27% del peso total de las tarjetas. Este 11,27% corresponde al peso de puertos de salida, capacitores y baterías. Los puertos de salida fueron removidos debido a que casi en su totalidad

están conformados por metales, los cuales podrían ocasionar daños en el molino de martillos debido a que forman aglomerados metálicos que desgastan rápidamente las cuchillas, y además no contiene una cantidad considerable de material polimérico, con el cual se procederá a formar los materiales compuestos. Tanto las baterías como los capacitores se removieron debido a que contienen sustancias peligrosas y nocivas que pueden ser liberadas en la molienda, este tipo de componentes necesitan un tratamiento de residuos diferente al analizado en este proyecto.

El análisis antes indicado se realizó para 10 tarjetas de circuitos impresos; sin embargo, para llevar a cabo la obtención de la fracción no metálica se utilizaron un total de 30. El peso total de las tarjetas utilizadas para el estudio se muestra en la Tabla 3.2.

En la Tabla 3.2 se muestran los pesos de las fracciones obtenidas después de la molienda en el molino de martillos.

**Tabla 3.2.** Resultados de las fracciones obtenidas después de la molienda en el molino de martillos

	<b>Peso de tarjetas sin capacitores, puertos de salida y baterías (g)</b>	<b>Peso de material con tamaño mayor 1,18 mm (g)</b>	<b>Peso de material con tamaño menor 1,18 mm (g)</b>
	15 303,63	8 659,42	6 644,22
<b>Porcentajes</b>	100,00%	56,58%	43,42%

La separación en partículas con tamaños mayores y menores a 1,18 mm (malla #16) fue necesaria primero porque los aglomerados de metales tienen un tamaño mayor a 1,18 mm y segundo porque se observó que en piezas de tamaño mayor a 1,18 mm aún existía una mezcla de metales y no metales. El material con tamaño mayor a 1,18 mm fue remolido en el mismo tipo de molino utilizado anteriormente. Los aglomerados metálicos fueron retirados antes de la remolienda. Al material con tamaño menor a 1,18 mm se le realizó la separación gravimétrica.

**Tabla 3.3.** Resultados de la pérdida en peso del material durante la separación gravimétrica

	<b>Peso del material antes de separación gravimétrica [g]</b>	<b>Peso del material después de separación gravimétrica [g]</b>	<b>Peso perdido en separación gravimétrica [g]</b>
	6 644,22	6 417,09	227,13
<b>Porcentaje</b>	100%	96,58%	3,42%

Como se puede observar en la Tabla 3.3 el peso de material con tamaño menor a 1,18 mm no es igual al peso de material obtenido después de la separación gravimétrica, ya que se pierde un 3,42% de peso debido a que una parte del material que entra a la separación gravimétrica no se sedimenta y permanece suspendido en el agua, siendo imposible su recolección.

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados obtenidos después de la separación gravimétrica.

**Tabla 3.4.** Resultados obtenidos después de la separación gravimétrica.

	<b>Material total obtenido después de la separación gravimétrica (g)</b>	<b>Fracción metálica (g)</b>	<b>Fracción no metálica (g)</b>
	6 17,09	2 092,84	4 324,25
<b>Porcentaje</b>	100,00%	32,61%	67,39%

El porcentaje de no metales presentes en las tarjetas de circuitos impresos analizados presentes fue de 67,39%, sin embargo en este porcentaje no se está tomando en cuenta la cantidad de metales que fueron retirados al inicio especialmente en los puertos de salida. Si se toma en cuenta el porcentaje de material que fue removido inicialmente, se tiene un total del 59,79% de material no metálico.

Según Guo et al (2009), la cantidad de no metales presentes en las tarjetas de circuito impreso es entre el 70% y 80%, pero en este estudio no se indica con

claridad si en este porcentaje se está tomando en cuenta algunos componentes de las tarjetas como son las baterías, capacitores y puestos de salida (p. 569). Esta diferencia de aproximadamente 10% entre los estudios realizados anteriormente y este estudio se debe principalmente a tres factores: el primero puede ser en la molienda, ya que el molino no tenía un buen cierre y se escapó una gran cantidad de material en forma de material particulado, este material particulado en su mayoría fueron no metales. En segundo lugar se pudo perder material no metálico en la separación gravimétrica como ya se explicó anteriormente una parte de sólidos no sedimentaron y no fue posible su recuperación, estos materiales que no sedimentaron fueron material no metálico debido a su baja densidad. Finalmente se tiene material no metálico presente en la fracción metálica obtenida después de la separación gravimétrica (como se puede observar en la Figura 3.1) ya que este tipo de separación no es completamente eficiente.



**Figura 3.1.** Fracción metálica obtenida de la separación gravimétrica

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos en la separación del material para formular los materiales compuestos.

**Tabla 3.5.** Resultados de los pesos obtenidos en el tamizado con malla número 100 y 200

	<b>Peso de fracción no metálica (g)</b>	<b>Material con tamaño mayor a 0,15 mm (g)</b>	<b>Material con tamaño entre 0,15 mm y 0,075 mm (g)</b>	<b>Material con tamaño menor a 0,075 mm (g)</b>
	4 324,25	2 221,67	960,19	1 142,39
<b>Porcentaje</b>	100,00%	51,38%	22,20%	26,42%
<b>Porcentaje</b>	100,00%	51,38%	48,62%	

Como se puede observar en la tabla anterior se obtuvo un 48,62% de material que pudo ser utilizado para formular el material compuesto tanto de resina poliéster insaturada y de polimetilmetacrilato, y el restante 51,38% fue remolido en el molino de discos.

Todo el material obtenido del molino de discos posee el tamaño deseado para la producción de los materiales compuestos, menor a 0,15 mm, ya que este tipo de molinos posee un disco que se mueve para ajustar al tamaño que se desea obtener, además es por esta razón que el molino de discos solo funciona para remoler materiales finos.

Cabe recalcar que se obtuvo una mayor cantidad de material con tamaño menor a 0,075 mm, que la cantidad de material con tamaño 0,15-0,075 mm, lo cual es muy importante ya que como se detallará más adelante en el trabajo, este es el tamaño de partícula con el que se formaron los materiales compuestos para el diseño de planta.

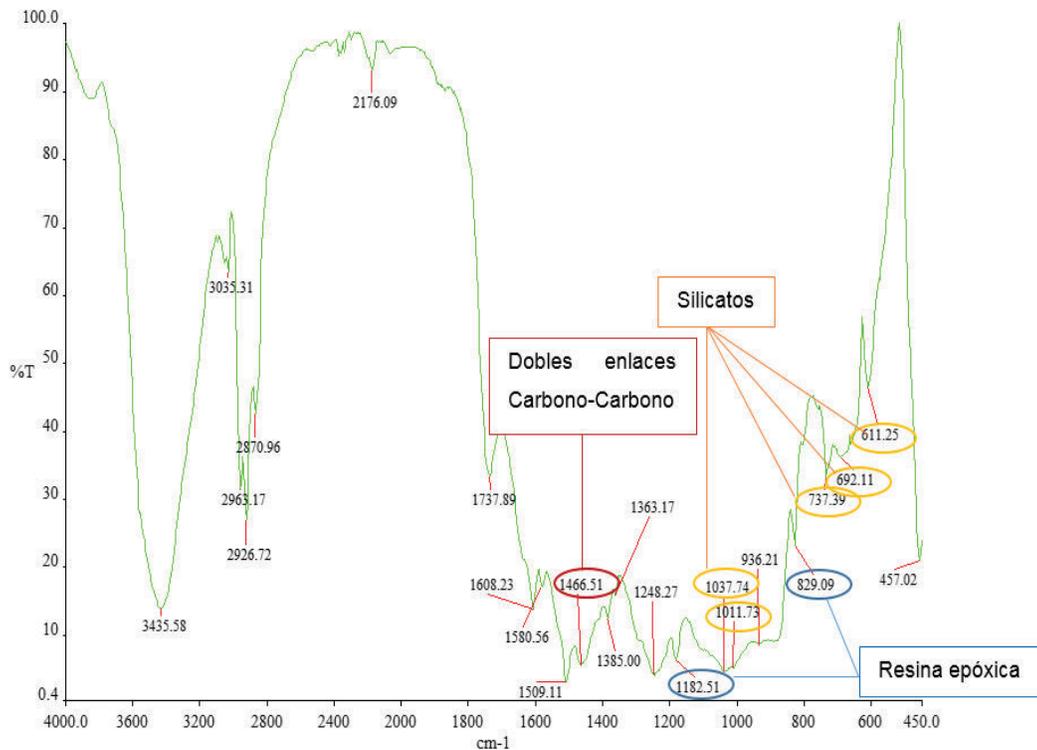
### **3.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORA**

#### **3.1.2.1. Análisis por Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR)**

La fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos se analizaron mediante FTIR por transmitancia, a continuación se muestran un espectro infrarrojo obtenidos

en un rango de 4 000 hasta los 400  $\text{cm}^{-1}$ . Se realizaron un total de tres espectros, los demás espectros se muestran en el ANEXO I

En la Figura 3.2 se muestra el espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula 0,15-0,075 mm



**Figura 3.2.** Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm.

Al analizar los espectros obtenidos de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos de computadoras no se logró comparar con un espectro estándar debido a que esta fracción es una mezcla de varios componentes como metales pesados, fibra de vidrio, resinas, retardantes a la llama bromados entre otros. En la Tabla 3.6 se presentan el listado de los grupos funcionales y sus respectivas bandas características encontradas en el espectro infrarrojo.

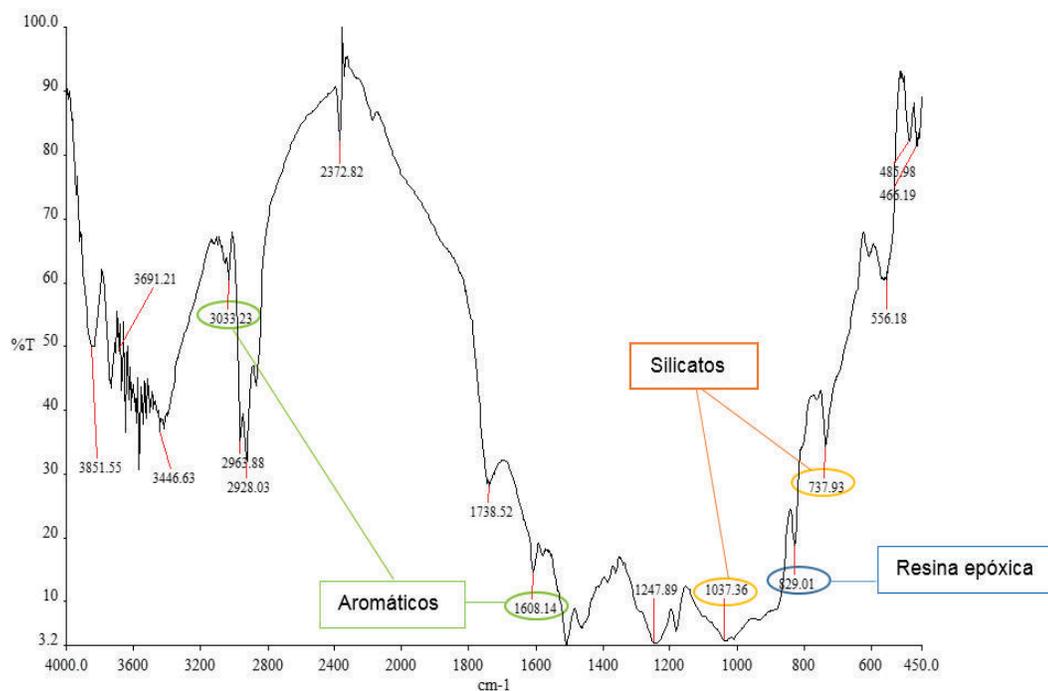
**Tabla 3.6.** Resultados del análisis de grupos funcionales presentes en el espectro infrarrojo de la fracción no metálica con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm

Grupo funcional	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Grupo funcional	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )
Alquilo	2 990 – 2 855	Alcohol aromático	3 610 – 3 225
	1 485 – 1 415		1 620 – 1 580
Alquilo con sustituyente metil	2 980 – 2 950		1 525 – 1 470
	2 885 – 2 865		1 095 -995
	1 465 – 1 445		840 – 740
	1 380 – 1 365		
Alquilo con sustituyente hidroxilo o amino	3 450 – 3 300	Alcohol aromático con sustituyente de fenol halogenado	3 610 – 3 260
	3 000 – 2 850		1 615 – 1 535
	1 470 – 1 575		1 525 – 1 445
	1 200 – 1 475		1 260 – 1 215
Aromáticos	3 100 – 3 000	Éter de arilo	1 085 – 1 000
	1 625 – 1 575		840 – 740
	1 530 – 1 475		3 080 – 2 855
Aromáticos con sustituyente fenol o amino	825 – 660		1 630 – 1 570
	1 620 – 1 585		1 515 – 1 445
	1 525 – 1 475		1 270 – 1 215
	1 340 – 1 210	1 140 – 1 030	
Silicato	880 – 640	Resina epóxica	800 – 710
	1 130 – 1 000		1 237 – 1 182
	800 - 660		1 182 – 829

En el espectro de la fracción no metálica de la tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula 0,15-0,075 mm se observa la presencia de resina epóxica cuyas bandas características en la Figura 3.2 son 1 182 y 829 cm<sup>-1</sup> las cuales no están alejados de los que se indica en bibliografía que son 1 235, 1 180 y 826 cm<sup>-1</sup> ya que se considera una variación de 5 dígitos. Adicionalmente se observa la presencia de silicatos cuyas bandas características están entre 1 130 – 1 000 y 800 – 660 cm<sup>-1</sup> lo cual se debe a que en esta muestra existe gran cantidad de fibra de vidrio. La banda característica de 1 465 -1 445 cm<sup>-1</sup> corresponde a los dobles

enlaces presentes entre carbono y carbono (Scheirs, 2003, p. 152, Achilias et al, 2009, p. 214).

En la Figura 3.3 se muestra el espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula menor a 0,075 mm.



**Figura 3.3.** Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula menor a 0,075 mm

En el análisis de grupos funcionales para el tamaño de partícula menor a 0,075 mm se observa la presencia de grupos hidroxilo cuya banda característica está en  $3\ 650 - 3\ 595\ \text{cm}^{-1}$  y amino cuya banda característica está entre  $3\ 540 - 3\ 200$  y  $1\ 205 - 885\ \text{cm}^{-1}$ . Se observa la presencia de silicatos en la Figura 3.3 cuyas bandas características están entre  $1\ 130$  y  $660\ \text{cm}^{-1}$  lo cual se debe a que en esta muestra existe gran cantidad de fibra de vidrio. Se observa la presencia de resina epóxica cuya banda características en la Figura 3.3 es  $829\ \text{cm}^{-1}$ , la banda característica de  $2\ 970$  a  $2\ 950\ \text{cm}^{-1}$  corresponde al grupo funcional fenoxi aromático (Scheirs, 2003, p. 152, Achilias et al, 2009, p. 214).

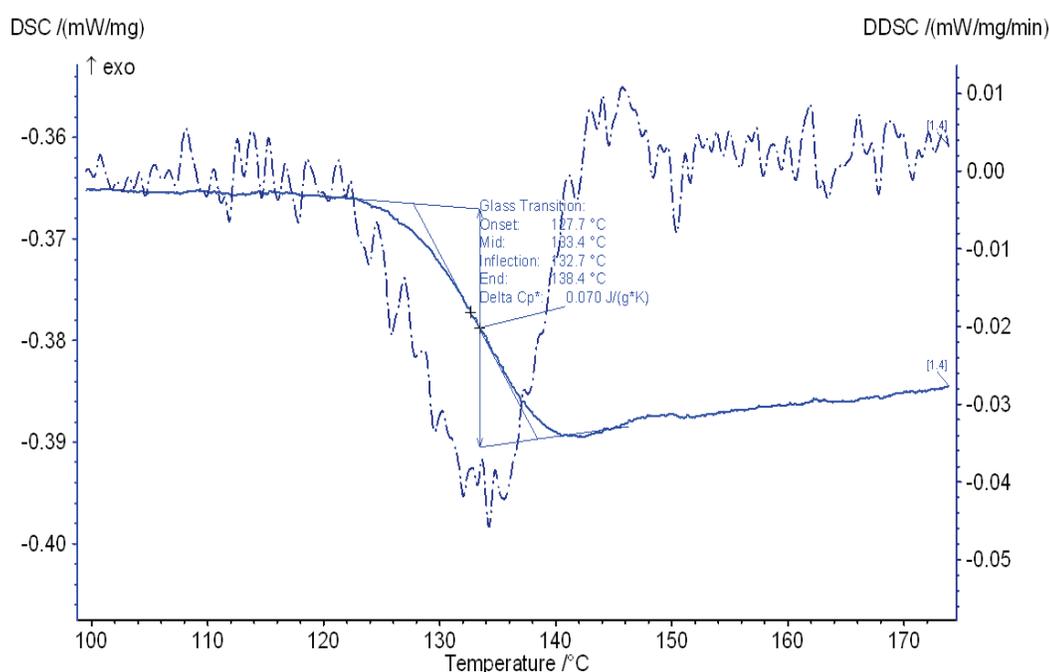
**Tabla 3.7.** Resultados del análisis de grupos funcionales presentes en el espectro infrarrojo de la fracción no metálica con tamaño de partícula menor a 0,075 mm

Grupo funcional	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Grupo funcional	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )
Alquilo	2 990 – 2 855 1 485 – 1 415	Aromáticos con sustituyente fenol o amino	1 620 – 1 585 1 525 – 1 475 1 340 – 1 210 880 - 640
Alquilo de cadena corta	2 970 – 2 950 2 880 – 2 650 1 475 – 1 455 785 - 740		3 610 – 3 225 1 620 – 1 580
Alquilo con sustituyente metil	2 980 – 2 950 2 885 – 2 865 1 465 – 1 445 1 380 – 1 365	Alcohol aromático	1 525 – 1 470 1 095 -995 840 - 740
Alquilo con sustituyente hidroxy amino	3 450 – 3 300 3 000 – 2 850 1 470 – 1 575 1 200 - 950	Alcohol aromático con sustituyente de fenol halogenado	3 610 – 3 260 1 615 – 1 535 1 525 – 1 445 1 260 – 1 215 1 085 – 1 000 840 - 740
Aromáticos	3 100 – 3 000 1 625 – 1 575 1 530 – 1 475 825 - 660	Hidroxilo	3 650 – 3 595
		Amino	3 540 – 3 225 1 205 - 885
Silicato	1 130 – 1 000 800 – 660	Resina epóxica	1 238 – 1 184 1 184 - 828

En el análisis de grupos funcionales para los dos tamaños de partícula de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos se observa la presencia de grupos aromáticos, debido a la cantidad de componentes que tiene la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos, según estudios realizados por Hoe. En la Tabla 3.7 se observa los diferentes grupos funcionales con sus bandas características, como el poliestireno cuyas bandas características son 3 100 – 3 000 cm<sup>-1</sup> (Achillas et al, 2009, p. 214, Hoe, 2014, p. 232).

### 3.1.2.2. Análisis por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

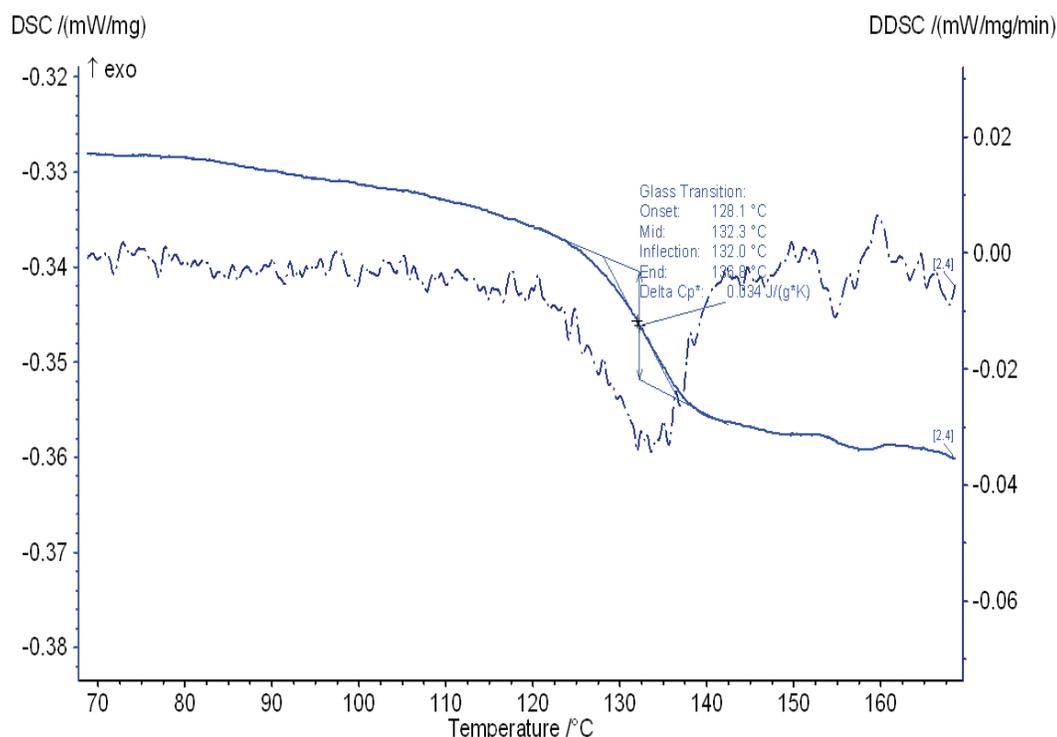
En las siguientes figuras se muestran los termogramas realizados desde temperatura ambiente hasta 250 °C, en atmósfera de nitrógeno con un flujo de 20 mL/min para los diferentes tamaños de partículas de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras para la determinación de la temperatura de transición vítrea. Se realizaron termogramas para tres muestras, los demás termogramas se presentan en el ANEXO II



**Figura 3.4.** Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm

En la Figura 3.4 y Figura 3.5 se observa los termogramas realizados a la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras con dos tamaños de partícula 0,15 mm y 0,075 mm respectivamente, en las cuales se muestra la temperatura de transición vítrea de esta fracción. Para el tamaño de partícula 0,15-0,075 mm la temperatura de transición vítrea es 133,4 °C como se presenta en la Figura 3.4, mientras que en la Figura 3.5 para el tamaño de partícula menor a 0,075 mm la temperatura de transición vítrea es 132,3 °C, la cual no difiere en mucho su

valor con relación al otro tamaño de partícula. Según bibliografía la temperatura de transición vítrea para la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos es 140 °C debido a que los mayores componentes de esta fracción son resina epóxica y fibra de vidrio. Este valor difiere con los termogramas presentados en bibliografía debido a que existen diferentes composiciones de otros elementos presentes en las tarjetas de circuitos impresos como son: cobre, plomo, níquel, compuestos bromados, etc. (Kaisersberger, Knappe, Mohler y Rahner, 2004, p. 81)



**Figura 3.5.** Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula 0,075 mm

### 3.1.2.3. Análisis de Termogravimetría (TGA)

A continuación se muestran los diagramas obtenidos al realizar el ensayo de termogravimetría para la muestra con tamaño de partícula 0,15-0,075 mm y para la muestra con tamaño de partícula menor a 0,075 mm.

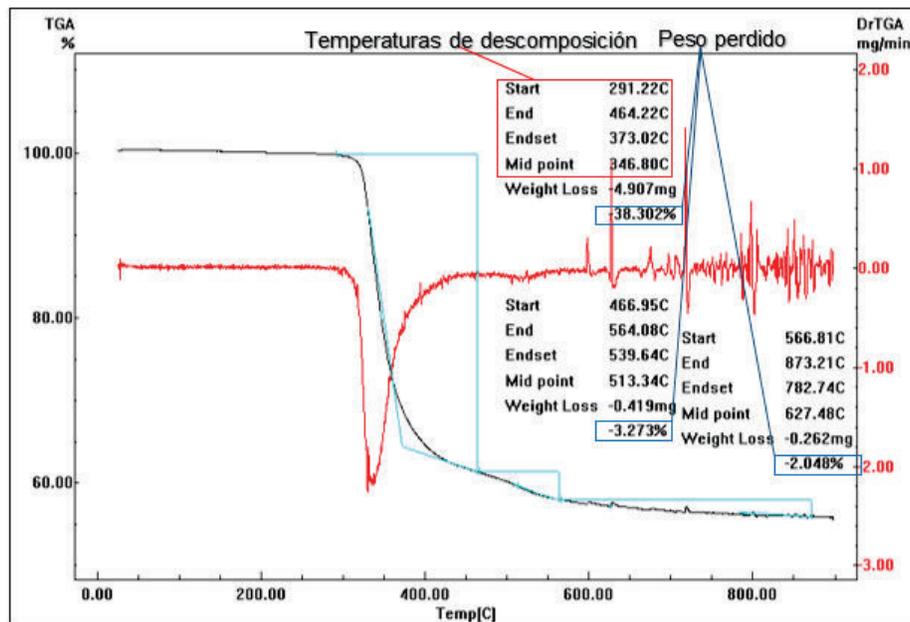


Figura 3.6. Diagrama termogravimétrico obtenido de la muestra con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm

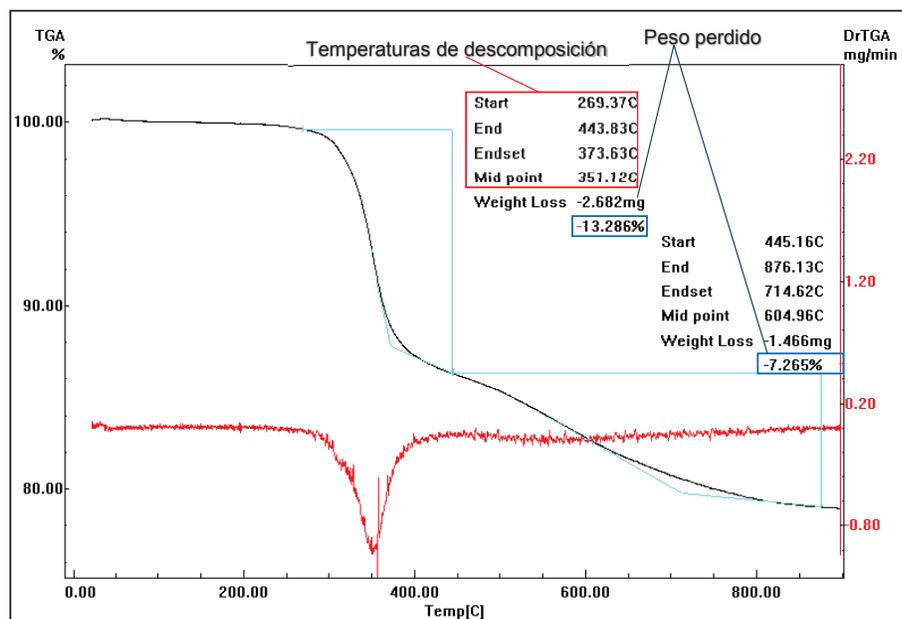


Figura 3.7. Diagrama termogravimétrico obtenido de la muestra con tamaño de partícula menor a 0,075 mm

Los componentes mayoritarios de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos son la resina epóxica y la fibra de vidrio, como se puede observar en el

material más grueso se tiene la mayor cantidad de material orgánico (Figura 3.6), que correspondería en su mayoría a la resina epóxica, mientras que el material más fino tiene la menor cantidad de material orgánico (Figura 3.7). Por consiguiente, el material más fino va a ser el que tenga la mayor cantidad de fibra de vidrio, que no se descompone a la temperatura del ensayo. Esta variación se debe a que, según Zhen et al (2009), en el material con tamaño mayor a 0,105 mm la fibra de vidrio se encuentra atrapada dentro de la resina epóxica, mientras que en el material con tamaño menor 0,105 mm la fibra de vidrio ya está separada de la resina; y debido al diámetro pequeño de la fibra de vidrio (de 5 a 24  $\mu\text{m}$ ) esta se va a encontrar en mayor cantidad en el material más fino obtenido (p.602).

Los diagramas termogravimétricos también nos indican la estabilidad térmica que tiene la muestra, la estabilidad térmica es muy importante tanto para el reciclaje físico como para el reciclaje químico. Para el caso de los residuos utilizados en este proyecto podemos observar que tienen una alta estabilidad térmica ya que los gruesos y finos empiezan a descomponerse a los 291 °C y 269 °C respectivamente, es decir no hay ningún peligro de descomposición en los procesos que se realizan en este estudio, pues la temperatura que se alcanza en la formación del material compuesto por polimetilmetacrilato es entre 60° C y 90 °C mientras que en la formación del material compuesto por resina poliéster se trabaja a temperatura ambiente. Además en la Figura 3.6 y Figura 3.7 se puede observar que se alcanzó la mayor degradación para gruesos y finos a los 346 °C y 351 °C respectivamente. Finalmente se puede observar que la descomposición de la mayoría de la resina epóxica se obtiene a una temperatura para gruesos y finos de 464 °C y 443 °C respectivamente.

**Tabla 3.8.** Resultados del análisis termogravimetría para ambos tamaños de partícula

	Material orgánico (%)		Material inorgánico (%)	
	0,15-0,075 mm	<0,075 mm	0,15-0,075 mm	<0,075 mm
<b>M1</b>	40,61	20,55	59,39	79,45
<b>M2</b>	26,92	20,54	73,08	79,46
<b>M3</b>	30,81	22,56	69,19	77,44
<b>Promedio</b>	<b>32,78</b>	<b>21,22</b>	<b>67,22</b>	<b>78,78</b>

En la Tabla 3.8 se puede observar la cantidad tanto de material orgánico como inorgánico para ambos tamaños de partícula de los tres análisis termogravimétricos realizados. En dicha tabla se puede apreciar que para los tres ensayos existe mayor cantidad de material inorgánico, que corresponde a la fibra de vidrio, en el material con tamaño  $<0,075$  mm.

En la Tabla 3.6 y Tabla 3.7 se observa una pequeña zona de descomposición que empieza aproximadamente en los  $450$  °C y termina en los  $550$  °C. Esta zona, según Hoe et al (2014), se produce debido a la eliminación de los materiales orgánicos en la purga de Nitrógeno. Esta zona también puede ser causada por la descomposición final de la resina epóxica, ya que puede ocurrir una descomposición parcial de la resina en la primera zona y una descomposición completa en la segunda zona.

#### **3.1.2.4. Análisis para la determinación toxicidad de lixiviados (TCLP)**

En la Tabla 3.9 se presentan los resultados obtenidos del análisis de toxicidad de lixiviados tanto para el material con tamaño de partícula  $0,075-0,15$  mm y  $<0,075$  mm.

En la Tabla 3.9 se puede observar que para ambos tamaños de partícula las concentraciones más altas de metales obtenidas en los lixiviados pertenecen al zinc, cobre y plomo. Sin embargo, el único valor que excede los valores máximos permitidos para ensayos de lixiviación según la norma técnica de suelo de la ordenanza metropolitana es la concentración de plomo, cuyo valor máximo permisible es de  $0,2$  mg/L.

Se observó además, que en general para el material con partículas de tamaño  $<0,075$  mm existe una mayor concentración de metales, esto se debe que a menor tamaño los metales se liberan de la matriz polimérica, por lo tanto aumenta su facilidad de lixiviación.

**Tabla 3.9.** Resultados obtenidos del análisis de toxicidad de lixiviados tanto para el material con tamaño de partícula 0,075-0,15 mm y 0,075 mm

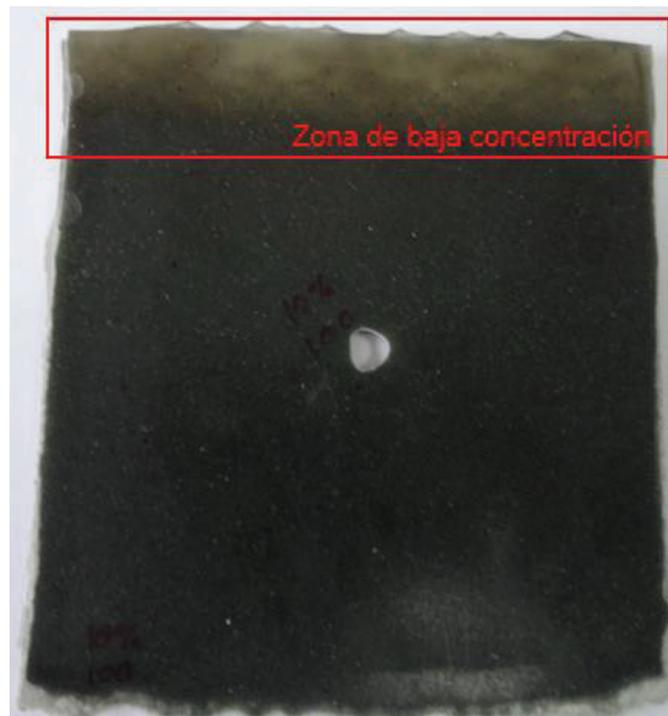
Elemento	Tamaño de partícula	
	0,075-0,15 mm	<0,075 mm
	Concentración (mg/L)	Concentración (mg/L)
<b>Zinc</b>	2,34	3,79
<b>Cobre</b>	20,43	38,22
<b>Plomo</b>	43,01	27,99
<b>Cobalto</b>	0,01	0,01
<b>Plata</b>	0,02	0,03
<b>Níquel</b>	0,07	0,23
<b>Cromo</b>	<0,01	<0,01
<b>Cadmio</b>	<0,01	<0,01
<b>Bario</b>	<0,1	<0,1
<b>Arsénico</b>	<0,1	<0,1
<b>Mercurio</b>	<0,1	<0,1

### **3.2. PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS DE MATERIALES COMPUESTOS POR POLIMETILMETACRILATO Y RESINA POLIÉSTER INSATURADA CON LA PORCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS**

La producción de la mezclas se refiere únicamente a la facilidad o dificultad que se tuvo durante el procesamiento de los materiales compuestos y también se refiere a los diferentes inconvenientes que se originaron en el material obtenido. En esta sección no se analizan resultados cuantitativos, solamente resultados observados durante el proceso de producción de los materiales compuestos.

### 3.2.1. PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS DE MATERIAL COMPUESTO POR POLIMETILMETACRILATO Y LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS

En cuanto a la producción de los materiales compuestos de polimeilmetacrilato los mayores inconvenientes obtenidos fueron cuando se usó el material con tamaño de partícula más grande, es decir el material 0,15-0,075 mm de tamaño. Cuando se utilizó este residuo se observó para las concentraciones de 10% y 15% una mala dispersión, es decir se visualizaba claramente mayor concentración de residuos en la parte más baja de las placas y menor concentración en la parte superior. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de lo mencionado anteriormente.



**Figura 3.8.** Placa obtenida de polimetimetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,15 mm para ensayo de abrasión

Otro inconveniente presentado fue cuando se utilizó el material de 0,15 mm en concentraciones de 15% y 20%. En estas concentraciones se observó que existían zonas donde los residuos se encontraban descubiertos, debido a que en estas

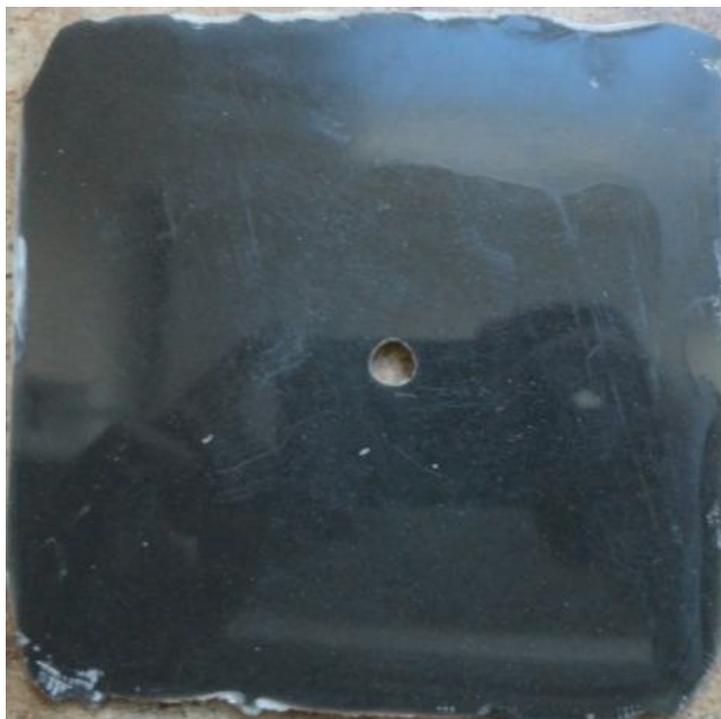
zonas no se produjo una buena mezcla entre la matriz y los residuos. En la siguiente figura se puede observar un ejemplo de lo antes mencionado.



**Figura 3.9.** Placa obtenida de polimetimetacrilato y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm para ensayo de flexión

Una de las razones de este mal mezclado entre en polimetilmetacrilato y los residuos es debido a la alta viscosidad que presentan las mezclas de los materiales con concentración 15% y 20% y tamaño de partícula 0,15 mm, lo cual dificulta colocar dicha mezcla en los moldes. Por esta razón en algunos casos cuando se colocó la mezcla en los moldes puede que aún el prepolímero no estaba formado completamente y por causa de alta volatilidad del monómero metilmetacrilato se evaporó una parte de dicho monómero, dejando así descubiertos los residuos en ciertas zonas. Otra razón por la que se pudo provocar estas fallas es debido a la concentración muy alta de residuos en las zonas descubiertas, ya que la mayoría de defectos se encontraban en la parte inferior de las placas formadas, y como se vio antes para este tamaño de partícula se tiene una mayor concentración de residuos en la parte inferior. Esta alta concentración (en la parte inferior de la placa) pudo provocar que el polimetilmetacrilato no polimerice adecuadamente y después, al colocar el molde, se evapore.

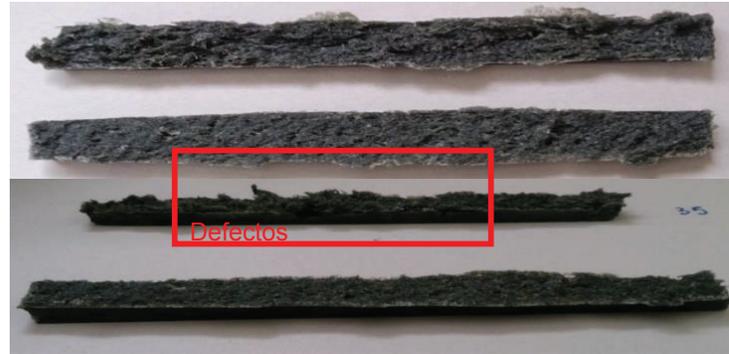
Finalmente en cuanto a los materiales producidos a partir del menor tamaño de partícula (0,075 mm) no se obtuvieron mayores dificultades en el procesamiento, sin embargo, si se obtuvo un incremento de la viscosidad con el incremento de la concentración, pero dicha viscosidad no afectó en el llenado de los moldes ni en las placas obtenidas, un ejemplo de dichas placas utilizando material de 0,075 mm se observa en la siguiente figura.



**Figura 3.10.** Placa obtenida de polimetimetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm para ensayo de abrasión

### **3.2.2. PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS DE MATERIAL COMPUESTO POR RESINA POLIÉSTER INSATURADA Y LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE COMPUTADORAS**

La formación de materiales compuestos con la fracción no metálica con tamaño de partícula 0,15-0,075 mm tuvo complicaciones debido al tamaño de partícula. Para los materiales compuestos de 30% y 35% en peso de la fracción no metálica no se logró una mezcla uniforme, debido a que al aumentar la concentración de la carga aumenta la viscosidad, dificultando el mezclado y la colocación en los moldes para su correspondiente curado. Además, debido a la alta viscosidad de la mezcla, se tuvo que colocar mayor cantidad de la necesaria para llenar los moldes, provocando que las superficies de las placas sean muy irregulares como se puede observar en la Figura 3.11. Estas irregularidades pueden causar fallas puntuales en los diferentes ensayos mecánicos realizados.



**Figura 3.11.** Placas de resina poliéster insaturada y 35% de concentración de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula 0,15 mm

La producción de materiales compuestos con la fracción no metálica con tamaño de partícula de 0,075 mm no tuvo complicaciones. Con este tamaño de partícula de la fracción no metálica y la resina poliéster insaturada se obtuvo una mezcla uniforme la misma que facilitó el curado y colocación de los materiales compuestos en los moldes correspondientes. Se obtuvo mezclas con buen mezclado como se observa en la Figura 3.12.



**Figura 3.12.** Placa de material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos con tamaño de partícula 0,075 mm

### 3.3. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS COMPUESTAS PREPARADAS (EN CONCENTRACIÓN Y TAMAÑO DE PARTÍCULA)

#### 3.3.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

##### 3.3.1.1. Material compuesto por polimetilmetacrilato

En la Tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de tracción realizado al material compuesto por polimetilmetacrilato y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos. Los parámetros analizados fueron: desplazamiento al pico, deformación al pico, carga al pico, esfuerzo al pico y módulo de Young.

En la Tabla 3.10 se pueden observar tanto los promedios como las desviaciones estándar de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato. Los promedios obtenidos serán analizados posteriormente mediante la tendencia que presentan los respectivos gráficos de cada parámetro estudiado. Los datos completos son presentados en el ANEXO IV

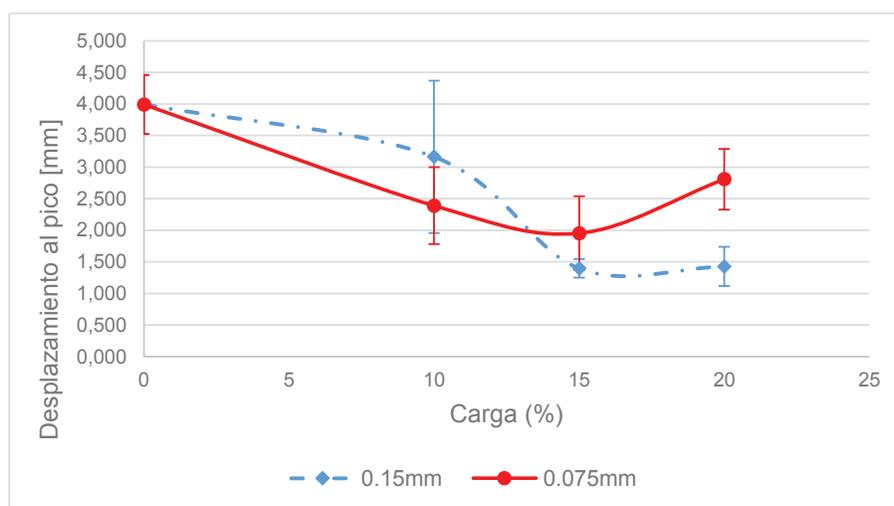
**Tabla 3.10.** Resultados obtenidos en el ensayo de tracción realizado al material compuesto por polimetilmetacrilato y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos

Carga (%)	Tamaño de partícula	Desplazamiento al pico [mm]	Deformación al pico [%]	Carga al pico [kN]	Esfuerzo al pico [MPa]	Módulo de Young [MPa]
Sin carga		3,99 ± 0,47	6,14 ± 0,72	1,47 ± 0,14	38,28 ± 3,57	1 322,00 ± 107,19
10	0,075- 0,15 mm	3,16 ± 1,21	4,87 ± 1,86	1,68 ± 0,16	43,64 ± 4,06	1 596,80 ± 256,98
15		1,40 ± 0,14	3,09 ± 0,80	0,96 ± 0,25	21,49 ± 4,45	1 390,30 ± 133,85
20		1,43 ± 0,31	1,96 ± 0,42	0,69 ± 0,39	12,48 ± 6,28	1 432,94 ± 409,81
10	<0,075 mm	2,39 ± 0,61	3,69 ± 0,91	1,52 ± 0,24	42,71 ± 6,00	1 832,30 ± 114,83
15		1,95 ± 0,58	3,01 ± 0,90	1,16 ± 0,13	33,74 ± 4,69	1 885,70 ± 112,40
20		2,81 ± 0,48	4,32 ± 0,74	1,67 ± 0,16	45,74 ± 3,04	1 891,80 ± 119,35

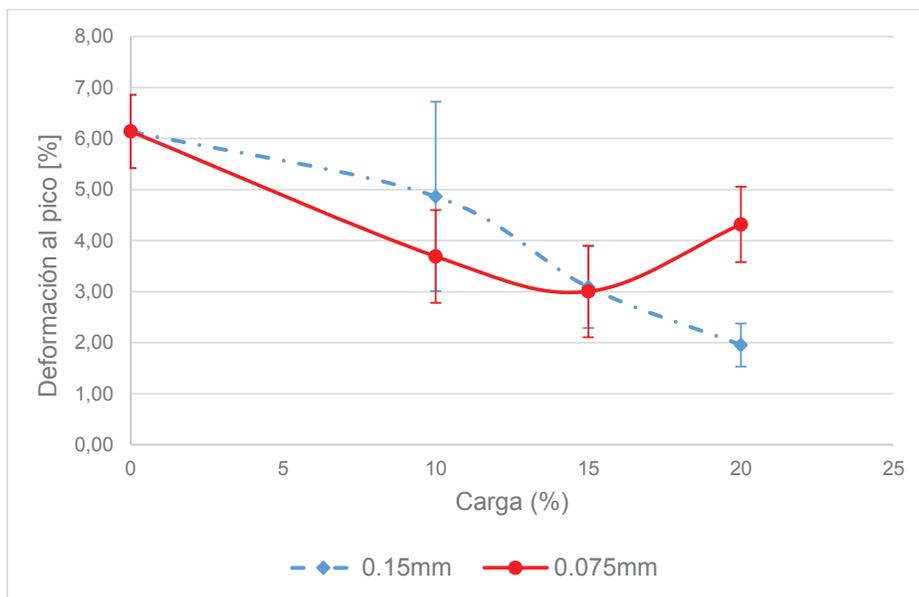
En cuanto a la desviación estándar se puede observar que el material que presenta la menor desviación es el material puro, es decir el material que no contiene residuos, es el que presentó los resultados menos dispersos en todos los

parámetros estudiados. Esto se debe a que al producir el material compuesto la homogeneidad del material se pierde, provocado porque la matriz (polimetilmetacrilato) no tiene la misma afinidad con los diferentes componentes de los residuos incorporados.

El coeficiente de variación se define como el cociente entre la desviación estándar y la media aritmética, este parámetro es el que se va a utilizar para comparar las dispersiones de los resultados obtenidos. Según Tomblin, Yeow y Suresh para materiales compuestos el coeficiente de variación generalmente se encuentra entre 4% y 10%; sin embargo, los resultados obtenidos para los materiales compuestos presentaron coeficiente de variación mayores al 10%, esto se debe principalmente a que los materiales están compuestos por residuos los cuales son muy heterogéneos provocando que la variación de los resultados en las pruebas mecánicas aumente. Los materiales que presentan los coeficientes de variación más altos corresponde a los materiales compuestos por 15% y 20% de residuos de tamaño 0,15-0,075 mm, debido posiblemente a las defectos presentados durante la producción de los materiales compuestos. Los materiales compuestos producidos con residuos de tamaño <0,075 mm presentan coeficientes de variación cercanos al 10%, con un máximo de 15%, por lo cual se puede decir que los resultados de estos materiales se encuentran en un rango aceptable de dispersión.



**Figura 3.13.** Resultados del desplazamiento al pico obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato



**Figura 3.14.** Resultados de la deformación al pico obtenida en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato

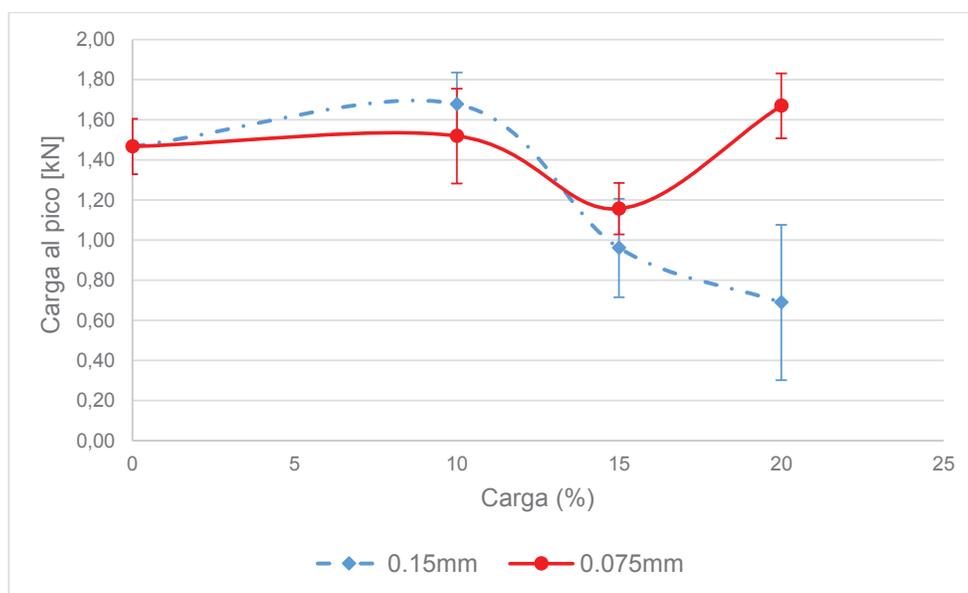
En la Figura 3.13 y Figura 3.14 se puede observar claramente una disminución del desplazamiento al pico y la deformación al pico del material compuestos con relación al material puro. Pese a que existe un error en todos los datos de dichos parámetros debido al pequeño desplazamiento de las pacas con referencia a las mordazas en el inicio de ensayo, se puede observar una disminución considerable de la capacidad que tiene el material compuesto de extenderse hasta su fractura.

Esta disminución de la deformación al pico se debe principalmente a que la fibra de vidrio, mayor componente el los residuos de tamaño menor 0,075 mm, tiene una menor deformación al pico hasta la rotura que el polimetilmetacrilato.

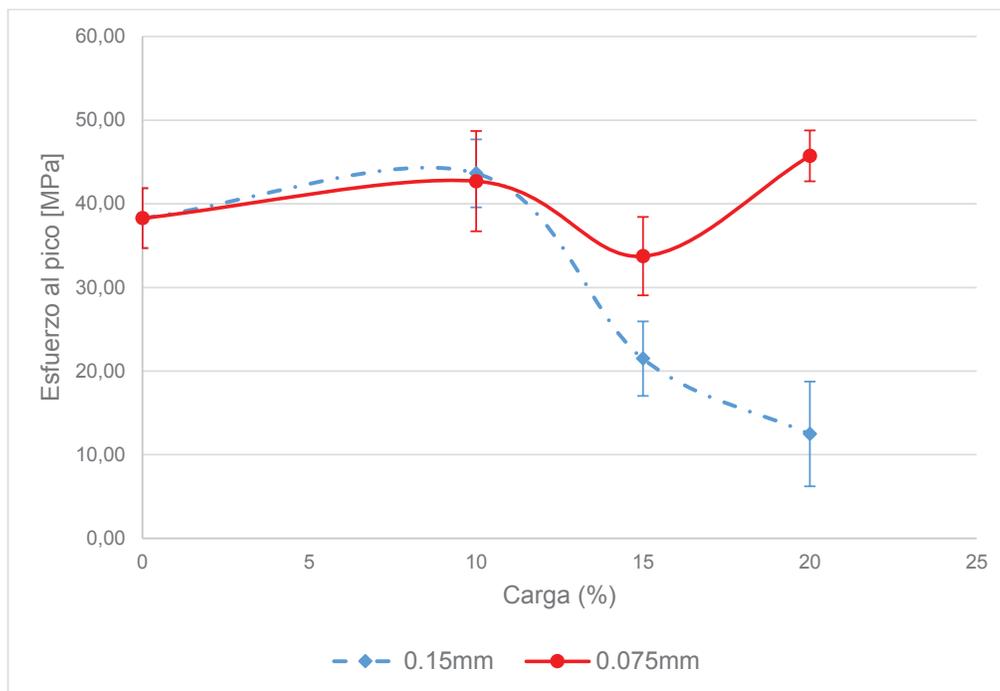
En la Figura 3.14 se puede observar que el material compuesto que presentó el mayor valor en cuanto a la deformación al pico hasta la rotura fue el material que contenía 10% de residuos de tamaño 0,15-0,075 mm, con el cual se obtiene una reducción del 20,76% de la deformación al pico con referencia al material puro. Sin embargo, este material es el que presenta la mayor desviación estándar debido a su dispersión.

Cuando se usa el residuo con tamaño 0,15-0,075 mm se observa que mientras aumenta la concentración de residuo disminuye el porcentaje de deformación al pico. Cuando se utilizó el material con tamaño <0,075 mm se puede observar en la Figura 3.14 que con 20% de concentración se obtuvo mayor valor de deformación al pico, el material con esta concentración tiene un 29,67% de disminución de la deformación al pico con relación al material puro, y además para esta concentración se obtuvo una baja desviación estándar lo que indica que todos los resultados obtenidos se encuentran cercanos al promedio.

En la Figura 3.15 y Figura 3.16 se puede apreciar un incremento en la carga al pico y esfuerzo al pico soportado por el material compuesto, cuando tiene un 10% de residuos para ambos tamaños de partícula estudiados y cuando tiene un 20% de residuos de tamaño <0,075 mm, con relación al material puro. Para las demás concentraciones se observa que disminuye tanto la carga como el esfuerzo al pico.

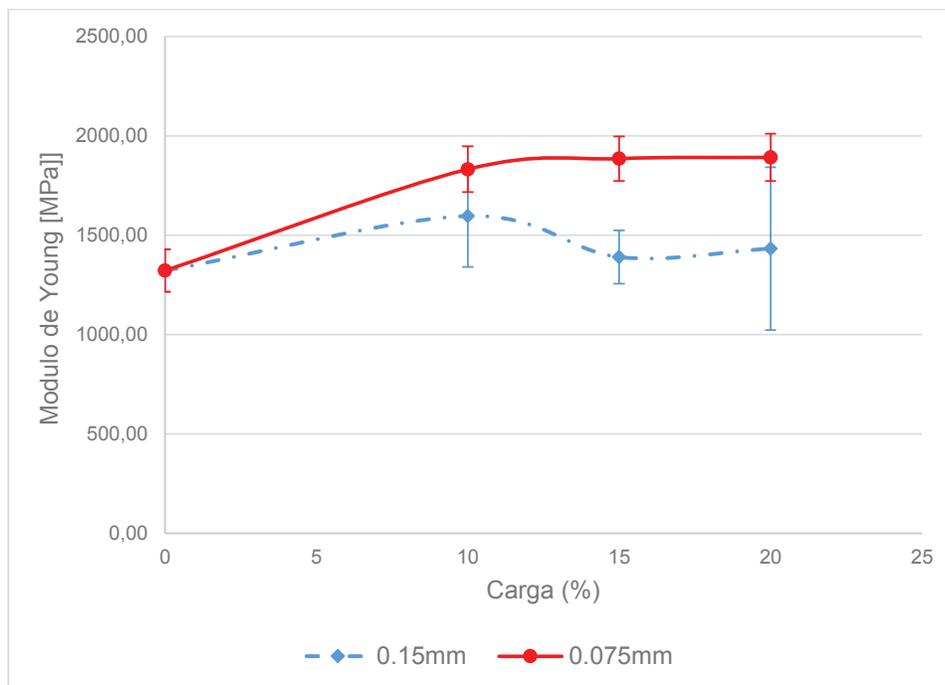


**Figura 3.15.** Resultados de la carga al pico obtenida en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato



**Figura 3.16.** Resultados de esfuerzo al pico obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato

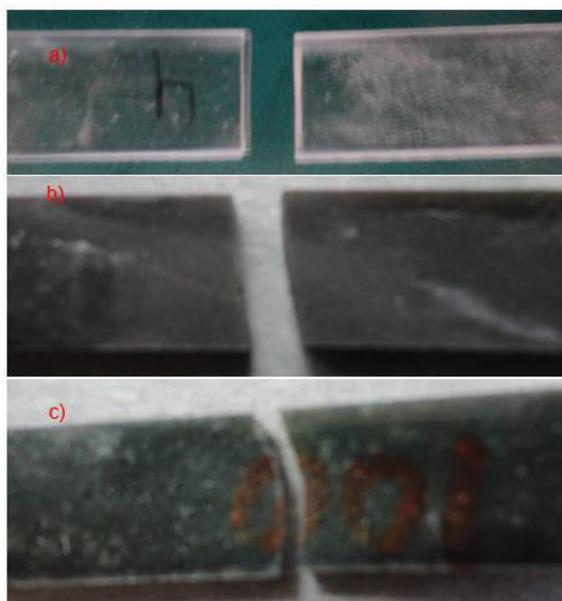
En general se puede observar que con el tamaño de partícula menor a 0,075 mm se obtiene mejores resultados en cuanto al esfuerzo, principalmente debido a los problemas encontrados en la formación de los materiales compuestos con tamaño de partícula 0,15-0,075 mm. En un estudio realizado por Zheng et al. (2009), cuando se utiliza un residuos con tamaño menor a 0,105 mm, la fibra de vidrio se encuentra liberada de la resina. Además, como se indicará posteriormente mediante microscopía electrónica de barrido se pudo observar la presencia de estas fibras de vidrio. La forma de estas fibras ofrece un área de contacto entre los residuos y la matriz, que beneficia la transferencia del esfuerzo de tracción desde la matriz hacia las fibras que lo refuerzan (p. 603). El material que presenta mejor comportamiento en cuanto al esfuerzo es el material que contiene 20% de residuos con tamaño de partícula <0,075 mm, el cual presente un aumento del 13,86% y 19,48% en su carga al pico y esfuerzo al pico respectivamente.



**Figura 3.17.** Resultados de módulo de Young obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato

En la Figura 3.17 se puede observar que el módulo de Young aumenta en todos los casos con relación al material puro. Esto se produce porque igualmente en todos los casos se observó una disminución de la deformación al pico con respecto al material puro, y el módulo de Young es inversamente proporcional a la deformación al pico máxima. El material formado con partículas de tamaño  $<0,075$  mm es el que tiene los valores más altos de módulo de Young debido principalmente a la buena adhesión interfacial que presentan los residuos con la matriz polimetilmetacrilato. Además se observó que los materiales formados con residuos de tamaño  $0,075$  mm presentan los más altos valores en cuanto al esfuerzo al pico. Es por eso que estos mismos compuestos presentan los más altos módulos de Young ya que el módulo es directamente proporcional al esfuerzo al pico e inversamente proporcional con respecto a la deformación al pico.

En la Figura 3.18 se presentan las fracturas formadas en los ensayos de tracción realizados a los materiales compuestos de polimetilmetacrilato.



**Figura 3.18.** Resultados de las fracturas de las placas en ensayos de tracción. a) material puro, b) material compuesto con residuos de tamaño  $<0,075\text{ mm}$ , c) material compuesto con residuos de tamaño  $0,15-0,075\text{ mm}$

En la Figura 3.18a se observa que la fractura en el material puro fue casi una línea recta vertical debido a la homogeneidad del material puro. En la Figura 3.18b se observa que el material con residuos de tamaño  $<0,075\text{ mm}$  tuvo una fractura casi en forma de una recta, lo mismo se observó para todos los materiales compuestos con este tamaño de partícula. Finalmente se observó que los materiales formados con tamaño de partícula  $0,075-0,15\text{ mm}$  tiene una fractura no uniforme (Figura 3.18c) debido a que este tamaño de residuos generan mayores puntos de fractura por su mala compatibilidad con el residuos a diferencia de los residuos más pequeños. La misma forma de fractura se observó en las pruebas de flexión para los materiales compuestos de polimetilmetacrilato.

Además en ninguno de los casos se observó un alargamiento de las probetas después del ensayo debido a que el polimetilmetacrilato es completamente rígido y al incorporar los residuos no pierde su rigidez. En los ensayos de flexión tampoco se observó un alargamiento considerable del material.

En el ANEXO V se presenta los resultados del análisis ANOVA realizados para todos los parámetros estudiados en el ensayo de tracción. Se puede apreciar que para el desplazamiento al pico, deformación al pico, carga al pico y esfuerzo al pico, tanto el tamaño de partícula como la concentración son factores estadísticamente significativos, lo cual quiere decir que los resultados obtenidos son muy dependientes de los dos factores antes mencionados. Para el módulo de Young el análisis ANOVA indica que el factor concentración no tiene significancia estadística. Esto se refleja en la Figura 3.17, ya que se puede observar que el módulo de Young permanece casi constante mientras varía la concentración, pero si se puede observar una diferencia entre el tamaño 0,15 mm y 0,075 mm ya que el tamaño de partícula si es un factor estadísticamente significativo.

Se seleccionó al material compuesto producido con 20% de residuos de tamaño <0,075 mm para el diseño de la planta, ya que este es el material que presentó el mayor valor en cuanto a esfuerzo y módulo de elasticidad. Los materiales formados con residuos de tamaño 0,15-0,075 mm no fueron seleccionados debido a la dificultad de procesamiento y las fallas antes mencionada. El material formado con 10% de residuos de tamaño <0,075 mm, pese a tener buenas propiedades, no fue seleccionado ya que en el presente proyecto se intenta obtener el mayor ahorro posible de material base (polimetilmetacrilato), que sea reemplazado por los residuos de las tarjetas de circuitos impresos.

En el ANEXO VI se presentan las propiedades mecánicas de domos comercializados, estos domos son fabricados con base de polimetilmetacrilato reforzados con fibra de vidrio. Si se comparan las propiedades de los domos comercializados con el material seleccionado para el diseño de la planta (20% con tamaño de partícula menor a 0,075 mm) se aprecia una clara disminución en cuanto a propiedades de tracción. Se observa que la deformación al pico, esfuerzo y Modulo de Young presentan un 4,03%, 18,62% y 23,1% de disminución respectivamente en cuanto al material comercializado. Esta disminución se debe a que el material comercializado es reforzado mediante fibra de vidrio pura, dando mejores propiedades que al incorporar los residuos de las tarjetas de circuito impreso. Sin embargo, pese a la disminución en las propiedades el material

compuesto formado con los residuos, sí es factible de comercialización, ya que en ciertos lugares se comercializan domos únicamente de polimetilmetacrilato, y como se observó anteriormente el material compuesto seleccionado presenta mejores propiedades que el polimetilmetacrilato puro.

### 3.3.1.2. Material compuesto por Resina poliéster insaturada

En la Tabla 3.11 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de tracción realizado al material compuesto por resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos. Los parámetros analizados fueron: desplazamiento al pico, deformación al pico, carga al pico, esfuerzo al pico y módulo de Young.

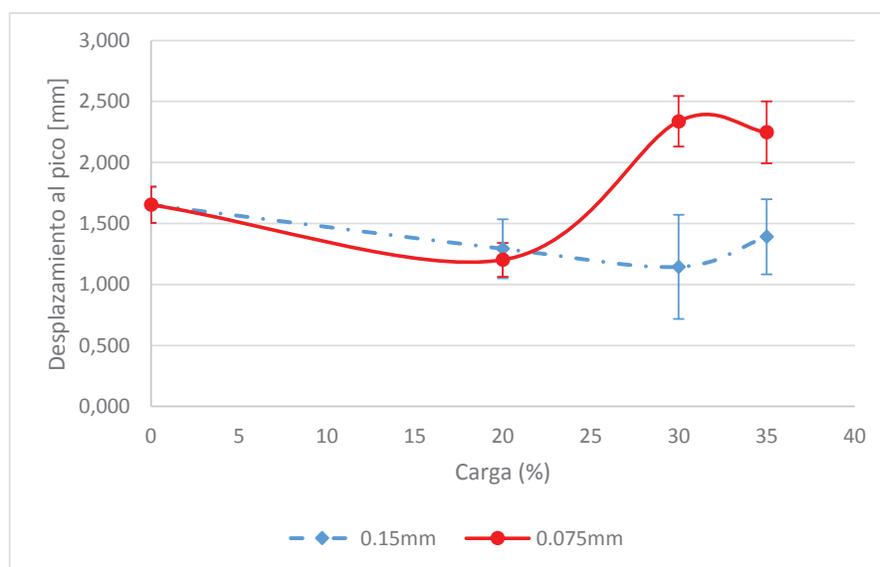
En la Tabla 3.11 se observan tanto los promedios como las desviaciones estándar de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada. Los promedios obtenidos serán analizados posteriormente mediante la tendencia que presentan los respectivos gráficos de cada parámetro estudiado. En la Tabla 3.11 se muestran solo los promedios de los resultados obtenidos, los datos completos son presentados en el ANEXO IV.

**Tabla 3.11.** Resultados obtenidos en el ensayo de tracción realizado al material compuesto por resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos

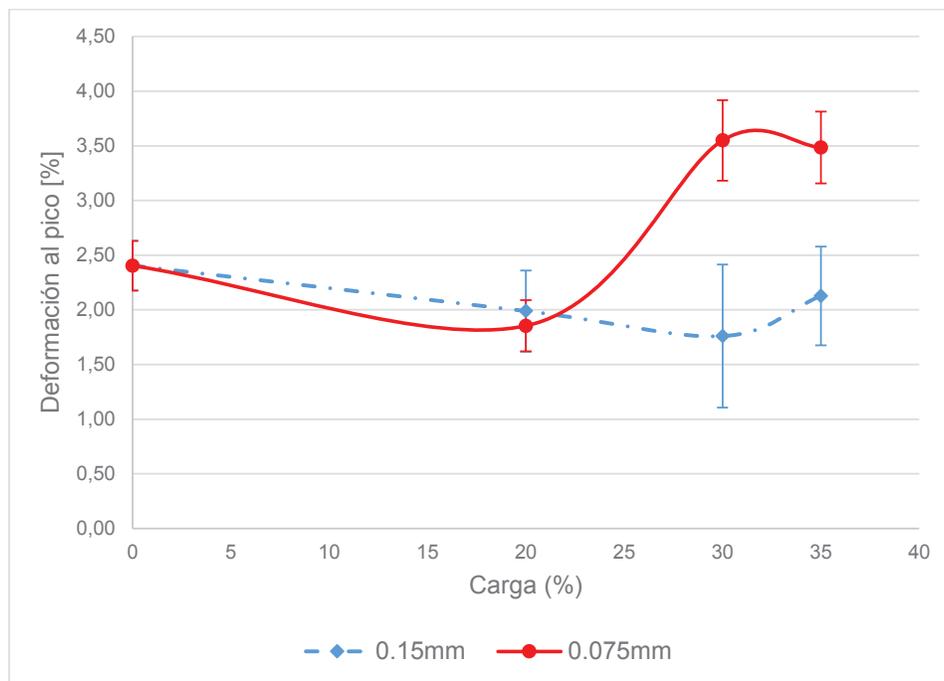
Carga (%)	Tamaño de partícula	Desplazamiento al pico [mm]	Deformación al pico [%]	Carga al pico [kN]	Esfuerzo al pico [MPa]	Módulo de Young [MPa]
Sin carga		1,65 ± 0,15	2,41 ± 0,23	0,84 ± 0,07	21,64 ± 1,72	1 141,12 ± 105,92
20	0,15 mm	1,29 ± 0,24	1,99 ± 0,37	0,50 ± 0,11	9,26 ± 1,70	957,97 ± 177,48
30		1,14 ± 0,43	1,76 ± 0,65	0,66 ± 0,21	15,72 ± 6,01	1 545,8 ± 270,88
35		1,39 ± 0,31	2,13 ± 0,45	0,48 ± 0,14	6,58 ± 2,78	522,32 ± 233,23
20	0,075 mm	1,20 ± 0,14	1,73 ± 0,26	0,51 ± 0,08	13,02 ± 1,85	1 286,6 ± 201,29
30		2,33 ± 0,21	3,55 ± 0,37	0,78 ± 0,09	17,60 ± 2,10	1 155,23 ± 116,67
35		2,24 ± 0,25	3,49 ± 0,33	0,77 ± 0,09	17,36 ± 1,97	1 133,70 ± 119,63

La desviación estándar obtenida de los parámetros analizados para el material puro de resina poliéster insaturada es menor en comparación con los materiales compuestos, debido a que los residuos provocan la heterogeneidad de los materiales compuestos. Los resultados del material puro presentan un coeficiente de variación menor a 10% el cual se encuentra en un rango aceptable; sin embargo, los materiales compuestos por residuos de tamaño  $<0,075$  mm presentan un coeficiente de variación mayor al 10% pero menor al 15%, por lo cual se puede considerar como aceptable tomando en cuenta que los residuos incorporados son muy heterogéneos. Los materiales compuestos con residuos de tamaños  $0,15-0,075$  mm presentan coeficientes de variación mayores al 15% que incluso superan el 30% lo cual indica una dispersión de los resultados que no puede ser considerada como aceptable. Estos valores altos en la desviación estándar se ocasionan por las fallas producidas en la formación de las placas para el ensayo, las cuales se indican en la sección 3.2.2

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos para cada parámetro analizado en el ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos.



**Figura 3.19.** Resultados de desplazamiento al pico obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada

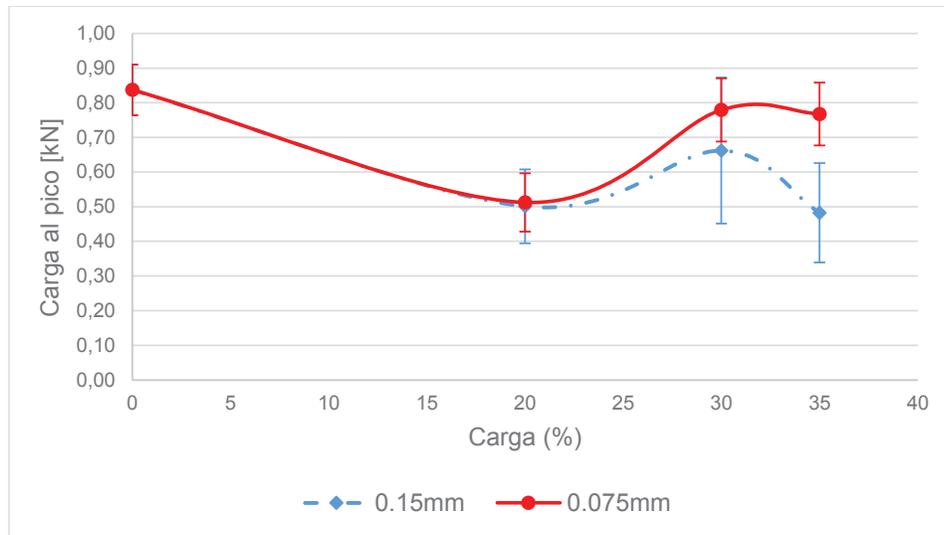


**Figura 3.20.** Resultados de deformación al pico obtenida en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada

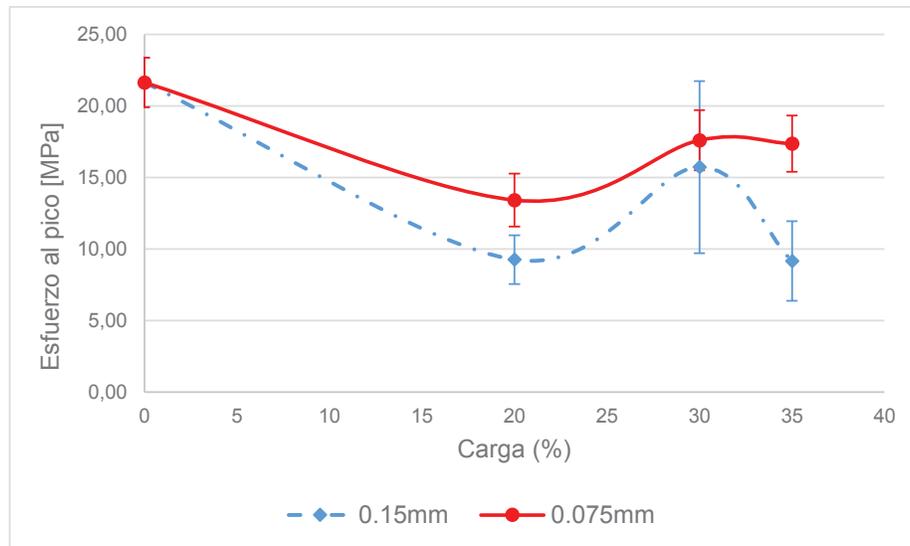
En las Figura 3.19 y Figura 3.20 se puede observar una disminución del desplazamiento al pico y deformación al pico del material compuesto con tamaño de partícula 0,15-0,075 mm en relación al material puro. Se observa que mientras aumenta la concentración disminuye el porcentaje de deformación al pico. Para el material compuesto con tamaño de partícula  $<0,075$  mm, además un aumento tanto del desplazamiento al pico como de la deformación al pico para el material con 30% y 35% de carga. Esta variación tanto en el desplazamiento como en la deformación es debido a que existe cierto error sistemático en los datos debido al equipo, que además que las probetas presentaban una superficie lisa que provocaba que resbalen al momento del ensayo pese a utilizar accesorios que eviten esta falla.

La disminución de la deformación al pico en los materiales compuestos se debe a presencia de fibra de vidrio, uno de los componentes principales y mayoritarios de la fracción no metálica utilizada, ya que el material compuesto posiblemente se va a fragmentar cuando se rompa la fibra de vidrio, terminando de esta manera el

ensayo. Lo cual disminuye la capacidad de los materiales compuestos de estirarse hasta su fractura.



**Figura 3.21.** Resultados de la carga al pico obtenida en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada



**Figura 3.22.** Resultados de esfuerzo al pico obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada

En la Figura 3.21 y Figura 3.22 se puede observar una disminución en la carga al pico y esfuerzo al pico soportado por el material compuesto para los dos tamaños de partícula analizados en relación al material puro. Esto se debe a que en

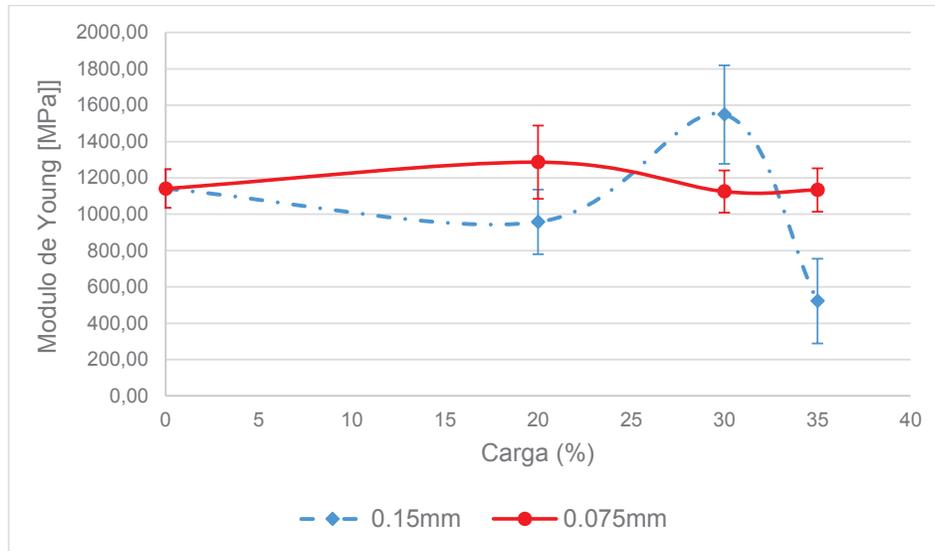
microscopia electrónica de barrido, que se mostrará posteriormente, se observó que existen agujeros microscópicos, las cuales no son visibles durante la formación de estos materiales, provocando una disminución de la resistencia del material por dichos defectos.

En la Figura 3.22 se puede observar que el material compuesto con tamaño de partícula  $<0,075$  mm presenta el mayor valor de esfuerzo. De acuerdo a estudios realizados cuando se utiliza residuos con tamaño menor a  $0,105$  mm, la fibra de vidrio se encuentra liberada incrementando el área de contacto entre los residuos y la matriz, lo cual beneficia la transferencia del esfuerzo de tracción desde la matriz hacia las partículas que lo refuerzan. Además existe un óptimo (20% de carga y tamaño  $<0,07$  mm) porcentaje de residuos añadidos a la matriz para incrementar el esfuerzo del material ya que como se observa éste aumenta y luego disminuye. (Zheng et al, 2009, p. 603).

Los materiales que presentan valores mayores de esfuerzo son los que contienen 30% y 35% de residuos con tamaño de partícula  $<0,075$  mm, ya que presentan valores similares. El material compuesto con 30% de residuos presenta un porcentaje de 18,66% de disminución de esfuerzo al pico y el material compuesto con 35% presenta un porcentaje de 19,77% de disminución de esfuerzo al pico en comparación con el material puro.

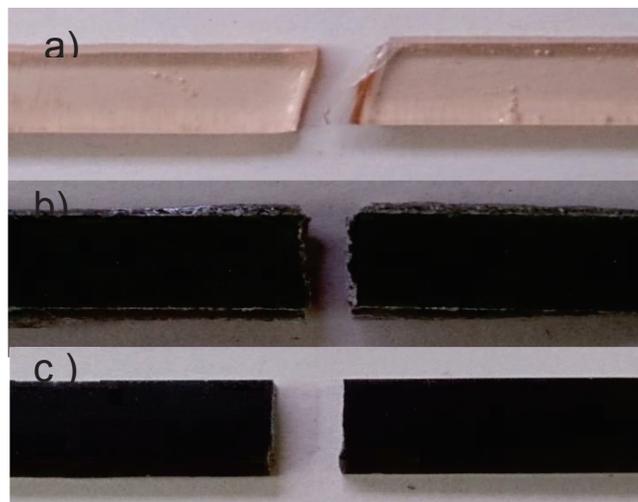
Los materiales compuestos con tamaño de partícula  $0,15-0,075$  mm presentan valores menores de esfuerzo en comparación con el material puro, lo cual se debe a las dificultades presentadas durante la formación de estos materiales.

En la Figura 3.23 se puede observar que el módulo de Young aumenta en los materiales compuestos que presentaron menores valores de deformación al pico lo cual se debe a que estos dos parámetros son inversamente proporcionales. Como se observó el esfuerzo de los materiales compuestos disminuye en todos los casos en comparación con el material puro por lo cual el módulo de Young también disminuye para estos mismos materiales compuestos, esto debido a la relación directamente proporcional que existe entre estos dos parámetros.



**Figura 3.23.** Resultados del módulo de Young obtenido en ensayos de tracción en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada

En la Figura 3.24 se presentan las imágenes de las fracturas de las probetas del material compuesto formadas durante el ensayo de tracción.



**Figura 3.24.** Resultados de las fracturas de las placas en ensayos de tracción. a) material puro, b) material compuesto con residuos de tamaño 0,15-0,075 mm, c) material compuesto con residuos de tamaño <0,075 mm

En la Figura 3.24a se observa que la fractura en el material puro la cual fue irregular debido a la rigidez del material. En la Figura 3.24b se aprecia que el material con residuos de tamaño 0,075-0,15 mm tubo una fractura también irregular, lo cual se

debe a que durante su formación no se logra una mezcla uniforme debido a que existe una adhesión interfacial débil entre la carga y la matriz de resina poliéster insaturada. Finalmente en la Figura 3.24c se visualiza que los materiales formados con tamaño de partícula  $<0,075$  mm tiene una fractura casi lineal, esto se presentó en todos los materiales compuestos con este tamaño de partícula. El mismo comportamiento de ruptura se evidenció en los ensayos de flexión.

Se realizó un análisis ANOVA cuyos resultados se los presenta en el ANEXO V para todos los parámetros analizados en el ensayo de tracción como desplazamiento al pico, deformación al pico, carga al pico, esfuerzo al pico y módulo Young se tuvo como resultado tanto para la concentración como para el tamaño de partícula que son factores estadísticamente significativos, lo cual indica que todos los parámetros analizados son dependientes de estos factores.

Los materiales compuestos que presentaron valores mayores de esfuerzo y módulo de Young fueron los materiales compuestos con 30% y 35% de residuos y tamaño de partícula  $<0,075$  mm. Los materiales formados con residuos con tamaño de partícula de 0,15-0,075 mm no fueron seleccionados debido a la dificultad durante su formación. Se seleccionó al material compuesto formado con 35% de residuos para el diseño de la planta debido a que uno de los objetivos de este proyecto es el reutilizar la mayor cantidad de fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos, además que se disminuye el uso de la resina poliéster y se reducen costos de producción de baldosas.

En el ANEXO VI se presentan las propiedades mecánicas que deben presentar las baldosas para ser comercializadas con base en la norma UNE 127020 para baldosas de uso interior. Para este tipo de baldosas se estable que la carga al pico de tracción debe ser mayor a 25 MPa, en comparación con nuestro material compuesto obtenido se tiene una disminución de este parámetro de 30,56%. Pese a esta disminución en el esfuerzo de tracción del material compuesto obtenido si es factible su comercialización ya que es un producto nuevo en el mercado ecuatoriano que se realiza con residuos de tarjetas de circuitos impresos de computadoras.

### 3.3.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

#### 3.3.2.1. Material compuesto por polimetilmetacrilato

En la Tabla 3.12 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de flexión realizado al material compuesto por polimetilmetacrilato y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos. Los parámetros analizados fueron: desplazamiento al pico, deformación al pico, carga al pico, esfuerzo al pico y módulo de flexión.

**Tabla 3.12.** Resultados obtenidos en el ensayo de flexión realizado al material compuesto por polimetilmetacrilato y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos

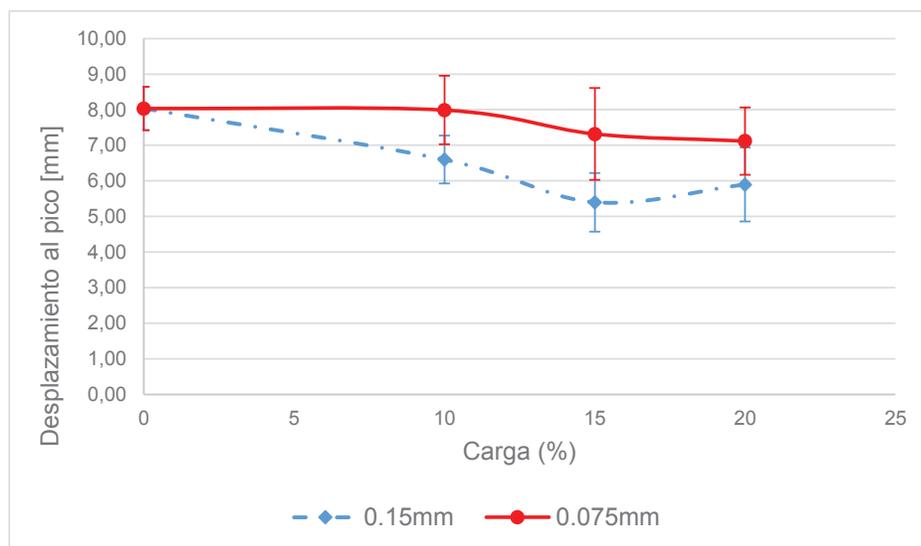
Porcentaje de carga (%)	Tamaño de partícula	Desplazamiento al pico [mm]	Deformación al pico [%]	Carga al pico [kN]	Esfuerzo al pico [MPa]	Módulo [MPa]
Sin carga		8,03 ± 0,61	6,31 ± 0,004	0,10 ± 0,010	61,28 ± 5,68	1 123,00 ± 84,32
10	0,15 mm	6,60 ± 0,67	5,09 ± 0,005	0,12 ± 0,009	69,17 ± 8,61	1 436,20 ± 162,50
15		5,40 ± 0,82	4,15 ± 0,006	0,10 ± 0,017	59,31 ± 13,26	1 500,00 ± 169,06
20		5,89 ± 1,04	4,73 ± 0,010	0,10 ± 0,028	60,25 ± 13,43	1 322,49 ± 269,43
10	0,075 mm	7,99 ± 0,96	6,00 ± 0,007	0,10 ± 0,011	70,87 ± 6,35	1 333,70 ± 103,23
15		7,32 ± 1,29	5,41 ± 0,007	0,09 ± 0,010	67,43 ± 6,62	1 492,00 ± 185,82
20		7,12 ± 0,95	5,49 ± 0,008	0,13 ± 0,008	77,90 ± 5,55	1 594,90 ± 229,08

En la Tabla 3.12 se pueden observar tanto los promedios como las desviaciones estándar de los parámetros obtenidos en los ensayos de flexión realizados a los materiales compuestos. Los promedios serán posteriormente analizados mediante la tendencia que presentan en sus respectivos gráficos. En cuanto a la desviación estándar se puede apreciar que se obtuvieron las mismas tendencias que con los resultados de tracción, es decir, el material puro es el que presenta las menores desviaciones estándar debido a la homogeneidad del material. Sin embargo, se puede visualizar que para los parámetros carga al pico y esfuerzo al pico del material compuesto formado con 20% de residuos de tamaño <0,075 mm se obtienen valores de desviación estándar menor que las del material puro. Esto es positivo ya que demuestra que los resultados para este material (que fue el seleccionado para el diseño de la planta) no son muy dispersos y en la mayoría se

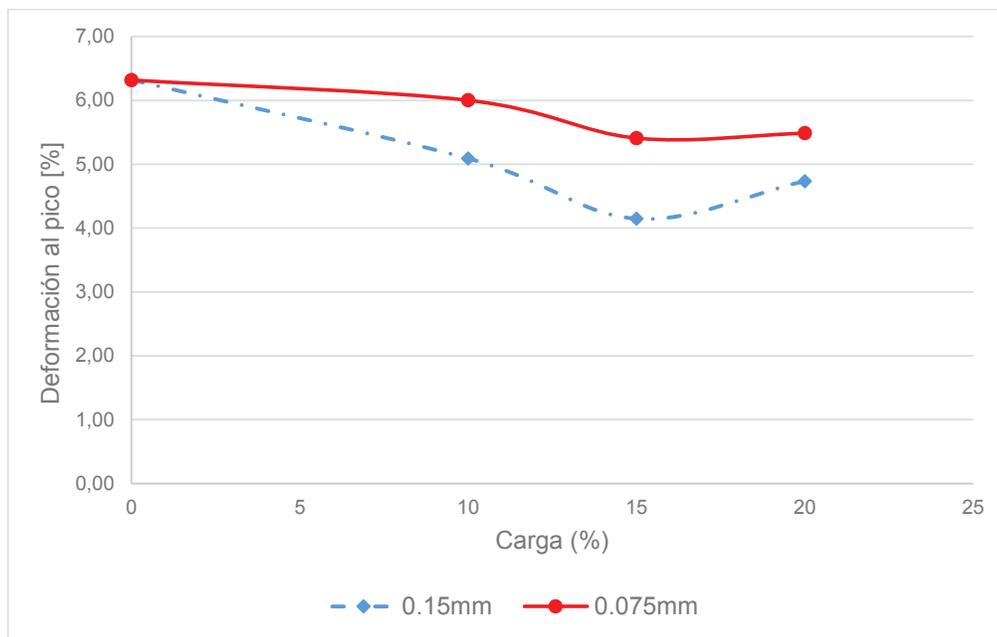
obtendrán buenas propiedades. Los resultados completos de los ensayos de flexión se muestran en el ANEXO IV

Al igual que en los resultados de tracción, la desviación estándar para los resultados de flexión se encuentra en un rango aceptable, a excepción de los materiales compuestos por 15% y 20% con residuos de tamaño 0,15-0,075 mm causado por los inconvenientes presentados en la formulación de los materiales. A diferencia de los resultados de tracción, en los resultados de flexión no se observan valores de desviación estándar tan altos para desplazamiento al pico y deformación al pico, debido principalmente a que no existe el problema de desplazamiento de las placas ya que no se utilizan mordazas par este tipo de ensayos.

En la Figura 3.25 y Figura 3.26 se puede observar que tanto el desplazamiento al pico como la deformación al pico disminuyen con referencia al material puro, al igual que lo sucedido en los ensayos de tracción, pero en el caso de la flexión esta disminución es pequeña. Por ejemplo para el material con residuos de tamaño <0,075 mm y concentración 10% y 20% se obtiene una reducción de la deformación al pico del 5,02% y 13,18% respectivamente.



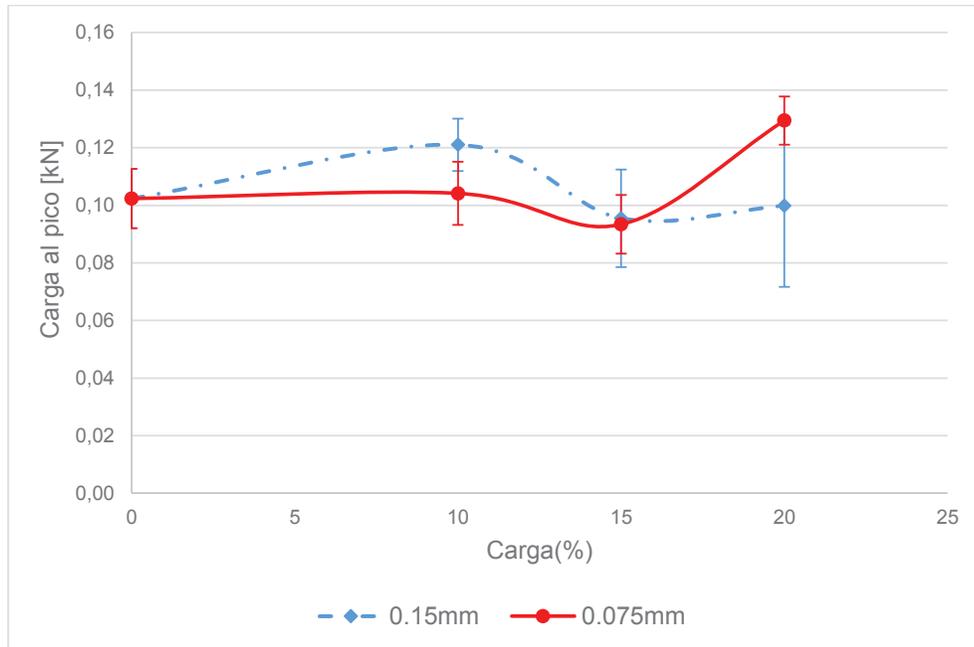
**Figura 3.25.** Resultados del desplazamiento al pico obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato



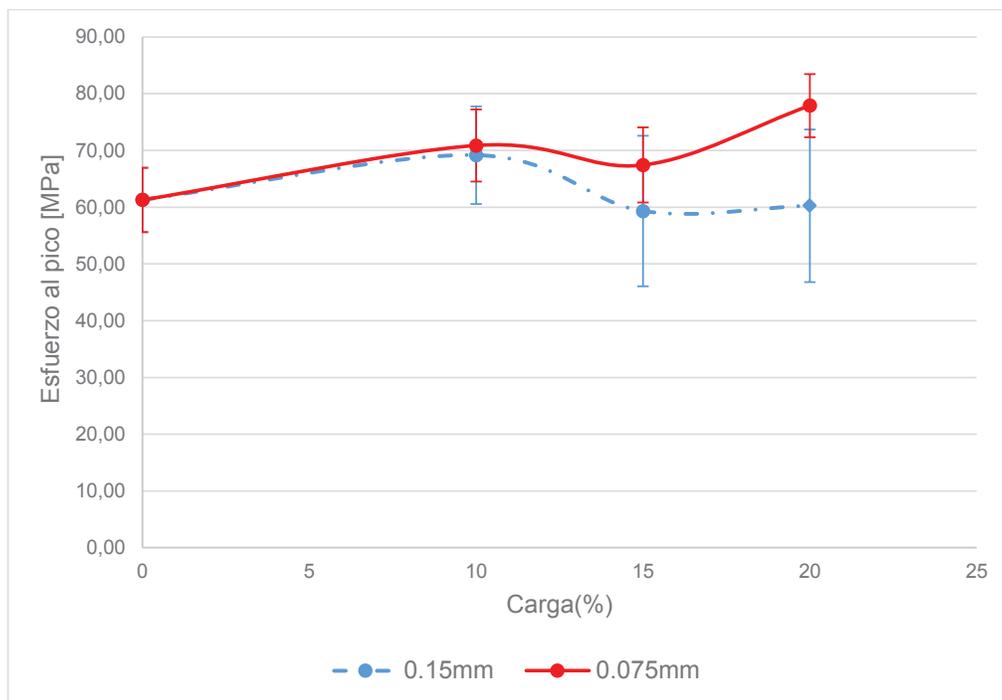
**Figura 3.26.** Resultados de deformación al pico obtenida en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato

En la Figura 3.26 se observa que la deformación al pico en los materiales formados con material de tamaño 0,15-0,075 mm es menor que para los materiales formados con tamaño <0,075 mm. Según Duan et al. (2013), esto se debe a que los residuos gruesos presentan aglomeraciones de resina-fibra, estas aglomeraciones impiden una buena adhesión entre la matriz y los residuos provocando fallas tempranas al realizar el ensayo de flexión, provocando valores bajos en la deformación al pico cuando se utilizan los residuos de mayor tamaño (p. 535).

En la Figura 3.27 y Figura 3.28 se observa en general un incremento de la carga al pico soportada y del esfuerzo al pico de los materiales compuestos con referencia al material puro. En cuanto al esfuerzo al pico se aprecia que para las concentraciones 15% y 20% con residuos de tamaño 0,15-0,075 mm, el esfuerzo disminuye con relación al material puro, esto se debe a las fallas ocasionadas en la formación de las placas ya descritas anteriormente.



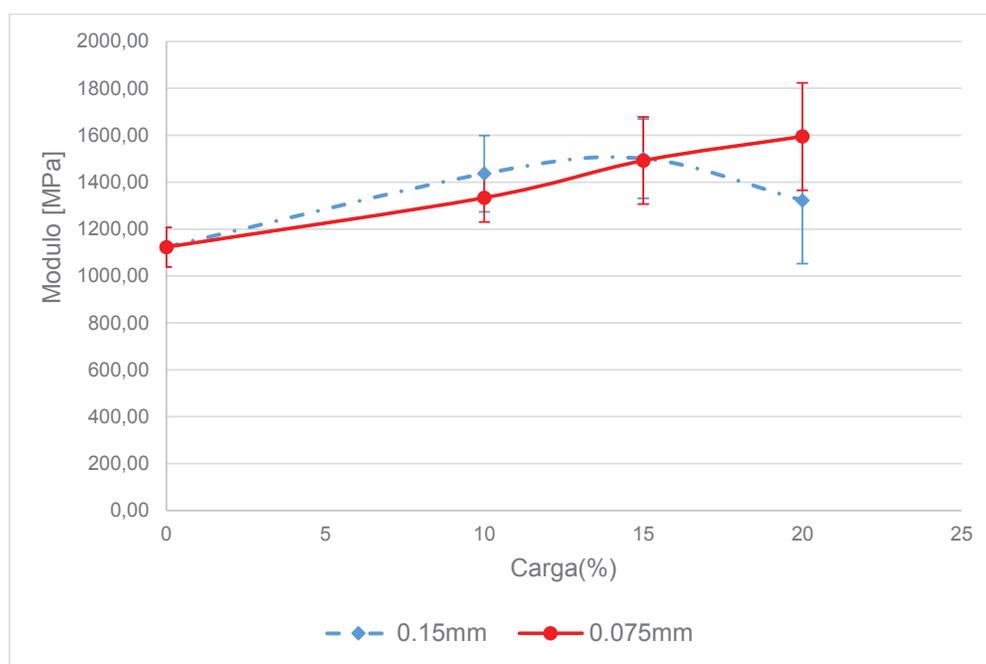
**Figura 3.27.** Resultados de carga al pico obtenida en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato



**Figura 3.28.** Resultados de esfuerzo al pico obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato

El material que presenta el mayor esfuerzo al pico es el material formado con 20% de residuos de tamaño de partícula  $<0,075$  mm, el cual presenta un incremento del 26,47% y un 27,11% en carga al pico y esfuerzo al pico respectivamente. Este incremento se debe, al igual que en la tracción, a la transferencia del esfuerzo desde la matriz hacia las partículas que le refuerzan.

Estos incrementos, tanto en carga al pico como en esfuerzo al pico, son mayores que los obtenidos en los ensayos de tracción, por lo tanto en los ensayos de flexión los residuos incorporados (especialmente la fibra de vidrio) tienen un mayor efecto en sus propiedades que en la tracción.



**Figura 3.29.** Resultados del módulo de flexión obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de polimetilmetacrilato

En la Figura 3.29 se observa que los módulos obtenidos para todos los materiales compuestos son mayores que los obtenidos para el material puro. Además se aprecia que para el material formado con residuos de tamaño  $<0,075$  mm, el módulo de flexión aumenta conforme la concentración aumenta. En cambio, para los materiales formados con material de tamaño 0,15-0,075 mm el módulo

prácticamente no varía entre 10% y 15%, pero para 20% se observa una notable disminución debido a sus fallas en la formación de las placas.

Este incremento del módulo del material compuesto con respecto al material puro es ocasionado principalmente por la disminución en la deformación al pico de los materiales, y también en ciertos casos del aumento del esfuerzo al pico. Esto nos indica que cuando se incorpora en el polimetilmetacrilato los residuos, el material compuesto se hace más rígido.

En el ANEXO V se puede observar los resultados obtenidos del análisis ANOVA, en cual se muestra que tanto el factor concentración como tamaño de partícula son estadísticamente significativos para todos los parámetros estudiados excepto para el módulo de flexión para el cual ni el tamaño de partícula ni la concentración son estadísticamente significativas. Debido a esto el módulo de flexibilidad no puede definir cuál es material seleccionado para el diseño de la planta, ya que estadísticamente este módulo no depende de la concentración ni del tamaño de partícula que utilicemos para formar nuestro material compuesto.

Al igual que en los ensayos de tracción el material seleccionado fue el que está reforzado con 20% de residuos de tamaño  $<0,075$  mm debido a que presenta el valor más alto de esfuerzo, pese a que no tiene la deformación al pico mayor. Este parámetro no es el más importante cuando se desea reforzar un material. El módulo de flexión no fue considerado para la selección del material para el diseño de la planta debido a los resultados obtenidos en el análisis ANOVA.

En el ANEXO VI se muestran las propiedades de flexión de domos comercializados, y al igual que en las propiedades de tracción se observa que el material reforzado con 20% de residuos de tarjetas de circuitos impresos de tamaño  $<0,075$  mm presenta menores valores en las propiedades de flexión. En esfuerzo al pico y módulo de elasticidad presenta una reducción del 7,2% y 42% respectivamente. La diferencia en cuanto a esfuerzo es muy pequeña, sin embargo, la diferencia de módulos de elasticidad si es considerable. Esto no quiere decir que el material obtenido en el presente proyecto no se lo pueda utilizar como domos, al contrario,

al tener un menor módulo de flexión el material es más flexible, y si colocamos algún peso sobre nuestras placas estas se va a deformar más hasta la rotura soportando casi la misma cantidad de esfuerzo que el material comercial. La diferencia de propiedades se debe, al igual que las propiedades de tracción, a que el material comercializado tiene como refuerzo fibra de vidrio pura y no, como en el material estudiado, residuos electrónicos con varios componentes.

### 3.3.2.2. Material compuesto por Resina poliéster insaturada

En la Tabla 3.13 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de flexión realizado al material compuesto por resina poliéster insaturado y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos. Los parámetros analizados fueron: desplazamiento al pico, deformación al pico, carga al pico, esfuerzo al pico y módulo de flexión.

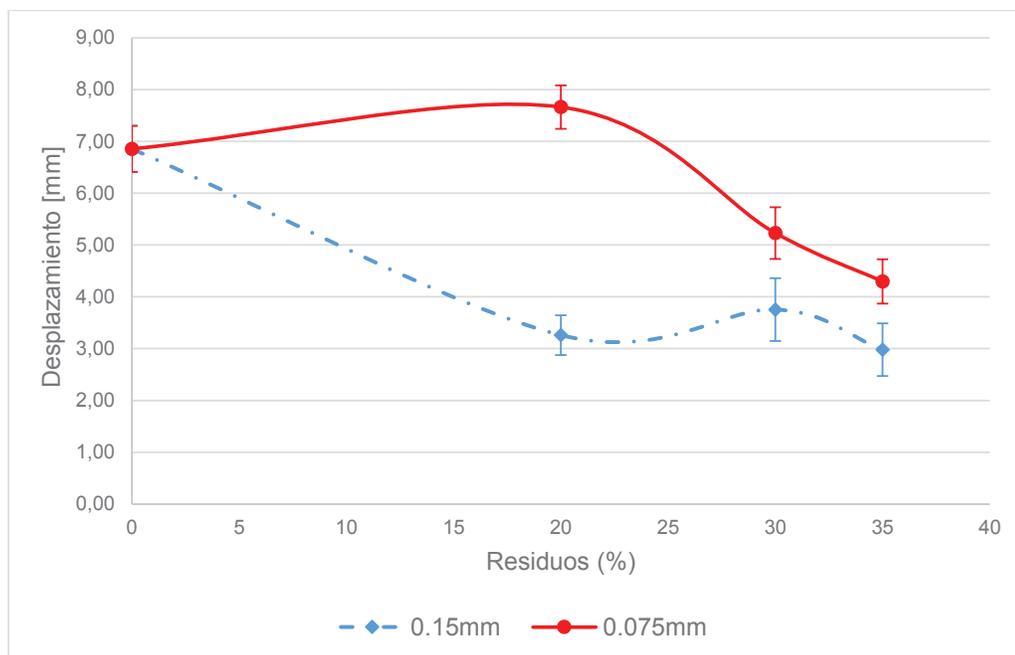
**Tabla 3.13.** Resultados obtenidos en el ensayo de flexión realizado al material compuesto por resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos

Carga (%)	Tamaño de partícula	Desplazamiento al pico [mm]	Deformación al pico [%]	Carga al pico [kN]	Esfuerzo al pico [MPa]	Módulo de Young [MPa]
Sin carga		6,86 ± 0,44	4,05 ± 0,00	0,10 ± 0,00	58,21 ± 2,73	1 336,40 ± 118,29
20	0,15 mm	3,16 ± 0,38	1,86 ± 0,00	0,09 ± 0,01	52,89 ± 7,28	2 313,10 ± 551,50
30		3,75 ± 0,61	2,18 ± 0,00	0,08 ± 0,02	49,54 ± 9,69	2 231,11 ± 557,11
35		3,08 ± 0,51	1,76 ± 0,00	0,07 ± 0,01	44,83 ± 9,59	1 883,61 ± 704,11
20	0,075 mm	7,66 ± 0,42	4,57 ± 0,01	0,07 ± 0,01	42,22 ± 5,12	1 169,64 ± 156,33
30		5,23 ± 0,50	3,06 ± 0,00	0,08 ± 0,00	47,73 ± 3,42	1 599,20 ± 189,04
35		4,30 ± 0,43	2,62 ± 0,00	0,10 ± 0,01	58,51 ± 3,22	1 940,50 ± 281,67

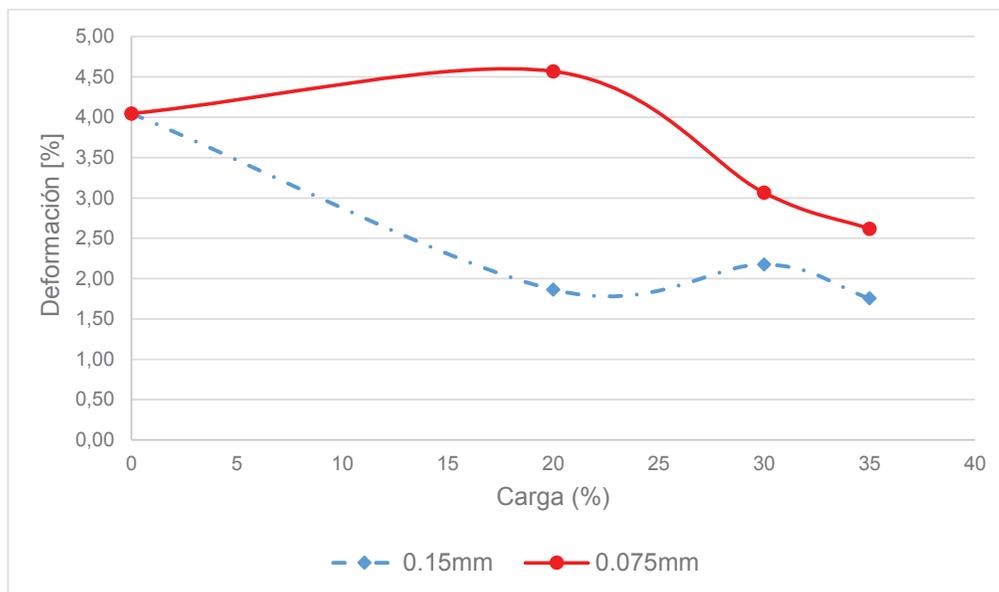
En la Tabla 3.13 se puede observar tanto los promedios como las desviaciones estándar de los resultados obtenidos en el ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada. Los promedios obtenidos serán analizados posteriormente mediante la tendencia que presentan los respectivos

gráficos de cada parámetro estudiado. Los datos completos obtenidos durante el ensayo son presentados en el ANEXO IV.

La desviación estándar obtenida de los parámetros analizados para el material puro de resina poliéster insaturada es menor en comparación con los materiales compuestos, obteniéndose la misma tendencia que los resultados de tracción. El incremento en la desviación estándar para los materiales compuestos es considerada aceptable, excepto para los materiales compuestos de 30% y 35% con tamaño de partícula 0,15-0,075 mm, en los cuales la desviación estándar es alta en todos los parámetros analizados. Esto se debe a que durante la formación de estos materiales existieron dificultades provocando la obtención de placas con fallas como se mostró en la Figura 3.1.



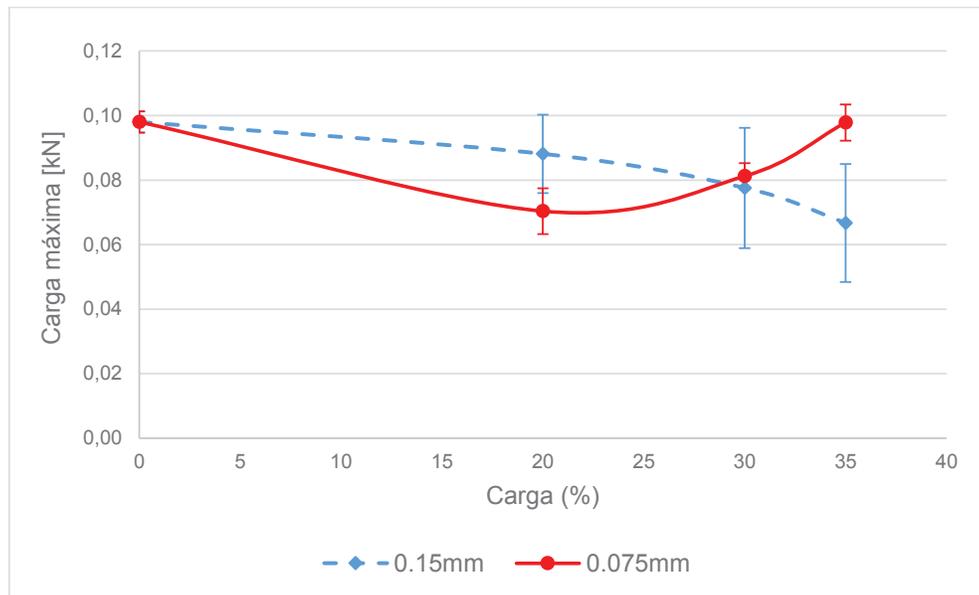
**Figura 3.30.** Resultados de desplazamiento al pico obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada



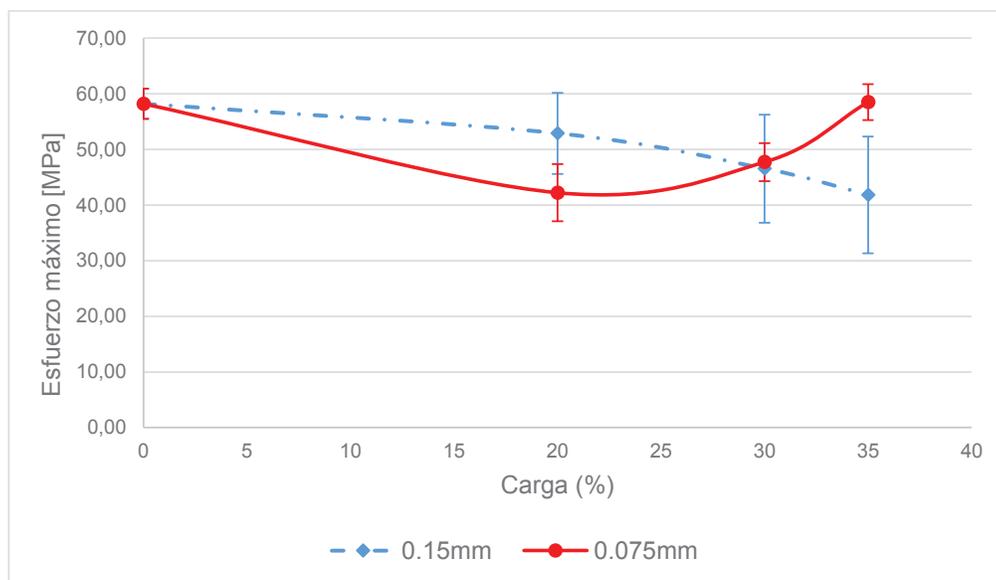
**Figura 3.31.** Resultados de deformación al pico obtenida en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada

En las Figura 3.30 y Figura 3.31 se puede observar una disminución del desplazamiento al pico y deformación al pico del material compuesto en relación al material puro, se observa que mientras aumenta la concentración disminuye la deformación al pico. Esta disminución de la deformación al pico se debe a uno de los principales componentes de la fracción no metálica utilizada que es la fibra de vidrio, la cual presenta una menor deformación al pico que la resina poliéster insaturada, debido a esto el material compuesto se va a fraccionar cuando se rompa la fibra de vidrio, dando por terminado el ensayo.

En la Figura 3.31 se aprecia que el material compuesto con 35% de residuos y tamaño de partícula 0,15-0,075 mm presentó el menor valor de deformación al pico con un porcentaje de 43,45 % menor en comparación con el material puro.



**Figura 3.32.** Resultados de carga al pico obtenida en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada



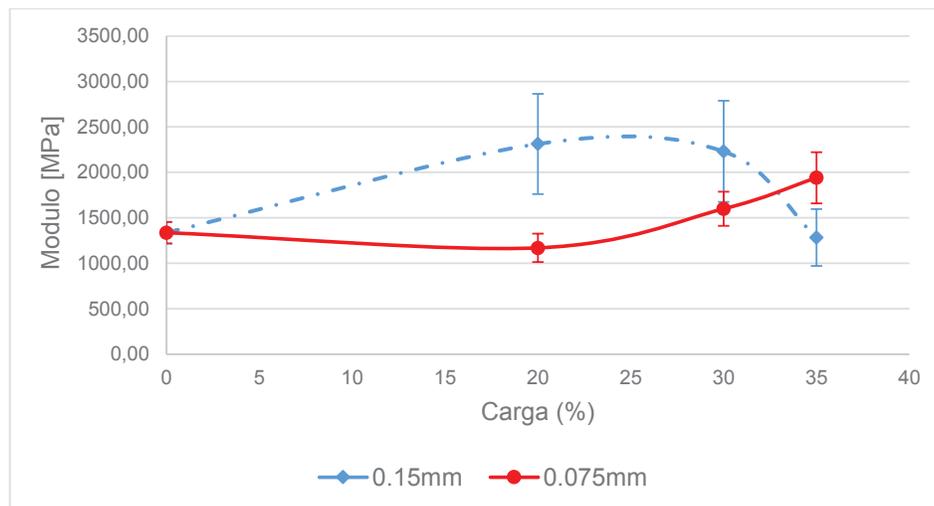
**Figura 3.33.** Resultados de esfuerzo al pico obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada

En la Figura 3.32 y Figura 3.33 se puede observar una disminución en la carga al pico y esfuerzo al pico soportado por los materiales compuestos en comparación con el material puro. Esto se debe a que existe una adhesión interfacial débil entre

los residuos y la resina poliéster insaturada, además existe la formación de pequeños agujeros en el material compuesto como se observó en el análisis de microscopía electrónica de barrido posteriormente presentado.

En un estudio realizado por Zheng et al. (2009), la cantidad de fibra de vidrio presente en los residuos de tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula menor a 0,105 mm puede influir reduciendo el esfuerzo de flexión del material debido a su irregular distribución en el material compuesto, es por eso que existe un porcentaje óptimo (20% de carga y tamaño <0,07 mm) de residuos añadidos a la matriz (p. 603).

El material compuesto que presenta un mejor comportamiento en cuanto al esfuerzo es el material con tamaño de partícula <0,075 mm y 35% de residuos, el cual presenta un valor igual de esfuerzo al pico con el material puro.



**Figura 3.34.** Resultados del módulo obtenido en ensayos de flexión en función de la concentración de carga en el material compuesto de resina poliéster insaturada

En la Figura 3.34 se puede observar que el módulo de flexión incrementa su valor en comparación con el material puro de resina poliéster insaturada, los materiales compuestos que presentan mayores módulos de flexión son aquellos que presentaban mayores valores de resistencia al esfuerzo como es el caso del material compuesto con tamaño de partícula <0,075 mm y 35% de residuos, ya que

estos dos parámetros son directamente proporcionales. Además los materiales compuestos que presentaron menores valores de deformación al pico son los que presentan altos valores del módulo de flexión debido a que estos parámetros son inversamente proporcionales.

En el ANEXO V se presentan los resultados obtenidos del análisis ANOVA para todos los parámetros analizados en el ensayo de flexión. Para el desplazamiento al pico, deformación al pico y módulo de flexión se tuvo como resultado tanto para la concentración como para el tamaño de partícula que son factores estadísticamente significativos lo cual indica que todos los parámetros analizados son dependientes de estos dos factores. Para la carga al pico y esfuerzo al pico estos factores no tienen significancia estadística por lo cual no se puede definir el material compuesto para el diseño de la planta con base en estos dos parámetros ya que estadísticamente estos parámetros no dependen de la concentración ni el tamaño de partícula. Sin embargo, los materiales compuestos con tamaño de partícula 0,15-0,075 mm no se los considera en la selección del material para el diseño de planta debido a las dificultades durante su formación y fallas en las placas obtenidas. Para los materiales con tamaño de partícula  $<0,075$  mm se seleccionó el que presentó mayor esfuerzo de flexión.

Se seleccionó para el diseño de la planta al material compuesto al formado por 35% de residuos y tamaño de partícula  $<0,075$  mm, el cual presenta el mayor valor en cuanto a esfuerzo al pico y módulo de flexión, al igual que en el ensayo de tracción.

En el ANEXO VI se presentan las propiedades mecánicas que deben presentar las baldosas para ser comercializadas con base a la norma UNE 127 020 para baldosas de uso interior. Para este tipo de baldosas se estable que el esfuerzo de flexión debe ser mayor a 5 MPa. En comparación con nuestro material compuesto obtenido, éste presenta un valor mucho más alto por lo cual si es factible su comercialización.

### 3.3.3. ENSAYO DE ABRASIÓN

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de abrasión para el material compuesto por polimetilmeacrilato y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos.

**Tabla 3.14.** Resultados obtenidos en los ensayos de abrasión para el material compuesto por polimetilmeacrilato

Carga (%)	Tamaño de partícula	Diferencia de Peso			
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Sin carga		0,0225	0,0243	0,0203	0,0224 ± 0,0020
10%	0,15 mm	0,0230	0,0203	0,0218	0,0217 ± 0,0014
15%		0,0203	0,0197	0,0201	0,0200 ± 0,0003
20%		0,0215	0,0219	0,0224	0,0219 ± 0,0005
10%	0,075 mm	0,0229	0,0230	0,0230	0,0230 ± 0,0006
15%		0,0236	0,0215	0,0217	0,0223 ± 0,0012
20%		0,0211	0,0239	0,0207	0,0219 ± 0,00174

En la Tabla 3.14 se observan que las diferencias de pesos en el ensayo de abrasión para el material compuesto no tienen mucha variación con el material puro, y en la mayoría de casos la pérdida de peso disminuye a excepción de material compuesto por 10% de residuos de tamaño 0,075 mm; indicando, en el caso de los materiales que disminuyen la pérdida de peso, un mejor comportamiento con respecto a la abrasión. Únicamente el material compuesto de 15% de residuos de tamaño 0,15-0,075 mm presenta una disminución del 10,43% presentando el mejor comportamiento a la abrasión; sin embargo, los demás materiales compuestos producidos presentan una variación de entre el 0,45% y 2,98% con respecto al material puro, la cual es muy baja como para considerar a la abrasión como un parámetro determinante para seleccionar el material para el diseño de la planta. En este ensayo se obtuvieron buenos resultados con los materiales compuestos de 15% y 20% de residuos de tamaño 0,15-0,075 mm. Esto se debe a que el ensayo de abrasión se lo realizó sobre el lado de la placa más uniforme y, además, la abrasión es realizada en una pequeña parte del material (como se puede observar

en la Figura 3.35), por lo cual en la mayoría de casos esta zona no presentaban ningún tipo de fallas.



**Figura 3.35.** Placa obtenida de polimetimetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,075 mm para ensayo de abrasión

En la Tabla 3.15 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de abrasión para el material compuesto por resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos.

En la Tabla 3.15 se puede observar los resultados obtenidos de los ensayos de abrasión que son las diferencias de pesos, así como el promedio y desviación estándar. Se observa que los materiales compuestos presentan menor desgaste en comparación con el material puro. Los materiales compuestos con tamaño de partícula 0,15-0,075 mm presentan valores de desviación estándar mayores en comparación con los otros materiales, lo cual se debe a la dispersión de sus datos y a las fallas presentadas al momento de su formación. En este ensayo se obtuvieron buenos resultados ya que los materiales compuestos presentan una menor pérdida de peso. El material compuesto con tamaño de partícula  $<0,075$  mm y 35% de residuos presentan una disminución de 42,85% de pérdida de peso en comparación con el material puro.

**Tabla 3.15.** Resultados obtenidos en los ensayos de abrasión para el material compuesto por resina poliéster insaturada

Carga (%)	Tamaño de partícula	Diferencia de peso			
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Sin carga		0,0283	0,0251	0,0265	0,0266 ± 0,00160
25%	0,15 mm	0,0116	0,0176	0,0143	0,0145 ± 0,00300
30%		0,0300	0,0227	0,0237	0,0255 ± 0,00396
35%		0,0145	0,0171	0,0129	0,0148 ± 0,00212
25%	0,075 mm	0,0225	0,0255	0,0254	0,0245 ± 0,00170
30%		0,0185	0,0191	0,0168	0,0186 ± 0,00119
35%		0,0165	0,0143	0,0147	0,0152 ± 0,0117

### 3.4. EVALUACIÓN DEL ENCAPSULAMIENTO MEDIANTE CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS MATERIALES COMPUESTOS Y DETERMINACIÓN DE TOXICIDAD DE LIXIVIADOS

#### 3.4.1. EVALUACIÓN DEL MEZCLADO DISPERSIVO-DISTRIBUTIVO

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de distribución y dispersión del material compuesto por polimetilmetacrilato y la fracción no metálica de las tarjetas de circuito impreso

**Tabla 3.16.** Resultados obtenidos de la evaluación de distribución y dispersión de los materiales compuestos de polimetilmetacrilato

Carga (%)	Tamaño de partícula	Distribución (%)	Dispersión (%)
10%	0,15 mm	100	90
15%		100	90
20%		100	100
10%	0,075 mm	100	100
15%		100	100
20%		100	100

En la Tabla 3.16 se puede observar que se obtuvo una completa distribución y dispersión para la mayoría de materiales compuestos, ya que para los materiales compuestos con 10% y 15% de residuos de tamaño 0,15-0,075 mm se obtuvo un 90% de dispersión. Aunque el 90% es un valor alto de dispersión, existe un problema más grave que es el aspecto físico del producto; ya que como se puede observar en Figura 3.8, el material no tiene una apariencia uniforme provocando que el producto sea difícilmente comerciable.

Esta mala dispersión se debe a que el material de tamaño 0,15-0,075 mm presenta aglomerados de resina-fibra, los cuales no tiene una buena adhesión con la matriz. Además al ser partículas muy grandes van a tener un peso considerable, y van a descender mientras el polimetilmetacrilato finaliza su polimerización, ya que la viscosidad alcanzada en la formación del prepolimero no fue suficiente para impedir el movimiento de estas grandes partículas. Asimismo el tiempo que se demoró en completar la polimerización del polimetilmetacrilato fue mucho mayor para los materiales compuestos con residuos de tamaño 0,15-0,075 mm que con residuos de tamaño 0,075 mm y que el material puro.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de distribución y dispersión del material compuesto por resina poliéster insaturado y la fracción no metálica de las tarjetas de circuito impreso.

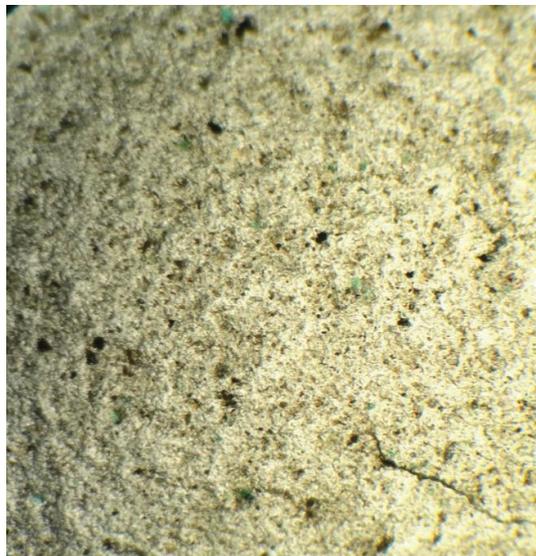
**Tabla 3.17.** Resultados obtenidos de la distribución y dispersión de los materiales compuestos de resina poliéster insaturada

Carga (%)	Tamaño de partícula	Distribución	Dispersión (%)
20%	0,15 mm	100	100
30%		100	100
35%		100	100
20%	0,075 mm	100	100
30%		100	100
35%		100	100

A través de este análisis se puede observar que existe un buen mezclado distributivo y dispersivo para todos los materiales compuestos formados con resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos, pese a que se tuvo complicaciones con el tamaño de partícula 0,15-0,075 mm se logra obtener una mezcla uniforme con una buena distribución y dispersión de la fracción no metálica, de igual manera para el material compuesto con la fracción no metálica de tamaño  $<0,075$  mm se logró una mezcla uniforme y en una sola fase la cual se puede visualizar físicamente en las placas; sin embargo en la Figura 3.12 se presenta un ejemplo de las placas.

### 3.4.2. MICROSCOPIA ÓPTICA (MO)

Se realizó el análisis de microscopía óptica de los materiales compuestos tanto de polimetilmetacrilato y 20% residuos la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula 0,075 mm, de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula 0,075 mm. A continuación se indican las imágenes obtenidas de este análisis con 100 aumentos.



**Figura 3.36.** Resultado de microscopía óptica con 100 aumentos del material compuesto de polimetilmetacrilato y 20% de residuos de tamaño 0,075 mm

Mediante las imágenes obtenidas por microscopía óptica no se puede observar ni la estructura ni el encapsulamiento que presentaban los residuos. Sin embargo, en la Figura 3.36 se puede apreciar que los residuos de las tarjetas de circuito impreso se encuentran distribuidos en toda la placa a nivel microscópico, ya que se observan pequeños fragmentos de color negro y verde a lo largo y ancho de toda la zona visualizada por el microscopio, que corresponden a los residuos ya que el polimetimetacrilato es transparente.

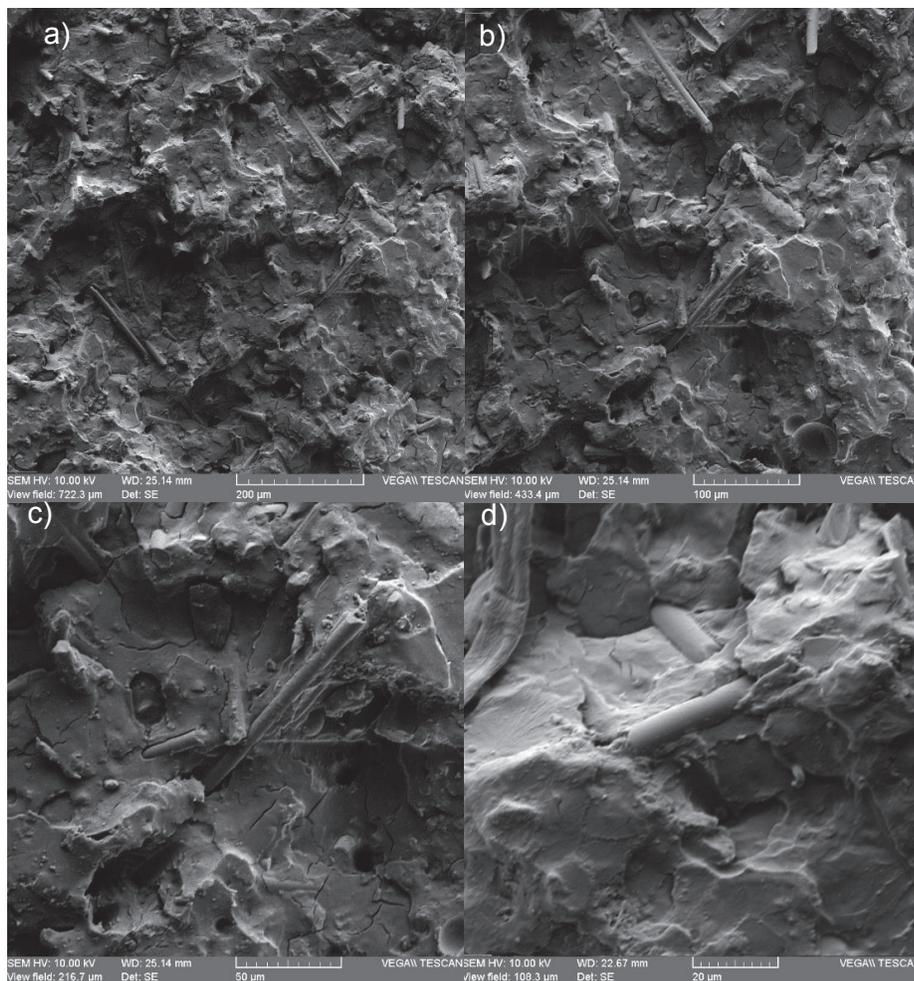


**Figura 3.37.** Resultado obtenido de microscopía óptica con 100 aumentos del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,075 mm

En la Figura 3.37 del material compuesto de resina poliéster insaturada, se puede observar la presencia de los diferentes componentes de la fracción no metálica, los cuales presentan diferentes colores al de la matriz. Pese a que con este tipo de análisis no se puede apreciar adecuadamente la estructura del material compuesto se observa que existe una mezcla uniforme entre la matriz y los residuos ya que están distribuidos a través de toda la matriz de resina poliéster insaturada.

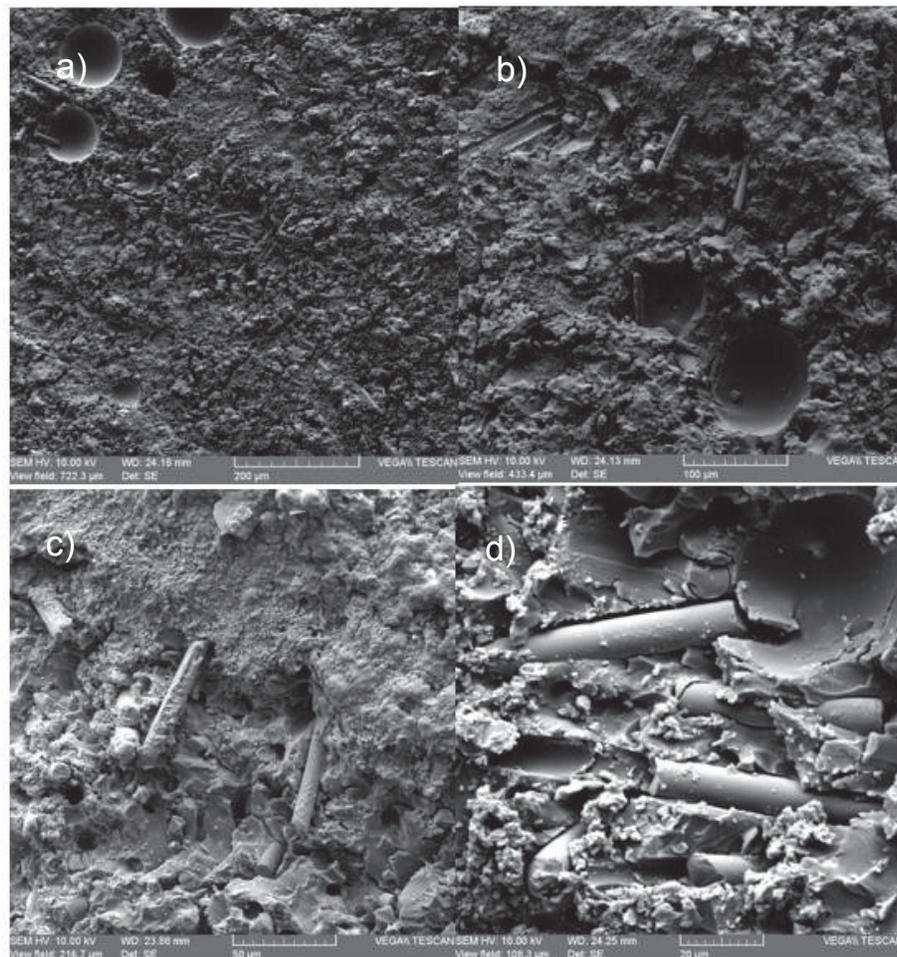
### 3.4.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Se realizó el análisis de microscopía electrónica de barrido para los materiales compuestos tanto de polimeltimetacrilato y 20% de residuos de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula 0,075 mm y de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula 0,075 mm. Las imágenes obtenidas a través de este análisis están a 300, 500, 1000 y 2000 aumentos como se observa en las siguientes figuras.



**Figura 3.38.** Resultado obtenido mediante microscopía electrónica de barrido del material compuesto de 20% de residuos de tamaño 0,075 mm. a) 300 aumentos, b) 500 aumentos, c) 1 000 aumentos y d) 2 000 aumentos

En la Figura 3.38 se puede observar la presencia de formas tubulares que corresponde a la fibra de vidrio, En la Figura 3.38a) y Figura 3.38b) esta fibra de vidrio se encuentra dispersa en toda la imagen y se aprecia que no están direccionadas debido a que no se realizó ningún proceso para direccionar dichas fibras. En la Figura 3.38c) se observa una fibra de vidrio, la cual tiene una relación largo-diámetro muy grande, por lo cual se tiene una gran área de contacto entre la fibra y la matriz provocando una buena adhesión. En la Figura 3.38d) se puede observar que la fibra de vidrio se encuentra fuertemente adherida a la matriz con lo cual se explica el incremento en las propiedades mecánicas, específicamente en el esfuerzo al pico soportado tanto en tracción como en flexión.



**Figura 3.39.** Imagen del material compuesto de resina poliéster insaturada con 35% de residuos y tamaño de partícula de 0,075 mm a) 300 aumentos, b) 500 aumentos, c) 1 000 aumentos y d) 2 000 aumentos

En la Figura 3.39 se puede observar la presencia de fibra de vidrio uno de los mayores componentes de la fracción no metálica, la misma que se encuentra incrustada en la matriz del material compuesto. En la Figura 3.39a) y Figura 3.39b) se observa pequeños agujeros de un tamaño de 0,08 mm lo cual se debe a la adhesión interfacial débil que existe entre la resina poliéster insaturada y los residuos. Estos agujeros no son visibles al momento en que se forma los materiales compuestos ya que se forman en el interior de los mismos, pero si se las puede identificar a través de este análisis (Guo, Cao, Guo y Xu, 2008, p. 5270). Estos agujeros influyen en la disminución de las propiedades mecánicas como se detalla en la sección 3.3.1.2 y 3.3.2.2. En la figura Figura 3.39c) y Figura 3.39d) con mayores aumentos se observan figuras con formas alargadas que representan la fibra de vidrio, la cual está distribuida en varias direcciones y de manera aleatoria a través de toda la matriz del material compuesto.

#### **3.4.4. ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE TOXICIDAD DE LIXIVIADOS (TCLP)**

En la Tabla 3.18 se presentan los resultados obtenidos del análisis de toxicidad de lixiviados para el material compuesto de polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada, seleccionado para el diseño de la planta según propiedades sus mecánicas.

En la Tabla 3.18 se observan que las concentraciones de zinc, cobre, plomo y níquel son muy altas en comparación con los resultados obtenidos de los residuos puros, tomando en cuenta que estos valores deberían corresponder a un máximo de 35% y 20% para los materiales compuestos de resina poliéster y polimetilmetacrilato respectivamente. Esto se debe principalmente al tamaño de partícula ya que los residuos puros tenían un tamaño de partícula menor a 0,075 mm, mientras que los materiales compuestos fueron pulverizados para realizar el análisis TCLP obteniéndose así un tamaño mucho menor al de los residuos puros. La pulverización del material compuesto probablemente ocasionó la liberación de

los de los metales que se encontraban atrapados en la matriz polimérica, facilitando su lixiviación.

**Tabla 3.18.** Resultados de TCLP para los materiales compuestos seleccionados para el diseño de planta

	Fracción no metálica de tamaño <0,075 mm	Material compuesto de resina y 35% de carga	Material compuesto de PMMA y 20% de carga
Elemento	Concentración (mg/L)	Concentración (mg/L)	Concentración (mg/L)
<b>Zinc</b>	3,79	1,18	1,07
<b>Cobre</b>	38,22	18,46	28,86
<b>Plomo</b>	27,99	19,91	6,93
<b>Cobalto</b>	0,01	0,01	0,01
<b>Plata</b>	0,03	0,01	0,01
<b>Níquel</b>	0,23	0,03	0,04
<b>Cromo</b>	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Cadmio</b>	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Bario</b>	<0,1	<0,1	<0,1
<b>Arsénico</b>	<0,1	<0,1	<0,1
<b>Mercurio</b>	<0,1	<0,1	<0,1
<b>Selenio</b>	<0,1	<0,1	<0,1

El análisis TCLP se debe realizar siempre a desechos que van a ser colocados en un relleno sanitario, ya que este tipo de ensayo simula las peores condiciones que podría sufrir un desecho. Como nuestro material no va a ser colocado en un relleno, el análisis TCLP no es significativo para el estudio. Sin embargo, se realizó un nuevo ensayo para determinar las concentraciones de los lixiviados simulando condiciones reales que puedan ocurrir a estos productos al ser utilizados, como por ejemplo una rotura.

Para el nuevo ensayo se trituraron los materiales compuestos en el molino de martillos para obtener partes de aproximadamente 1 cm. Lo cual nos permitió evaluar de una manera más real el encapsulamiento que se produce de los residuos en la matriz de polimetilmetacrilato y en la matriz de resina poliéster insaturada. Los resultados de este análisis se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 3.19.** Resultados de las concentraciones de lixiviados en condiciones reales

	Material compuesto de resina y 35% de carga		Material compuesto de PMMA y 20% de carga	
	Concentración (mg/L)		Concentración (mg/L)	
Elemento	Valor máximo	Valor obtenido	Valor máximo	Valor obtenido
<b>Zinc</b>	1,33	0,01	0,76	0,01
<b>Cobre</b>	13,38	0,06	7,64	0,01
<b>Plomo</b>	9,80	0,11	5,60	0,02
<b>Cobalto</b>	0,00	0,01	0,00	0,01
<b>Plata</b>	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>Níquel</b>	0,08	0,03	0,05	0,04
<b>Cromo</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Cadmio</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Bario</b>	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
<b>Arsénico</b>	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
<b>Mercurio</b>	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
<b>Selenio</b>	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

En la Tabla 3.19 se observan los valores máximos, estos valores máximos fueron calculados a partir de las concentraciones obtenidas de los lixiviados de la fracción no metálica de los residuos de tarjetas de circuitos impresos de tamaño <0,075 mm. El valor máximo del compuesto de polimetilmetacrilato corresponde al 20% de las concentraciones obtenidas del material puro, mientras que el valor máximo del material compuesto de resina poliéster insaturada corresponde al 35% de las concentraciones de los lixiviados del material puro.

En la Tabla 3.19 se puede observar que las concentraciones de obtenidas en el nuevo ensayo de lixiviados no supera las concentraciones máximas, lo cual confirma la suposición que se hizo anteriormente respecto a las concentraciones tan altas de los lixiviados, es decir, cuando se tiene un material de menor tamaño se obtiene una mayor cantidad de lixiviados ya que los metales se liberan de la matriz polimérica. Además los resultados de este análisis nos indican que si existe

un encapsulamiento de los residuos en la matriz polimérica que impide que estos lixivien a menos que la matriz sea destruido completamente. Por lo tanto, los materiales propuestos pueden ser comercializados sin ningún riesgo debido a la poca cantidad de lixiviadas obtenidos en condiciones reales.

### **3.5. DISEÑO DE UNA PLANTA PARA PROCESAR 600 TONELADAS DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE POLIMETILMETACRILATO Y RESINA POLIÉSTER INSATURADA REFORZADOS CON LA FRACCIÓN NO METÁLICA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DESECHADAS**

Con los resultados de los análisis y ensayos de laboratorio obtenidos, se diseña una planta de materiales compuestos a partir de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de los residuos de aparatos electrónicos con tamaño de partícula de 0,075 mm.

#### **3.5.1. INGENIERÍA CONCEPTUAL**

##### **3.5.1.1. Definición Del Producto**

Los productos que se van a obtener son dos materiales compuestos: domos de material compuesto por 20% de fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos de tamaño de partícula 0,075 mm y 80% de polimetilmetacrilato; y baldosas de material compuesto por 35% de fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos de tamaño de partícula 0,075 mm y 65% de resina poliéster insaturada.

En la siguiente tabla se presentan las propiedades mecánicas de cada uno de los productos a obtenerse.

**Tabla 3.20.** Propiedades mecánicas de los productos

Propiedad	Parámetro	Material compuesto de Polimetilmetacrilato y 20% de residuos	Material compuesto de resina poliéster insaturada y 35% de residuos
Tracción	Desplazamiento al pico [mm]	2,81	2,24
	Deformación al pico [%]	4,32	3,49
	Carga al pico [kN]	1,67	0,77
	Esfuerzo [MPa]	45,74	17,36
	Módulo de Young [MPa]	1891,80	1133,70
Flexión	Desplazamiento al pico [mm]	7,12	4,30
	Deformación al pico [%]	5,49	2,62
	Carga al pico [kN]	0,13	0,10
	Esfuerzo [MPa]	77,90	58,51
	Módulo de Young [MPa]	1594,90	1940,50

### 3.5.1.2. Capacidad y localización de la planta

La planta se diseñará para una capacidad de procesamiento de 600 toneladas de residuos electrónicos mensual, lo cual corresponde a un 60% de las 12 000 toneladas de residuos electrónicos generadas cada año en nuestro país (Aguas, 2013, p.1).

La planta de producción estará ubicada en el sector norte de la ciudad de Quito en la parroquia de Calderón. El lugar donde será ubicada la planta cuenta con vías de primer orden, lo cual facilita el transporte de las materias primas así como también de insumos y productos. Además la zona cuenta con todos los servicios industriales necesarios para la producción como son el agua y la electricidad.



**Figura 3.40.** Localización de la planta de producción

### **3.5.1.3. Disponibilidad de materias primas e insumos**

Las materias primas son: polimetilmetacrilato, resina poliéster insaturada, y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de residuos de aparatos electrónicos. Tanto el polimetilmetacrilato y la resina poliéster insaturada son compuestos que se los adquiere de proveedores internacionales mediante importaciones debido a que en el país no existen industrias que produzcan dichos reactivos, y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de residuos de aparatos electrónicos se la obtiene mediante la recolección a nivel nacional.

Los insumos utilizados para la producción son: octoato de cobalto, peróxido de metil-etil-cetona, peróxido de benzoilo y agua. Estos insumos serán obtenidos de distribuidores nacionales debido a que la cantidad requerida no es tan grande como las materias primas.

#### 3.5.1.4. Alternativa tecnológica

La alternativa tecnológica que se utilizará para la producción tanto de domos como de baldosas es la misma que se efectuó durante el proyecto. Se empieza por la obtención de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras, y se continúa con la formación de los materiales compuestos con polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada. A continuación se detallan la secuencia de las operaciones unitarias.

- **Selección:** se seleccionará las tarjetas circuitos impresos de todos los aparatos electrónicos, además se separan las partes que presentan mayor cantidad de metales y sustancias tóxicas como son: capacitores, puertos de salida y baterías.
- **Cizallado:** las tarjetas de circuitos impresos seleccionadas serán cortadas en 8 pedazos de un tamaño aproximado de 6x6 cm mediante de una máquina cizalladora.
- **Molienda:** los pedazos de la tarjeta de circuitos impresos obtenidos serán molidas a través de un molino de martillo para obtener un tamaño de partícula menor a 1,18 mm.
- **Tamizado:** Debido a la baja eficiencia del molino de martillos, el material obtenido de la molienda será tamizado. El tamiz que se utilizará será de malla 16 (1,18 mm). Las partículas con tamaño mayor a 1,18 mm serán remolidas en el molino de martillos.
- **Separación gravimétrica:** el material que pasa la malla 16 con tamaño de partícula menor a 1,18 mm se lo separará a través de una mesa de separación gravimétrica. Para mejorar la separación el material será humedecido con agua. De este proceso se obtendrán tres fracciones la primera de finos en la que se encuentra la mayor cantidad de material polimérico, la segunda de mixtos en la que hay una porción de material no

metálico y una porción de metales, y una tercera que corresponde a los gruesos donde se encuentra la mayor cantidad de metales. La fracción mixta obtenida será reprocesada, obteniéndose de esta manera una mayor cantidad de material no metálico.

- **Secado:** la fracción no metálica obtenida de la separación gravimétrica será llevada a un secador, con el cual se eliminará toda la humedad. El secador funcionará a una temperatura de 100 °C.
- **Tamizado:** La fracción no metálica obtenida de la separación gravimétrica será llevada a través de un tamiz de malla 200 (0,075 mm). El material que tenga un tamaño menor a 0,075 mm será enviado a la formación de los materiales compuestos, mientras que el material con tamaño de partícula mayor a 0,075 m será enviado a un molino de discos.
- **Molienda:** el material con mayor tamaño de partícula a 0,075 mm será triturado en un molino de discos para obtener así un material con menor tamaño de partícula hasta alcanzar el deseado.
- **Mezclado:** la fracción no metálica obtenida será mezclada con polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada para formar los materiales compuestos.
  - **Polimerización y moldeo con polimetilmetacrilato:** Los residuos de tamaño menor a 0,075 mm serán mezclados con monómero metilmetacrilato en proporciones 20 y 80% respectivamente. A esta mezcla se le añadirá 0,5% del iniciador peróxido de benzoilo y se calentará a 60 °C durante una hora mediante una chaqueta de calentamiento. Una vez terminada la prepolimerización, dicha mezcla será colocada dentro de moldes de vidrio herméticamente sellados, los cuales serán colocados dentro de un horno a 90 °C durante 5 horas.

- **Polimerización y moldeo con resina poliéster insaturada:** para la obtención del material compuesto a la resina poliéster insaturada se añadirá 2% del iniciador metil etil cetona peróxido y luego 0,2% del catalizador que es el octoato de cobalto. Una vez mezclados estos compuestos se añade la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos en una proporción de 35% en peso. Todos los componentes se agitan por 10 minutos hasta obtener una mezcla uniforme de resina poliéster insaturada y la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos. Una vez obtenido el material compuesto se procederá a colocarlo en moldes de acero inoxidable para su curado el cual toma un tiempo de 4 horas aproximadamente.
- **Almacenamiento:** una vez obtenidos los domos de material compuesto de polimetilmetacrilato y baldosas de material compuesto de resina poliéster insaturada se procede a su almacenamiento en bodega para su distribución a nivel nacional.

#### 3.5.1.5. Identificación de los servicios

Entre los principales servicios están: agua para mejorar la separación gravimétrica, y energía eléctrica, debido a que la mayoría de equipos utilizados funciona con ésta. Por la ubicación de la planta estos servicios son fáciles de obtener.

### 3.5.2. INGENIERÍA BÁSICA

#### 3.5.2.1. Descripción del alcance del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de una planta productora de domos de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos. La planta tendrá una capacidad para procesar 600 toneladas de residuos electrónicos por mes. La planta

será ubicada en la parroquia de Calderón al norte de la ciudad de Quito, además del funcionamiento de los equipos, permitiendo una operación constante de la planta. Mediante el balance de masa y energía realizado se logró obtener la capacidad de los equipos necesarios los cuales serán dimensionados y seleccionadas.

Los equipos fueron distribuidos con el fin de lograr un correcto funcionamiento de la planta, la cual cuenta con tres áreas, una de selección de las tarjetas de circuitos impresos, otra de obtención de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos y por último el área donde se obtienen los materiales compuestos. Además se incluyó una bodega de almacenamiento de materias primas e insumos, bodega de productos y un cuarto de mantenimiento de los equipos.

### **3.5.2.2. Descripción detallada del proceso**

El proceso inicia con la selección de las tarjetas de circuitos impresos de aparatos electrónicos que pasan a través de la banda transportadora S-101, las tarjetas seleccionadas pasan a la cizalla C-201 en la cual se separan las partes metálicas de las tarjetas de circuitos impresos y se obtienen pedazos de 6x6 cm, las tarjetas de circuitos impresos cortadas son enviadas al molino de martillo TR-202 en el cual se reduce su tamaño, luego el material va hacia la tamizadora T-203 en la cual se obtiene material con tamaño de partícula menor y mayor a 1,18 mm. El material con tamaño mayor a 1,18 mm se reprocesa en el molino TR-202, el material con tamaño menor a 1,18 mm se dirige a la mesa de separación gravimétrica SG-204, la cual tiene como función separar la fracción no metálica (finos) de la fracción metálica (gruesos). Para mejorar la separación se utiliza agua. La fracción no metálica obtenida se lleva a la estufa SE-205 a una temperatura de 100 °C por 24 horas con el objetivo de eliminar completamente el agua. La fracción no metálica sigue a la tamizadora T-206 en la cual el material con tamaño de partícula mayor a 0,075 mm es retenido y enviado al molino de disco TR-207 para alcanzar el tamaño deseado. Una vez obtenida la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula 0,075 mm van hacia dos reactores R-301 y R-302 en los cuales

se formarán los materiales compuestos con polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada respectivamente. El material compuesto de polimetilmetacrilato se coloca en los moldes de vidrio para ser enviado horno H-303 para finalizar la polimerización, mientras que el material de resina poliéster insaturada se coloca en moldes de acero inoxidable y polimeriza a temperatura ambiente. Una vez obtenidos los materiales compuestos los domos de polimetilmetacrilato y las baldosas de resina poliéster insaturada son almacenados y distribuidos a nivel nacional.

En la Tabla 3.21 se presenta la nomenclatura de los equipos utilizados para la producción de domos de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada a partir de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos.

**Tabla 3.21.** Nomenclatura de los equipos utilizados para el diseño de la planta

<b>Nomenclatura</b>	<b>Equipo</b>
S-101	Banda transportadora
C-201	Cizalladora
TR-202	Molino de martillos
T-203	Tamizadora 1
SG-204	Separador gravimétrico
SE-205	Secador
T-206	Tamizadora 2
TR-207	Molino de discos
R-301	Reactor 1
R-302	Reactor 2
H-303	Horno

### 3.5.2.3. Balance de masa

En la Tabla 3.22 y Tabla 3.23 se presentan las características y concentraciones de cada una de las corrientes indicada en el diagrama de flujo propuesto para la producción de materiales compuestos de polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada. Los cálculos correspondientes se presentan en el ANEXO VII.

#### **3.5.2.4. Diagrama de bloques (BFD) y diagrama de flujo (PFD) propuesto para la producción de materiales compuestos**

En la Figura 3.41 se presenta el diagrama de bloques de la planta propuesta, en él se especifican cada una de las operaciones unitarias llevadas a cabo durante el proceso. En la Figura 3.42 se presenta el diagrama de flujo de la planta propuesta donde se indican cada una de las corrientes mostradas en el balance de masa.

#### **3.5.2.5. Dimensionamiento y selección de equipos**

En el ANEXO VIII se indican las hojas de especificaciones de los equipos seleccionados para la planta de producción de materiales compuestos de polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada. A partir del balance de masa se determinó la capacidad de cada uno de los equipos, mediante esta capacidad se realizó una revisión y selección en catálogos de los equipos los cuales se presentan en el mismo anexo.

En el ANEXO IX se muestra el dimensionamiento de los reactores donde se realizará el mezclado de los residuos de las tarjetas de circuitos impresos con el polimetilmetacrilato y la resina poliéster insaturada.



Tabla 3.23. Balance de masa corrientes 12-25

Número de corriente	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	60	20	90
Tamaño de partícula (mm)	>0,075	<0,075	<0,075	<0,075	<0,075	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo másico (Ton/mes)	23,80	23,80	32,35	9,70	22,64	38,82	0,31	42,05	0,13	1,29	48,71	65,62	48,71
<b>Flujo másico del componente</b>													
Residuos electrónicos sin PCB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fracción metálica de PCBs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fracción no metálica de PCBs	23,80	23,80	32,35	9,70	22,64	-	-	-	-	-	9,70	22,64	9,70
Agua	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metilmetacrilato	-	-	-	-	-	38,82	-	-	-	-	38,82	-	38,82
Resina poliéster insaturada	-	-	-	-	-	-	-	42,05	-	-	-	42,05	-
Peróxido de benzoilo	-	-	-	-	-	-	0,19	-	-	-	0,19	-	0,19
Octoato de Cobalto	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08	-	-	0,08	-
Meck Peróxido	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,84	-	0,84	-

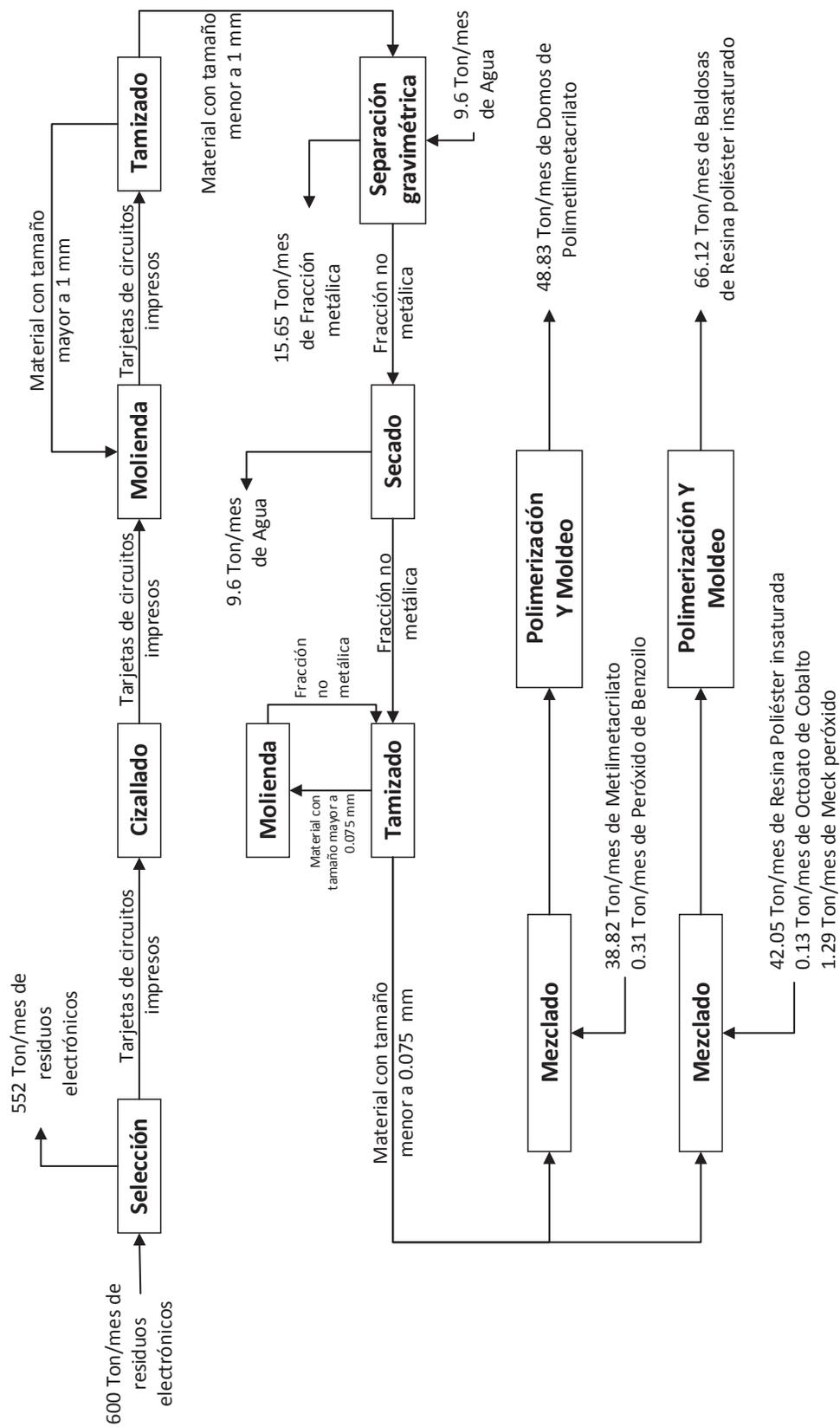


Figura 3.41. Diagrama de bloques (BFD) propuesto para la producción de materiales compuestos



### 3.6. ESTABLECIMIENTO DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE DOMOS Y BALDOSAS PLÁSTICAS

A continuación se detalla los resultados obtenidos del análisis de costos para la operación de la planta productora de domos polimetilmetacrilato con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos y baldosas de resina poliéster insaturada con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de residuos de aparatos electrónicos. A través de los resultados presentados en la sección 3.5 se realizó el siguiente análisis económico.

#### 3.6.1. INVERSIONES

En la Tabla 3.24 se presenta la inversión requerida para la construcción de la planta productora de domos de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos. Se consideró el costo del terreno y la construcción de infraestructura, (el cálculo de estos costos se presenta en el ANEXO X)

**Tabla 3.24.** Inversión requerida para el terreno y construcción de la planta

<b>Detalle</b>	<b>Costo (USD)</b>
Terreno	63 000,00
Infraestructura	173 200,00
<b>TOTAL</b>	<b>236 200,00</b>

En la Tabla 3.25 se presenta la inversión de equipos para la planta productora de domos de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster, los mismos que fueron seleccionados a través de catálogos de acuerdo a las capacidades requeridas como resultado del balance de masa.

**Tabla 3.25.** Inversión requerida para los equipos

<b>Equipo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo unitario (USD)</b>	<b>Costo Total (USD)</b>
Banda transportadora	1	20 000,00	20 000,00
Cizalladora	1	26 000,00	26 000,00
Molino de martillos	1	85 000,00	85 000,00
Tamizadora	2	47 500,00	95 000,00
Separador gravimétrico	1	25 080,00	25 080,00
Secador	2	25 750,00	51 500,00
Molino de discos	1	16 000,00	16 000,00
Reactor	2	8 447,00	16 894,00
<b>TOTAL</b>		253 777,00	335 474,00

En la Tabla 3.26 se presenta la inversión fija total para la construcción de la planta procesadora de domos de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada.

**Tabla 3.26.** Inversión fija requerida para la planta

<b>Detalle</b>	<b>Costo (USD)</b>
Terreno	63 000,00
Construcciones	173 200,00
Precio equipos	335 474,00
<b>TOTAL</b>	571 674,00

### 3.6.2. CAPITAL DE OPERACIÓN

A continuación se presenta los valores del capital necesario para la operación de la planta, los cuales se calcularon por año, en la Tabla 3.27 se observa los costos anuales que implican la mano de obra requerida, así como el personal para que controle y realice el mantenimiento de los equipos para el funcionamiento adecuado de la planta productora de domos de polimetilmetacrilato con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos y baldosas de resina poliéster insaturada con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos.

**Tabla 3.27.** Inversión anual en mano de obra

<b>Cargo</b>	<b>No.</b>	<b>Sueldo mensual (USD)</b>	<b>Total anual (USD)</b>
Gerente	2	3 000,00	105630,00
Jefe de planta	2	1 200,00	42 676,80
Obreros	5	354,00	32 722,00
Mantenimiento	1	500,00	10 846,20
<b>TOTAL</b>			191 875,00

La jornada de trabajo para la producción de domos de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos será de 8 horas diarias, para los salarios del personal operativo se consideró las aportaciones a IESS y los derechos establecidos por el Ministerio de Relaciones Laborales como son las vacaciones, así como el décimo tercer y décimo cuarto sueldo, como se detalla en el ANEXO X.

En la Tabla 3.28 se presenta la inversión mensual y anual necesaria para la adquisición de las materias primas e insumos para la producción de domos de polimetilmetacrilato con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos y baldosas de resina poliéster insaturada con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos.

En la Tabla 3.29 se presenta el valor de los egresos anuales considerando la inversión en materia prima e insumos, mano de obra, servicios y el mantenimiento de equipos e infraestructura, los cálculos realizados se observan en el ANEXO X.

**Tabla 3.28.** Inversión en materia prima e insumos

<b>Producto</b>	<b>Costo mensual (USD)</b>	<b>Costo anual (USD)</b>
Resina poliéster insaturada	147 175,00	1 766 100,00
Polimetilmetacrilato	58 230,00	698 760,00
Meck peróxido	18 743,70	224 924,40
Octoato de cobalto	5 718,60	68 623,20
Peróxido de benzoilo	9 600,00	115 200,00
Planchas de vidrio	140 000,00	1 680 000,00
Moldes de acero inoxidable	11 533,33	138 399,96
<b>TOTAL</b>	<b>391 000,63</b>	<b>4 692 007,56</b>

**Tabla 3.29.** Egresos anuales

<b>Detalle</b>	<b>Costo (USD)</b>
Materia prima e insumos	4 692 007,56
Mano de obra directa	86 245,00
Mano de obra indirecta	105 630,00
Mantenimiento equipos	16 773,70
Mantenimiento infraestructura	3 464,00
Servicios (agua y electricidad)	5 804,00
<b>TOTAL</b>	<b>4 909 924,26</b>

### 3.6.3. INGRESOS POR VENTAS

En la Tabla 3.30 se presenta los ingresos que se obtienen por la venta de domos de polimetilmetacrilato con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos así como el de baldosas de resina poliéster insaturada con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos

**Tabla 3.30.** Ingresos por ventas

Tipo de producto	Cantidad de producto producido por mes [Kg]	Cantidad de producto producido por año	Precio de venta, por kg (USD)	Ingresos mensuales por ventas (USD)	Ingresos anuales por ventas (USD)
Baldosas	65 619,53	787 434,36	4,60	301 849,84	3 622 198,05
Domos	48 714,88	584 578,60	3,00	146 144,65	1 753 735,80
<b>TOTAL INGRESOS POR VENTAS</b>				447 994,49	5 375 933,85

Los precios considerados para la venta de los productos obtenidos se los obtuvo consultando los valores de productos comerciales de este tipo.

### 3.6.4. INDICADORES ECONÓMICOS

En la Tabla 3.31 se presenta el flujo de caja anual para la planta, en el que se consideró como inversión inicial los costos fijos de inversión y el capital de operación, el mismo que será financiado por el banco con una tasa de interés del 12% y una amortización lineal por 10 años.

Para obtener la utilidad neta se consideró la amortización, depreciación, participación de los trabajadores con un 15 % y el impuesto a la renta con un interés del 11%, valores establecidos por el Servicio de Rentas Internas del Ecuador. Además del pago que se realizará al banco. La amortización y depreciación considerada no se toma en cuenta al final en el flujo de caja ya que para este periodo de tiempo se considera que los equipos e infraestructura no pierden liquidez, sino que este valor representa el desgaste de los equipos. Se consideró un horizonte de 10 años de operación para la planta productora de domos de polimetilmetacrilato así como el de baldosas de resina poliéster insaturada con la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos. Con base a esto se elaboró el flujo de caja anual para calcular los indicadores económicos: valor actual neto (VAN) y la tasa de retorno interna (TIR), indicadores que permitirán conocer si el proyecto será rentable, lográndose recuperar la inversión inicial y generando ganancias.

**Tabla 3.31.** Flujo de caja para el primer año de operación de la planta

<b>Detalle</b>	<b>Valor (USD)</b>
Ingresos	5 375 933,85
Egresos	4 909 924,26
Gastos administrativos	105 630,00
Participación trabajadores	40 402,84
Impuesto a la renta	29 628,75
Pago Banco	109 597,77
<b>Utilidad Neta</b>	<b>180 750,23</b>

**Tabla 3.32.** Indicadores económicos

<b>Indicadores económicos</b>	<b>Valor</b>
<b>VAN</b>	\$ 313 364,92
<b>TIR</b>	23,55%

De acuerdo a los indicadores económicos presentados en la Tabla 3.32 se observa que se tiene un valor del valor actual neto (VAN) mayor a cero por lo cual se considera que el proyecto será rentable, además con el valor de la tasa interna de retorno (TIR) el cual resultó ser mayor a la tasa de interés presentada por el banco que es del 12% se concluye que el proyecto generará ingresos que permitirán recuperar el dinero de la inversión y obtener ganancias a través de productos competitivos. En el ANEXO XI se presenta el flujo de caja proyectado a 10 años para el cálculo de los indicadores económicos.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- Mediante separación gravimétrica se determinó que las tarjetas de circuitos impresos utilizadas contenían un 32,61% de fracción metálica y 67,39% de fracción no metálica.
- Mediante FTIR se logró determinar que la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos están compuestas principalmente por resina epóxica y fibra de vidrio debido a la presencia de bandas características tanto para la resina epóxica como para silicatos.
- Mediante TGA se determinó que la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos de tamaño 0,15-0,75 mm tiene 67,22% de material inorgánico (fibra de vidrio) y 32,78% de material orgánico (resina epóxica); y para el material de tamaño <0,075 mm se obtuvo un 78,78% de material inorgánico y 21,22% de material orgánico.
- El material compuesto de polimetilmetacrilato que presentó el mejor comportamiento respecto a propiedades mecánicas fue el material que se formó con 20% de fracción no metálica de tamaño <0,075 mm.
- El material compuesto de resina poliéster insaturada que presentó el mejor comportamiento respecto a propiedades mecánicas fue el material que se formó con 35% de fracción no metálica de tamaño <0,075 mm.
- Los materiales compuestos de polimetilmetacrilato no presentaron diferencia de peso significativa en los ensayos de abrasión con referencia al material puro, mientras que los materiales compuestos de resina poliéster insaturadas presentaron un aumento en la resistencia a la abrasión con referencia al material puro.

- Mediante microscopía electrónica de barrido se determinó que la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos tiene una buena adhesión con el polimetilmetacrilato lo que provoca el mejoramiento de las propiedades mecánicas con respecto al material puro, mientras que sucede lo contrario con la adhesión con la resina poliéster insaturada. Además se observó la presencia de una gran cantidad de agujeros lo cual provoca la disminución de las propiedades mecánicas con respecto al material puro.
- Mediante el TCLP se obtuvo que tanto la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de tamaño  $<0,075$  como los materiales compuestos de polimetilmetacrilato y resina poliéster insaturada superan los límites permisibles de lixiviación de plomo, sin embargo en los resultados del análisis de lixiviados en condiciones reales los valores se encontraron en los rangos permisibles demostrando que los residuos si se encapsulan dentro de la matriz.
- El diseño de la planta propuesto está compuesto de las siguientes operaciones unitarias: Selección, cizallado, molienda 1, tamizado 1, separación gravimétrica, secado, tamizado 2, molienda 2, mezclado y finalmente polimerización y moldeo.
- El valor actual neto (VAN) obtenido del análisis económico preliminar de la planta propuesta fue de 313 364,92 USD y la tasa interna de retorno (TIR) fue 23,55%, siendo una planta rentable.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio para eliminar el color (verde) de los residuos de las tarjetas de circuitos impresos para obtener placas de diferentes colores, lo cual haría más atractivo al producto para el comprador

- Realizar un análisis económico tomando en cuenta la extracción de los metales de la fracción metálica de las tarjetas de circuitos impresos, lo que ocasionaría una mayor rentabilidad del proyecto.
- Realizar un estudio del comportamiento de los materiales compuestos cuando son expuestos al medio externo: en la atmosfera, en cámara salina o en cámara ultravioleta para observar su degradación.
- Realizar un estudio sobre el proceso de molienda y separación de las tarjetas de circuitos impresos para mejorar la eficiencia en la obtención de la fracción no metálica, mediante la construcción de este tipo de equipos pero que sean específicos para la molienda y trituración de residuos electrónicos.
- Realizar un estudio en el que incluya el proceso para el reciclaje de la fracción metálica, y de esta manera lograr un reciclaje integral de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguas, P. (2013). Cada año, en Ecuador se generan cerca de 12 000 toneladas de residuos electrónicos. Recuperado de [http://www.ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news\\_user\\_view&id=204176&umt=cada\\_ano\\_en\\_ecuador\\_se\\_generan\\_cerca\\_12\\_mil\\_toneladas\\_residuos\\_electronicos](http://www.ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=204176&umt=cada_ano_en_ecuador_se_generan_cerca_12_mil_toneladas_residuos_electronicos) (Diciembre, 2013)
2. Achilias, D. Antanakaou, E. Koutsokosta, E y Lappas, A. 2009. Chemical Recycling of Polymers from Waste Electric and Electronic Equipment. *Applied Polymer*, 114 (1), 212-221. doi: 0.1002/app.30533
3. Askeland, D y Phulé, P. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. (4ta. Ed.). Mexico: International Thomson Editores, S. A.
4. ASTM D 1044. (2013). *Standard Test Method for Resistance of Transparent Plastics to Surface Abrasion*. Estados Unidos.
5. ASTM D 3039. (2008). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. Estados Unidos.
6. ASTM D 7264. (2007). *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. Estados Unidos.
7. Ban, B. C. Song, J. Y. Lim, J. Y. Wang, S. K. An, K. G. Kim, D.S. (2006). Studies on the reuse of waste printed circuit board as an additive for cement mortar. *Journal of Environmental Science and Health*, 40(3), 645-656. Recuperado de <http://www.tandfonline.com/loi/lesa20>
8. Barbero. E. (2011). *Introduction to composite materials desing*. (2da. Ed.). Florida. Estados Unidos: Taylor y Francis group

9. Boeni, H., Silva, U. y Ott, D. (2008). *E-Waste Recycling in Latin America: Overview, Challenges and Potential*. Recuperado de [http://ewasteguide.info/system/files/2008\\_Keynote\\_Boeni\\_REWAS.pdf](http://ewasteguide.info/system/files/2008_Keynote_Boeni_REWAS.pdf)
10. Campbell, F. C. (2010). *Introduction to Composite Materials*. Recuperado de: [http://www.asminternational.org/documents10192/3449368/05287G\\_Sample\\_Chapter.pdf/7c5b99aa-25f6-4f08-abfd-b666c88eaf67](http://www.asminternational.org/documents10192/3449368/05287G_Sample_Chapter.pdf/7c5b99aa-25f6-4f08-abfd-b666c88eaf67) (Noviembre, 2014)
11. Chung, D. (2010). *Composite Material: Science and Applications*. (2da. Ed.). Nueva York. Estados Unidos: Series Editor
12. Cousins, K. (2006). *Polymers in Electronics*. (1ra Ed). Shropshire, Reino Unido: Smithers Rapra Limited.
13. Deli, D. Ebdon, J. Kandola, K. y Krishman, L. (2013). Blends of Unsaturated Polyester and Phenolic Resins for Applications as Fire-resistant Matrices in Fible-reinforced Composites. Part 1: Identifying Compatible, Co-curable Resin Mixtures. *Journal of Materials Science*, 48(20), 6929–6942. doi: 10.1007/s10853-013-7498-z
14. De Marco, I. Caballero, B. M. Chomón, M.J. Laresgoiti, M.F. Torres, A. Fernández, G. y Arnaiz, S. (2008). Pyrolysis of electrical and electronic wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(2), 179-183. doi:10.1016/j.jaap.2008.03.011
15. Directiva de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. (2006). *Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*. Recuperado de [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32006L\\_0096](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32006L_0096).

16. EPA. (1992). *Method 1311: Toxicity Characteristics Leaching Procedure*, Recuperado de <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1311.pdf>. (Julio, 2013).
17. Ebevele, H. (2009). *Polymers technology*, (2da.Ed.). New Yersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc
18. Fink, J. (2013). *Unsaturated Polyester Resins*. (2da. Ed.). Reactive Polymers Fundamentals and Applications. (pp. 1-48). Oxford, Inglaterra: Elsevier
19. Goodship, V. y Stevels, A. (2012). *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook*. (1ra Ed). Cornwall, Reino Unido: TJ International Ltd.
20. Gregorova, A. (2013). Application of Differential Scanning Calorimetry to the Characterization of Biopolymers: Applications of Calorimetry in a Wide Context – Differential Scanning Calorimetry, *Isothermal Titration Calorimetry and Microcalorimetry* 1(1), 1-20, Recuperado de: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/42247.pdf>. (Noviembre, 2014)
21. Guo, J. Guo, J. y Xu, Z. (2009). Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 567-590. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.02.104.
22. Guo, J. Li, J. Rao, Q. y Zu, Z. (2008). Phenolic Molding Compound Filled with Nonmetals of Waste PCBs. *Environmental Science & Technology*, 42(2), 624-628. doi: 10.1021/es0712930.

23. Hadi, P. Xu, M. Lin, C. Hui, C. y McKay, G. (2014). Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization. *Journal of Hazardous Materials*, 238(1), 234-243. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.09.032
24. Hoe, N. H. Salmiaton, A. y Hizam, H. (2014). Catalytic Pyrolysis and a Pyrolysis Kinetic Study of Shredded Printed Circuit Board for Fuel Recovery. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 9(3), 224-240. Recuperado de <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/bcrec/article/view/7148>
25. Ishan, M. (2007). Applications of Unsaturated Polyester Resins. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 80(7), 1256-1269. Recuperado de: <http://link.springer.com/article/10.1134/S1070427207070464> (Octubre 2014)
26. Kaisersberger, E. Knappe, S. Mohler, H y Rahner S. (2004). TA for Polymer Engineering: DSC TG DMA TMA. (1ra Ed). Wurzburg, Alemania: Netzsch-Geratebau.
27. LaDou, J. (2006). Printed circuit board industry. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 209(3), 211-219. doi: 10.1016/j.ijheh.2006.02.001.
28. Lakshmi, R. y Nagan, S. (2010). Studies on Concrete containing E plastic waste. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(3), 270-281. Recuperado de <http://connection.ebscohost.com/c/articles/60765092/studies-concrete-containing-e-plastic-waste> (Noviembre, 2014)
29. Liang J.Z. (2005). Toughening and reinforcing in rigid inorganic particulate filled poly(propylene): A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(7), 1547-1555. doi: 10.1002/app.10052

30. Luda, P. (2011). Recycling of Printed Circuit Boards. *Environmental Engineering*, 2(15), 285-298. Doi: 10.5772/17220
31. Malik, M. Choundhary, V y Varma. (2004). Current Status of Unsaturated Polyester Resins. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 40(2-3), pp. 140-149. doi: 10.1081/MC-100100582
32. Manas, I. (2010). Analysis of Mixing in Polymer Processing Equipment. *Applications of Calorimetry in a Wide Context*, 1(1), 1-20, Recuperado de: [http://www.rheology.org/sor/publications/rheology\\_b/jan97/mixing.pdf](http://www.rheology.org/sor/publications/rheology_b/jan97/mixing.pdf) (Noviembre, 2014)
33. Mark, L, (2004). *Properties of Polymers*. (2da.Ed.). Nueva York, Estados Unidos: Marcel Dekker.
34. Menczel, J. Judovits, L. Prime, R. Bair, H. Reading, M y Swier, S. (2009). *Diferential Scanning Calorimetry (DSC)*. En Menczel, J. y Prime, R. (Ed.). *Thermal Analysis of Polymers Fundamentals and Applications* (pp. 7-18). New Yersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc
35. Nnorom, I. C. y Osibanjo, O. (2009). Toxicity characterization of waste mobile phone plastics. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 183-188. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.03.067
36. Oguchi, M. Sakanamura, H. y Terazono, A. (2013). Toxic metals in WEEE: Characterization and substance flow analysis in waste treatment processes. *Science of the Total Environmental*, 463(8), 1124-1132. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.07.078
37. Penczekl, P. Czubz, P. y Pielichowskiz, J. (2005). Unsaturated Polyester Resins: Chemistry and Technology. *Advances in Polymer Science*, 184(1), 1-95. doi: 10.1007/b136243

38. Pilato, L. (2010). *Phenolic Resins: A Century of Progress*. doi:10.1007/978-3-642-04714-5
39. Prime, R. Bair, H. Vyazovkin, S. Gallagher, P y Riga, A. (2009). Thermogravimetric Analysis (TGA). En Menczel, J. y Prime, R. (Ed.). *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*. (pp. 241,242). Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc
40. Román, I. (2014). eWaste en América Latina: *El aporte de los operadores móviles en la reducción de la basura electrónica* 1(1), 1-44. Recuperado de: <http://www.gsma.com/latinamerica/wpcontent/uploads/2014/05/eWaste-Latam-spa-Completo.pdf> (Febrero, 2014)
41. Sawyer, L. Grubb, D y Meyers, G. (2008). *Polymer Microscopy: Fundamentals of Microscopy*. doi: 10.1007/978-0-387-72628-1\_2
42. Scheirs, J. (2003). *Compositional and Failure Analysis of Polymers*. (2da.Ed.). Nueva York, Estados Unidos: John Wiley and Sons
43. Schlummer, M. Gruber, L. Mäurer, G. Wolz, G. y van Eldik, R. (2007). Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management. *Chemosphere*, 67(9), 1866–1876. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.05.077.
44. Schlummer, M. Maurer, A. Leitner, T. y Spruzina, W. (2006). Report: Recycling of flame-retarded plastics from waste electric and electronic equipment (WEEE). *Waste Management & Research*, 24(6), 573–583. doi: 10.1177/0734242X06068520

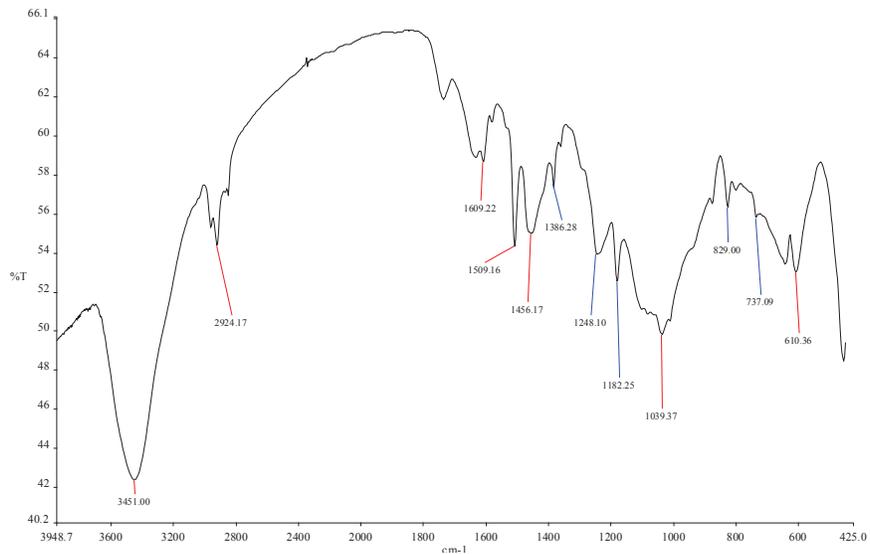
45. Sengoz, B. y Isikyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897-1905. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013
46. Smith, B. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. (2da. Ed.). Nueva York, Estados Unidos: Taylor & Francis Group
47. Stuart, B. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. Recuperado de: <http://www.kinetics.nsc.ru/chichinin/books/spectroscopy/Stuart04.pdf> (Noviembre, 2014)
48. Tarantili, P. A. Mitsakaki, A. N. y Petoussi, M. A. (2010). Processing and properties of engineering plastics recycled from waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Polymer Degradation and Stability*, 95(3), 405-410. doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2009.11.029
49. Tomblin, J. Yeow, Ng. y Suresh R. *Material Qualification and equivalency for polymer matrix composite material systems: updated procedure*. Recuperado de: [https://www.wmc.eu/public\\_docs/10329\\_000.pdf](https://www.wmc.eu/public_docs/10329_000.pdf).
50. Wager, P. A. Schlupe, M. Muller, E. y Gloor, R. (2011). RoHS regulated Substances in Mixed Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 628-635. doi:10.1021/es202518n
51. Wager, P. A. Schlupe y M. Muller, E. (2010). RoHS regulated Substances in Mixed Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment. (1ra Ed). St. Gallen, Switzerland: Empa.

52. Wang, R. Zhang, T. y Wang, P. (2012). Waste printed circuit boards nonmetallic powder as admixture in cement mortar. *Materials and Structures*, 45(10), 1439-1445. doi:10.1617/s11527-012-9843-0
53. Xiu, F. R. y Zhang, F. S. (2010). Materials recovery from waste printed circuit boards by supercritical methanol. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1-3), 628-634. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.01.131
54. Yamawaki, T. (2004). The gasification recycling technology of plastics WEEE containing brominated flame retardants. *Fire and Materials*, 27(6), 315-319. doi:10.1002/fam.833
55. Yokoyama, S. e Iji, M. (2005). Recycling of thermosetting plastic waste from electronic component production processes. En *Electronics and the Environment International Symposium*, (pp. 132-137). Orlando, Estados Unidos: IEEE.
56. Zheng, Y. Shen, Z. Cai, C. Ma, S. y Xing, Y. (2009). The reuse of nonmetals recycled from waste printed circuit boards as reinforcing fillers in the polypropylene composites. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 600-606. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.07.008

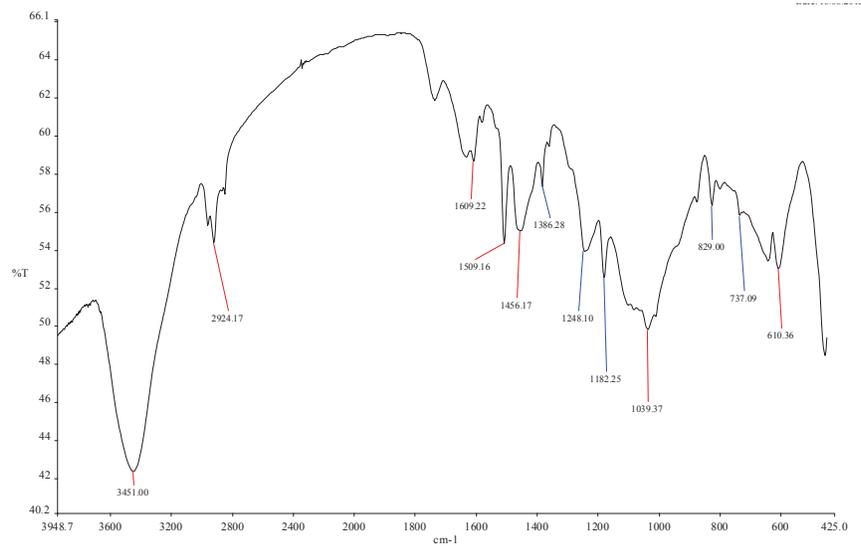
## **ANEXOS**

## ANEXO I

### RESULTADOS DE ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO



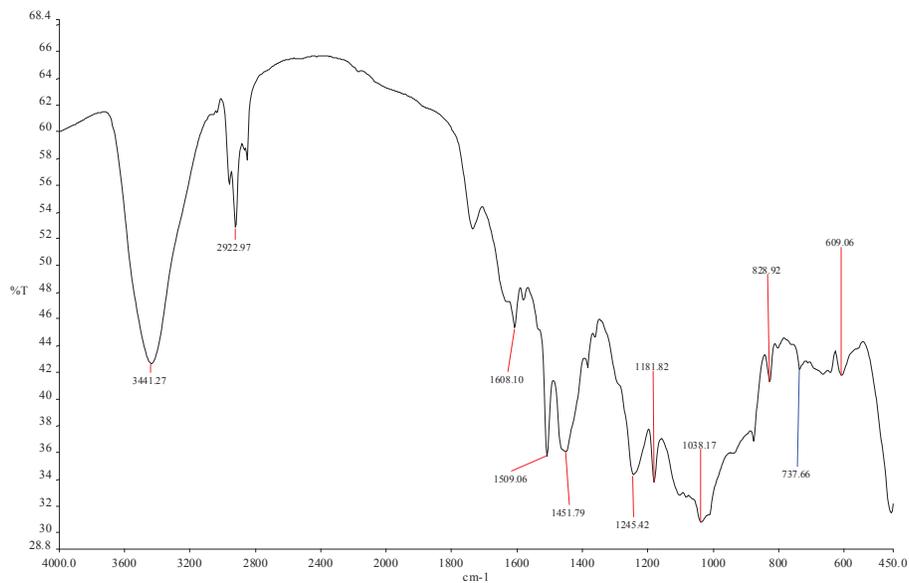
**Figura AI. 1.** Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm para la segunda muestra



**Figura AI. 2.** Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm para la tercera muestra



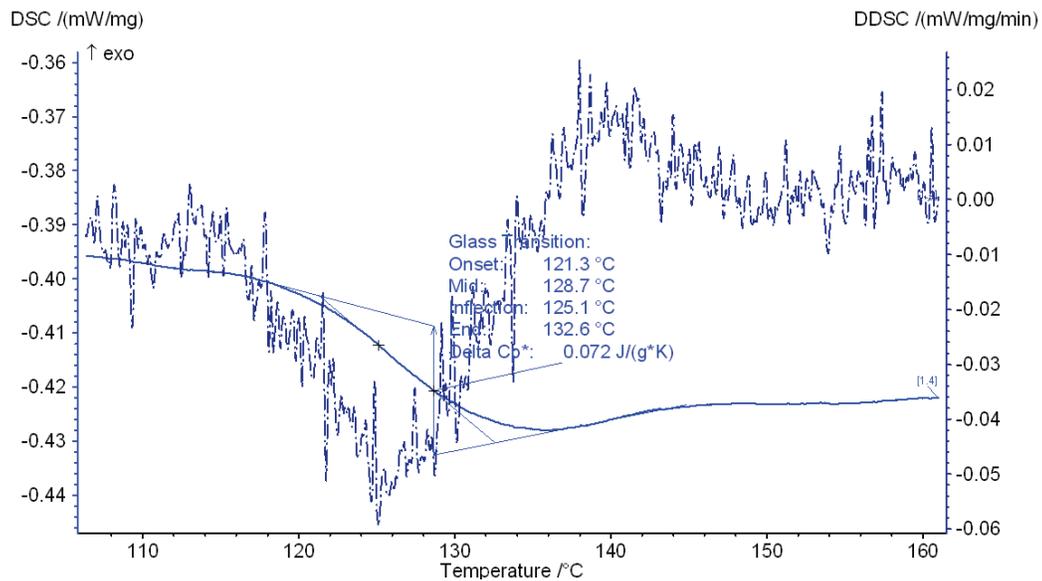
**Figura AI. 3.** Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula menor a 0,075 mm para la segunda muestra



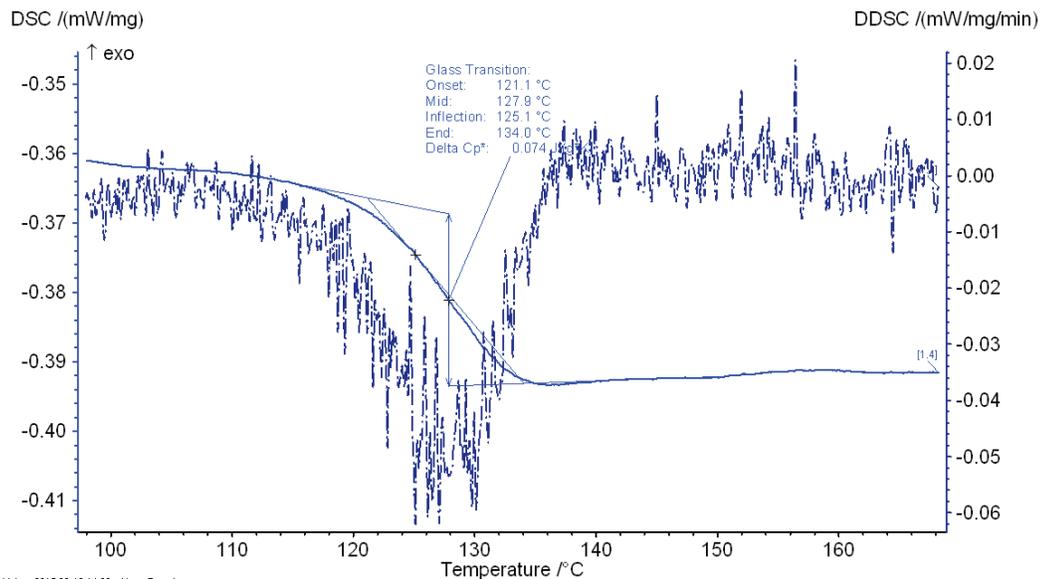
**Figura AI. 4.** Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula menor a 0,075 mm para la tercera muestra

## ANEXO II

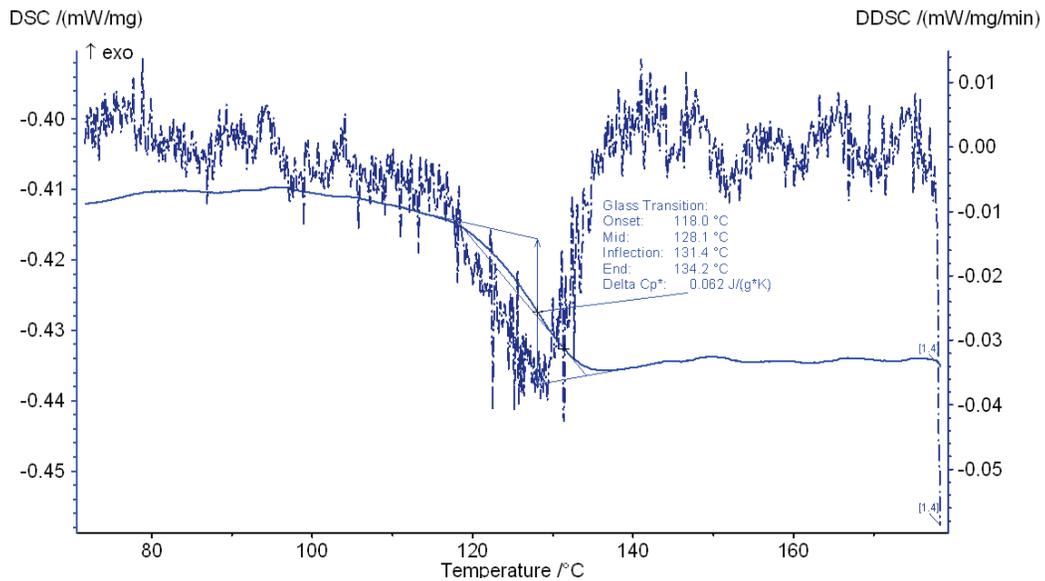
### RESULTADOS DE CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO



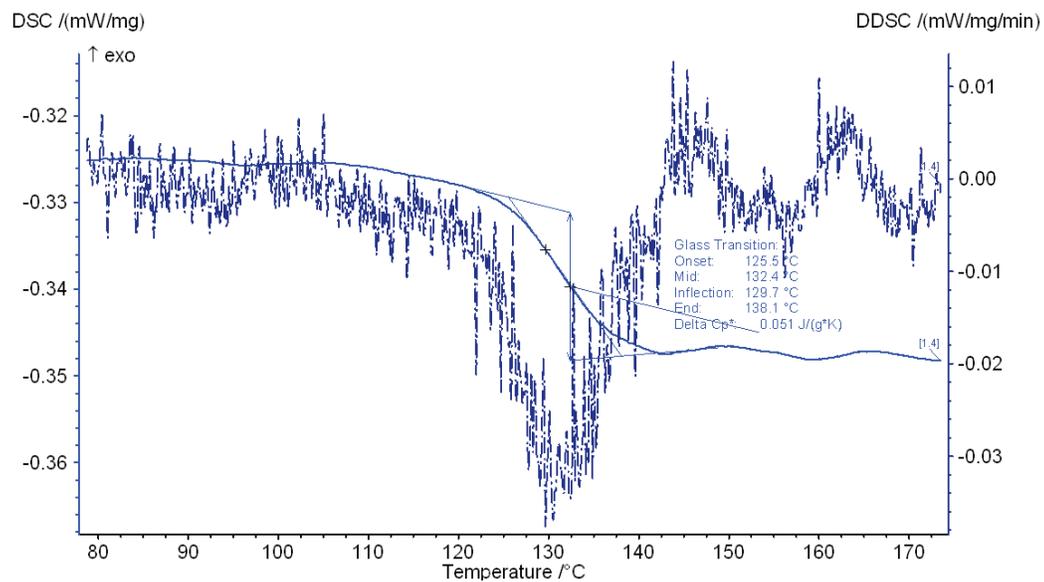
**Figura AII. 1.** Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm para la segunda muestra



**Figura AII. 2.** Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm para la tercera muestra



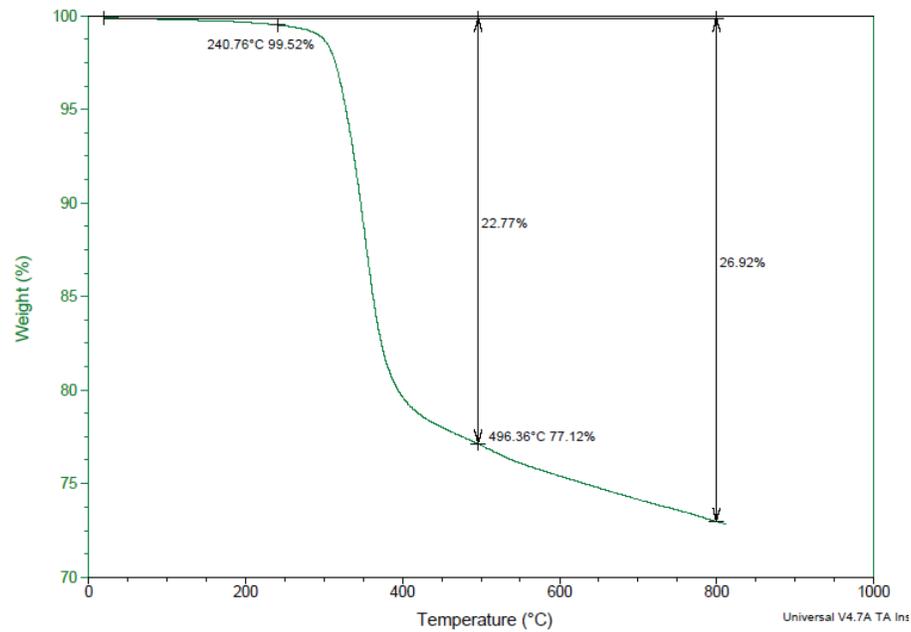
**Figura AII. 3.** Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula menor a 0,075 mm para la segunda muestra



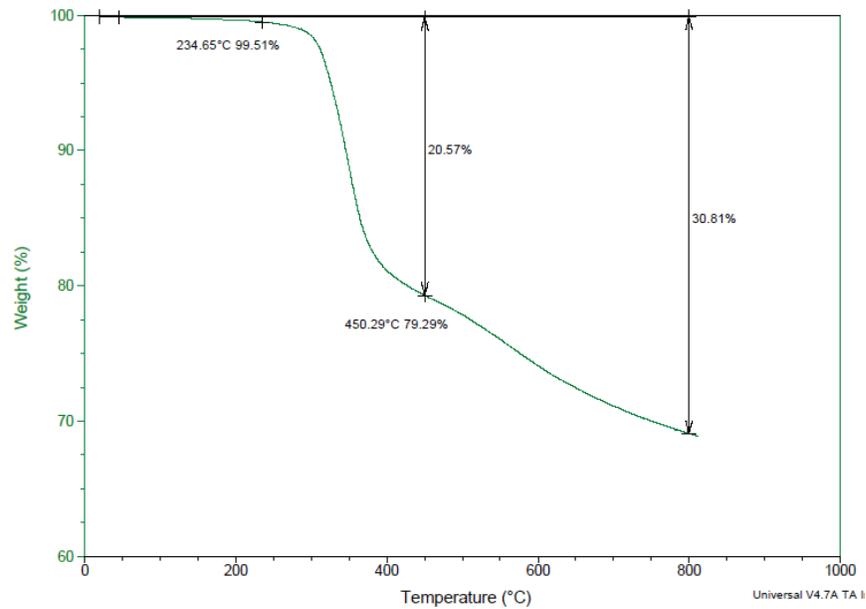
**Figura AII. 4.** Termograma de la fracción no metálica con tamaño de partícula menor a 0,075 mm para la tercera muestra

### ANEXO III

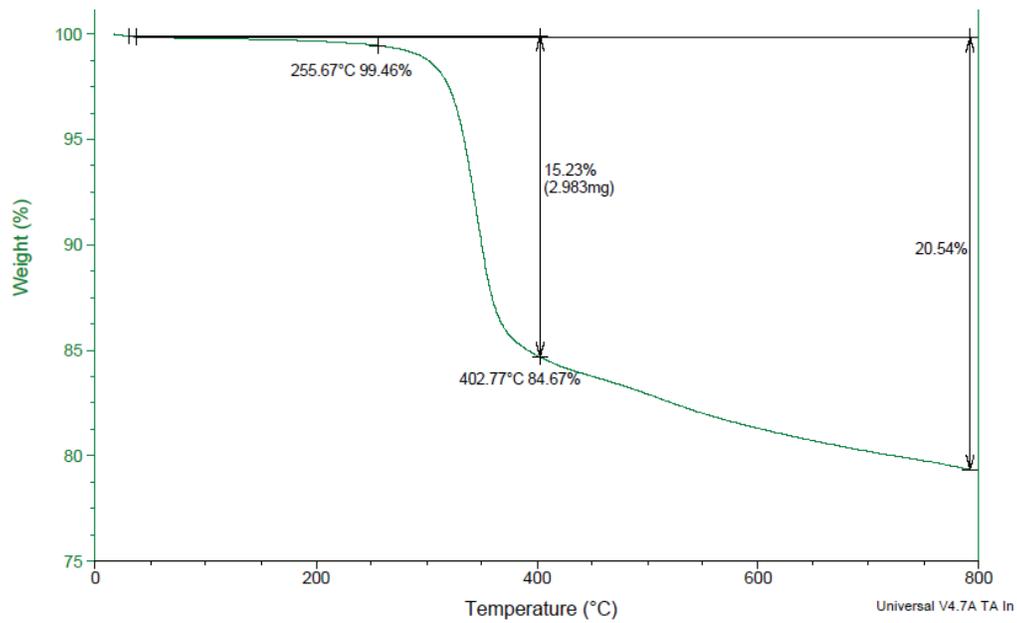
## RESULTADOS DE TERMOGRAVIMETRÍA



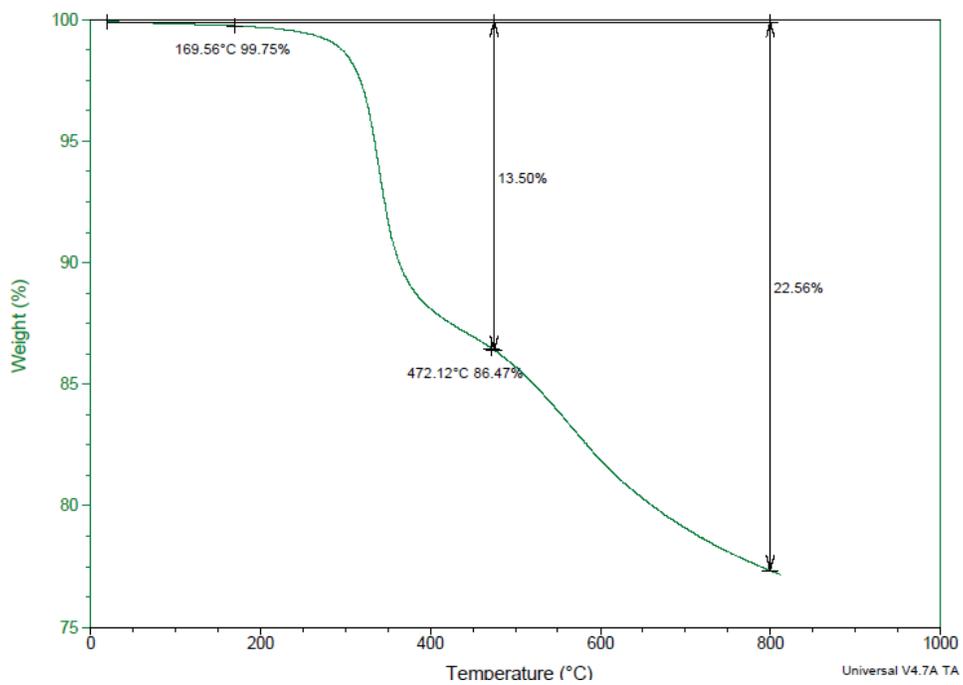
**Figura AIII. 1.** Diagrama termogravimétrico obtenido de la segunda muestra con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm



**Figura AIII. 2** Diagrama termogravimétrico obtenido de la tercera muestra con tamaño de partícula entre 0,15 mm y 0,075 mm



**Figura AIII. 3.** Diagrama termogravimétrico obtenido de la segunda muestra con tamaño de partícula menor a 0,075 mm



**Figura AIII. 4.** Diagrama termogravimétrico obtenido de la tercera muestra con tamaño de partícula menor a 0,075 mm

## ANEXO IV

### RESULTADOS COMPLETOS DE PRUEBAS DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN

Desde la Tabla AIV.1 hasta la Tabla AIV.28 se muestran todos los resultados obtenidos en las pruebas de tracción y flexión para ambos materiales compuestos realizados en el presente trabajo.

**Tabla AIV. 1.** Resultados del ensayo de tracción del material de polimetilmetacrilato puro

Número de muestra	Desplazamiento al pico [mm]	Deformación al pico [%]	Carga al pico [kN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	4,70	7,23	1,60	41,21	1 141,00
2	3,70	5,69	1,49	34,73	1 290,00
3	3,64	5,60	1,77	41,93	1 400,00
4	3,47	5,34	1,47	45,87	1 408,00
5	3,80	5,85	1,27	35,32	1 312,00
6	4,00	6,15	1,39	36,21	1 332,00
7	4,80	7,39	1,38	36,27	1 179,00
8	4,20	6,46	1,49	37,76	1 364,00
9	4,10	6,31	1,42	36,15	1 291,00
10	3,50	5,39	1,38	37,35	1 503,00
<b>Promedio</b>	3,99	6,14	1,47	38,28	1 322,00
<b>Desviación Estándar</b>	0,47	0,72	0,14	3,57	107,19

**Tabla AIV. 2.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	2,10	3,23	1,42	36,85	1 698,00
2	2,41	3,71	1,68	43,74	1 666,00
3	2,19	3,37	1,62	42,56	1 855,00
4	3,13	4,81	1,55	40,14	1 188,00
5	4,28	6,59	1,63	42,45	1 194,00
6	6,10	9,39	1,53	39,84	1 431,00
7	2,83	4,35	1,93	47,25	1 709,00
8	2,74	4,21	1,74	49,87	1 960,00
9	3,23	4,97	1,84	46,60	1 568,00
10	2,62	4,04	1,83	47,12	1 699,00
<b>Promedio</b>	3,16	4,87	1,68	43,64	1 596,80
<b>Desviación Estándar</b>	1,21	1,86	0,16	4,06	256,98

**Tabla AIV. 3.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	1,34	2,06	0,73	19,58	1 488,00
2	1,47	2,26	0,64	17,77	1 222,00
3	1,16	1,78	0,52	15,57	1 442,00
4	1,31	3,28	1,09	27,93	1 363,00
5	1,54	3,84	1,13	26,45	1 239,00
6	1,35	3,38	1,08	27,62	1 458,00
7	1,60	3,54	1,30	20,64	1 290,00
8	1,30	3,25	1,03	20,78	1 327,00
9	1,30	3,25	1,04	21,69	1 404,00
10	1,60	4,26	1,04	16,89	1 670,00
<b>Promedio</b>	1,40	3,09	0,96	21,49	1 390,30
<b>Desviación Estándar</b>	0,15	0,80	0,25	4,45	133,85

**Tabla AIV. 4.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	0,92	1,42	0,52	14,89	1 368,00
2	1,40	2,15	0,03	0,80	1 564,00
3	1,78	2,73	0,96	16,50	381,40
4	1,10	1,69	0,03	0,74	1 725,00
5	1,26	1,93	0,74	15,69	1 525,00
6	1,59	2,44	1,06	15,99	1 828,00
7	1,65	2,05	0,89	16,58	1 659,00
8	1,85	2,06	1,05	16,58	1 365,00
9	1,16	1,45	0,96	13,56	1 260,00
10	1,58	1,65	0,65	13,50	1 654,00
<b>Promedio</b>	1,43	1,96	0,69	12,48	1 432,94
<b>Desviación Estándar</b>	0,31	0,42	0,39	6,28	409,81

**Tabla AIV. 5.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	2,41	3,70	1,51	46,06	1 986,00
2	3,01	4,63	1,76	47,68	1 824,00
3	2,59	3,98	1,73	48,19	1 949,00
4	2,80	4,31	1,90	50,51	1 910,00
5	1,81	2,79	1,48	39,65	1 675,00
6	3,06	4,71	1,32	37,86	1 613,00
7	1,45	2,23	1,14	30,54	1 851,00
8	1,49	2,45	1,30	40,58	1 865,00
9	2,91	4,47	1,63	45,44	1 847,00
10	2,38	3,65	1,43	40,58	1 803,00
<b>Promedio</b>	2,39	3,69	1,52	42,71	1 832,30
<b>Desviación Estándar</b>	0,61	0,91	0,24	6,00	114,83

**Tabla AIV. 6.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	2,70	4,15	1,12	33,32	1 712,00
2	1,77	2,72	1,15	36,85	1 947,00
3	2,60	4,00	1,24	35,64	1 980,00
4	2,18	3,36	1,44	42,81	1 916,00
5	1,43	2,20	1,14	31,52	1 947,00
6	1,12	1,73	0,91	25,33	1 945,00
7	1,28	1,98	1,12	30,73	1 995,00
8	1,99	3,06	1,19	31,00	1 756,00
9	2,70	4,15	1,12	33,32	1 712,00
10	1,77	2,72	1,15	36,85	1 947,00
<b>Promedio</b>	1,95	3,01	1,16	33,74	1 885,70
<b>Desviación Estándar</b>	0,58	0,90	0,13	4,69	112,40

**Tabla AIV. 7.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	3,01	4,64	1,79	48,90	1 934,00
2	2,28	3,50	1,52	42,99	1 771,00
3	2,71	4,16	1,82	48,88	1 952,00
4	2,73	4,20	1,70	42,24	1 981,00
5	3,03	4,67	2,00	46,37	1 797,00
6	2,41	3,71	1,64	44,06	1 742,00
7	3,55	5,45	1,62	48,82	1 917,00
8	1,98	3,05	1,47	41,46	1 971,00
9	3,27	5,04	1,57	49,06	2 099,00
10	3,10	4,77	1,57	44,59	1 754,00
<b>Promedio</b>	2,81	4,32	1,67	45,74	1 891,80
<b>Desviación Estándar</b>	0,48	0,74	0,16	3,04	119,35

**Tabla AIV. 8.** Resultados del ensayo de tracción del material de resina poliéster insaturada puro

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	1,63	2,54	0,84	20,36	1 198,00
2	1,70	2,58	0,95	21,78	1 298,00
3	1,59	2,38	0,83	20,55	1 225,00
4	1,54	2,30	0,86	19,43	1 072,70
5	1,90	2,93	0,80	21,94	1 265,00
6	1,41	2,17	0,87	20,36	1 027,10
7	1,77	2,26	0,66	20,57	1 194,00
8	1,51	2,32	0,84	23,81	1 018,00
9	1,70	2,38	0,88	24,80	1 077,40
10	1,78	2,21	0,83	22,79	1 036,00
<b>Promedio</b>	1,65	2,40	0,84	21,64	1 141,12
<b>Desviación Estándar</b>	0,15	0,23	0,07	1,72	105,92

**Tabla AIV. 9.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	1,50	2,31	0,55	9,51	1 036,00
2	0,83	1,27	0,42	7,25	628,80
3	1,30	2,00	0,40	11,47	1 148,00
4	1,49	2,30	0,37	6,61	1 016,00
5	1,32	2,03	0,72	10,64	716,70
6	1,19	1,84	0,53	9,91	803,30
7	1,50	2,31	0,60	10,75	1 007,90
8	1,10	1,69	0,55	10,53	1 047,00
9	1,10	1,69	0,44	8,54	1 128,00
10	1,60	2,46	0,44	7,42	1 048,00
<b>Promedio</b>	1,29	1,99	0,50	9,26	957,97
<b>Desviación Estándar</b>	0,24	0,37	0,11	1,70	177,48

**Tabla AIV. 10.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	1,80	2,54	0,85	24,62	1 554,00
2	1,30	2,00	0,93	17,63	1 314,00
3	1,10	1,23	0,64	17,31	2 115,00
4	0,59	1,40	0,47	10,00	1 669,00
5	1,24	1,13	0,42	9,06	1 067,00
6	1,80	3,04	0,85	24,62	1 554,00
7	1,30	2,00	0,93	17,63	1 414,00
8	0,80	1,23	0,64	17,31	1 615,00
9	0,79	1,90	0,47	10,00	1 669,00
10	0,74	1,13	0,42	9,06	1 517,00
<b>Promedio</b>	1,14	1,76	0,66	15,72	1 548,80
<b>Desviación Estándar</b>	0,43	0,65	0,21	6,01	270,88

**Tabla AIV. 11.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	1,82	2,80	0,64	12,64	782,40
2	1,38	2,13	0,44	8,64	266,60
3	0,98	1,51	0,20	3,73	298,90
4	1,19	1,84	0,53	9,91	403,30
5	1,50	2,31	0,60	10,75	607,90
6	1,82	2,80	0,64	12,64	982,40
7	1,38	2,13	0,44	8,64	266,60
8	0,98	1,51	0,30	5,73	498,90
9	1,19	1,94	0,53	9,91	508,30
10	1,65	2,31	0,50	8,95	607,90
<b>Promedio</b>	1,39	2,13	0,48	9,15	522,32
<b>Desviación Estándar</b>	0,31	0,45	0,14	2,78	233,23

**Tabla AIV. 12.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	1,32	1,81	0,42	13,12	1 623,00
2	1,31	1,93	0,48	11,26	1 074,00
3	1,06	1,55	0,48	12,56	1 286,00
4	1,24	1,53	0,41	12,67	1 404,00
5	1,36	2,18	0,43	16,42	1 030,00
6	1,20	2,09	0,59	15,28	1 053,00
7	1,09	1,91	0,50	12,75	1 307,00
8	1,12	2,09	0,60	15,43	1 481,00
9	1,37	1,87	0,56	10,68	1 175,00
10	0,97	1,59	0,65	14,01	1 433,00
<b>Promedio</b>	1,20	1,85	0,51	13,42	1 286,60
<b>Desviación Estándar</b>	0,14	0,23	0,08	1,85	201,29

**Tabla AIV. 13.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	2,40	2,77	0,96	17,75	1 248,30
2	2,20	3,92	0,79	17,87	1 100,00
3	2,30	3,54	0,64	17,05	1 055,00
4	2,20	3,85	0,72	15,42	1 101,00
5	2,52	3,34	0,78	17,40	1 384,00
6	2,75	3,93	0,78	19,67	1 149,00
7	2,50	3,85	0,74	13,24	1 149,00
8	2,30	3,54	0,89	18,95	1 013,00
9	2,10	3,23	0,70	17,97	1 049,00
10	2,10	3,54	0,80	20,67	1 004,00
<b>Promedio</b>	2,33	3,55	0,78	17,60	1 125,23
<b>Desviación Estándar</b>	0,21	0,37	0,09	2,10	116,67

**Tabla AIV. 14.** Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo de Young [MPa]
1	2,05	3,15	0,72	16,47	1 302,00
2	2,50	3,02	0,69	19,00	1 106,00
3	2,30	3,54	0,84	18,42	1 014,00
4	2,60	4,00	0,58	17,01	1 065,00
5	2,10	3,23	0,76	18,59	1 013,00
6	1,85	3,68	0,90	15,22	1 078,00
7	2,60	3,88	0,75	17,46	1 315,00
8	2,23	3,44	0,81	19,84	1 225,00
9	2,05	3,69	0,77	18,34	1 008,00
10	2,20	3,22	0,85	13,24	1 211,00
<b>Promedio</b>	2,24	3,49	0,77	17,36	1 133,70
<b>Desviación Estándar</b>	0,25	0,33	0,09	1,97	119,63

**Tabla AIV. 15.** Resultados del ensayo de flexión del material de polimetilmetacrilato puro

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	7,40	0,06	0,09	50,71	906,00
2	7,34	0,06	0,09	53,52	1 143,00
3	7,32	0,06	0,10	57,88	1 200,00
4	8,75	0,07	0,10	60,09	1 107,00
5	7,53	0,06	0,10	61,67	1 128,00
6	8,05	0,06	0,11	65,84	1 167,00
7	8,32	0,07	0,12	67,40	1 177,00
8	8,42	0,06	0,11	65,84	1 167,00
9	8,20	0,07	0,11	64,72	1 076,00
10	8,99	0,07	0,10	65,15	1 159,00
<b>Promedio</b>	8,03	0,06	0,10	61,28	1 123,00
<b>Desviación Estándar</b>	0,61	0,00	0,01	5,69	84,32

**Tabla AIV. 16.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	5,87	0,04	0,12	76,69	1 622,00
2	7,02	0,05	0,13	74,25	1 424,00
3	6,52	0,05	0,11	55,99	1 111,00
4	7,14	0,05	0,14	78,82	1 402,00
5	5,21	0,04	0,12	69,14	1 679,00
6	6,51	0,05	0,12	59,20	1 391,00
7	7,60	0,05	0,12	58,27	1 550,00
8	6,84	0,05	0,12	77,30	1 476,00
9	6,48	0,05	0,12	67,40	1 295,00
10	6,78	0,05	0,11	74,68	1 412,00
<b>Promedio</b>	6,60	0,05	0,12	69,17	1 436,20
<b>Desviación Estándar</b>	0,67	0,00	0,01	8,61	162,50

**Tabla AIV. 17.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	5,60	0,04	0,12	72,90	1 548,00
2	5,24	0,04	0,10	67,54	1 707,00
3	5,07	0,04	0,07	50,44	1 766,00
4	6,00	0,05	0,12	76,39	1 517,00
5	7,35	0,05	0,11	75,87	1493,00
6	4,43	0,04	0,07	41,50	1 547,00
7	5,34	0,04	0,09	61,18	1 416,00
8	4,52	0,04	0,09	43,88	1 158,00
9	5,31	0,04	0,09	54,30	1 464,00
10	5,12	0,04	0,09	49,13	1 384,00
<b>Promedio</b>	5,40	0,04	0,10	59,31	1 500,00
<b>Desviación Estándar</b>	0,83	0,01	0,02	13,27	169,06

**Tabla AIV. 18.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	3,33	0,03	0,03	24,17	628,90
2	5,92	0,06	0,13	65,60	1 354,00
3	7,26	0,06	0,10	67,87	1 315,00
4	5,83	0,04	0,13	73,90	1 549,00
5	6,78	0,05	0,09	57,04	1 184,00
6	5,60	0,04	0,12	61,43	1 339,00
7	6,02	0,05	0,10	63,56	1 456,00
8	6,01	0,05	0,09	63,02	1 482,00
9	6,50	0,05	0,13	64,15	1 358,00
10	5,70	0,04	0,09	61,75	1 559,00
<b>Promedio</b>	5,89	0,05	0,10	60,25	1 322,49
<b>Desviación Estándar</b>	1,04	0,01	0,03	13,43	269,43

**Tabla AIV. 19.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	7,58	0,06	0,10	67,77	1 258,00
2	9,39	0,07	0,11	70,28	1 277,00
3	8,92	0,07	0,09	59,90	1 267,00
4	7,51	0,06	0,08	60,04	1 230,00
5	8,77	0,07	0,12	73,53	1 224,00
6	6,68	0,05	0,12	74,37	1 541,00
7	7,37	0,05	0,11	76,36	1 435,00
8	6,89	0,05	0,10	74,54	1 411,00
9	9,06	0,07	0,11	75,97	1 338,00
10	7,71	0,06	0,11	75,98	1 356,00
<b>Promedio</b>	7,99	0,06	0,10	70,87	1 333,70
<b>Desviación Estándar</b>	0,96	0,01	0,01	6,35	103,23

**Tabla AIV. 20.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 15% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	5,23	0,06	0,09	59,18	1 639,00
2	7,70	0,06	0,08	61,39	1 167,00
3	8,07	0,06	0,08	68,07	1 541,00
4	7,78	0,05	0,10	65,43	1 649,00
5	8,55	0,06	0,09	75,69	1 652,00
6	8,27	0,05	0,10	72,97	1 440,00
7	7,19	0,05	0,10	77,53	1 582,00
8	8,05	0,06	0,10	64,05	1 189,00
9	4,75	0,04	0,08	59,47	1 643,00
10	7,60	0,06	0,10	70,49	1 418,00
<b>Promedio</b>	7,32	0,05	0,09	67,43	1 492,00
<b>Desviación Estándar</b>	1,29	0,01	0,01	6,62	185,82

**Tabla AIV. 21.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de polimetilmetacrilato y 10% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	6,57	0,05	0,14	83,80	1 741,00
2	8,38	0,06	0,14	83,21	1 565,00
3	6,00	0,05	0,13	75,98	1 578,00
4	7,73	0,06	0,13	71,02	1 395,00
5	6,54	0,05	0,12	79,36	1 777,00
6	6,84	0,05	0,12	69,65	1 375,00
7	6,41	0,05	0,13	85,04	2 121,00
8	6,16	0,05	0,12	72,12	1 496,00
9	8,31	0,07	0,14	80,85	1 448,00
10	8,25	0,07	0,13	77,93	1 453,00
<b>Promedio</b>	7,12	0,05	0,13	77,90	1 594,90
<b>Desviación Estándar</b>	0,95	0,01	0,01	5,55	229,08

**Tabla AIV. 22.** Resultados del ensayo de flexión del material de resina poliéster insaturada puro

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	6,91	0,04	0,10	58,23	1 284,00
2	7,13	0,04	0,10	60,19	1 177,00
3	6,37	0,04	0,10	59,30	1 316,00
4	6,22	0,04	0,10	59,69	1 367,00
5	6,51	0,04	0,10	59,47	1 398,00
6	7,30	0,04	0,09	51,61	1 377,00
7	6,75	0,04	0,09	60,19	1 334,00
8	7,55	0,04	0,10	59,19	1 232,00
9	7,26	0,04	0,10	59,03	1 268,00
10	6,56	0,04	0,10	55,19	1 611,00
<b>Promedio</b>	6,86	0,04	0,10	58,21	1 336,40
<b>Desviación Estándar</b>	0,44	0,00	0,00	2,73	118,29

**Tabla AIV. 23.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	3,64	0,02	0,10	60,19	2 832,00
2	2,77	0,02	0,10	60,19	2 871,00
3	3,74	0,02	0,08	49,63	2 490,00
4	3,01	0,02	0,09	55,82	2 541,00
5	3,80	0,02	0,08	47,42	1 583,00
6	3,06	0,02	0,08	46,82	2 477,00
7	3,24	0,02	0,10	58,96	2 478,00
8	2,97	0,02	0,10	58,35	2 632,00
9	3,53	0,02	0,09	53,37	2 064,00
10	2,85	0,01	0,06	38,16	1 163,00
<b>Promedio</b>	3,26	0,02	0,09	52,89	2 313,10
<b>Desviación Estándar</b>	0,38	0,00	0,01	7,28	551,50

**Tabla AIV. 24.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	3,86	0,02	0,07	50,19	2 526,00
2	3,09	0,02	0,10	50,19	2 773,00
3	3,45	0,02	0,10	40,19	2 732,00
4	3,21	0,03	0,07	41,92	2 169,00
5	3,93	0,02	0,10	58,63	3 039,00
6	3,51	0,03	0,07	59,25	1 783,00
7	4,23	0,02	0,08	45,98	2 237,00
8	3,04	0,02	0,07	46,25	1 316,10
9	4,91	0,03	0,08	47,41	2 187,00
10	4,31	0,03	0,04	25,36	1 549,00
<b>Promedio</b>	3,75	0,02	0,08	46,54	2 231,11
<b>Desviación Estándar</b>	0,61	0,00	0,02	9,69	557,11

**Tabla AIV. 25.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de tamaño 0,15 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	3,80	0,02	0,08	47,42	1 583,00
2	1,85	0,01	0,06	38,16	1 163,00
3	3,20	0,02	0,06	34,17	1 083,00
4	3,21	0,02	0,08	39,28	1 589,00
5	2,93	0,02	0,06	48,63	1 039,00
6	3,01	0,02	0,08	55,82	1 540,00
7	3,24	0,02	0,07	38,96	1 478,00
8	2,97	0,02	0,10	58,35	1 632,00
9	3,04	0,02	0,04	26,25	916,10
10	2,55	0,01	0,04	31,24	813,00
<b>Promedio</b>	2,98	0,02	0,07	41,83	1 283,61
<b>Desviación Estándar</b>	0,51	0,00	0,02	10,48	312,51

**Tabla AIV. 26.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 20% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	7,60	0,04	0,07	42,75	1 222,00
2	7,23	0,05	0,08	45,32	1 241,00
3	8,48	0,04	0,06	36,13	1 051,70
4	7,48	0,04	0,08	46,29	1 231,00
5	7,51	0,04	0,07	43,98	1 371,00
6	7,79	0,05	0,08	48,95	1 364,00
7	8,25	0,05	0,06	36,55	926,30
8	7,50	0,04	0,07	35,54	935,40
9	7,64	0,05	0,07	48,09	1 208,00
10	7,14	0,04	0,06	38,63	1 146,00
<b>Promedio</b>	7,66	0,05	0,07	42,22	1 169,64
<b>Desviación Estándar</b>	0,42	0,01	0,01	5,12	156,33

**Tabla AIV. 27.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 30% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	4,99	0,03	0,08	47,01	1 763,00
2	5,29	0,03	0,08	48,19	1 680,00
3	5,92	0,03	0,09	51,13	1 431,00
4	4,25	0,02	0,08	50,67	1 907,00
5	5,34	0,03	0,08	46,89	1 555,00
6	5,44	0,03	0,08	40,19	1 653,00
7	4,68	0,03	0,09	51,88	1 694,00
8	5,84	0,03	0,08	49,04	1 409,00
9	5,34	0,03	0,08	45,01	1 262,00
10	5,22	0,03	0,09	47,28	1 638,00
<b>Promedio</b>	5,23	0,03	0,08	47,73	1 599,20
<b>Desviación Estándar</b>	0,50	0,00	0,00	3,42	189,04

**Tabla AIV. 28.** Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de resina poliéster insaturada y 35% de residuos de tamaño 0,075 mm

Número de muestra	Desplazamiento [mm]	Deformación [%]	Carga máxima [KN]	Esfuerzo [MPa]	Módulo [MPa]
1	4,14	0,02	0,10	60,19	2 250,00
2	4,16	0,02	0,10	59,96	1 787,00
3	4,49	0,03	0,10	60,19	1 568,00
4	4,69	0,03	0,09	51,78	1 777,00
5	3,60	0,02	0,10	60,19	2 385,00
6	4,90	0,03	0,10	60,19	1 896,00
7	4,70	0,03	0,10	59,40	1 962,00
8	4,16	0,03	0,10	60,19	1 737,00
9	4,43	0,03	0,09	53,10	1 726,00
10	3,69	0,03	0,10	59,90	2 317,00
<b>Promedio</b>	4,30	0,03	0,10	58,51	1 940,50
<b>Desviación Estándar</b>	0,43	0,00	0,01	3,22	281,67

## ANEXO V

### ANÁLISIS ANOVA

En las siguientes tablas se muestran los resultados del análisis ANOVA, realizado mediante en software statgraphics, para cada uno de los parámetros de las propiedades mecánicas para cada material compuesto estudiado. En cada tabla se muestra el valor-P el cual indica que una variable es estadísticamente significativa cuando su valor es menor a 0.05 para un parámetro con un nivel de confianza del 95%.

**Tabla AV. 1.** Valor-P para cada parámetro estudiado en los ensayos de tracción del material compuestos de polimetilmetacrilato

Variable	Valor -P				
	Desplazamiento al pico	Deformación al pico	Carga al pico	Esfuerzo	Módulo
<b>Concentración</b>	0,0000	0,0005	0,0000	0,0000	0,5372
<b>Tamaño de partícula</b>	0,0243	0,0175	0,0000	0,0000	0,0000

**Tabla AV. 2.** Valor-P para cada parámetro estudiado en los ensayos de flexión del material compuestos de polimetilmetacrilato

Variable	Valor -P				
	Desplazamiento al pico	Deformación al pico	Carga al pico	Esfuerzo	Módulo
<b>Concentración</b>	0,0079	0,0429	0,0000	0,0366	0,1920
<b>Tamaño de partícula</b>	0,0000	0,0000	0,0436	0,0005	0,2855

**Tabla AV. 3.** Valor-P para cada parámetro estudiado en los ensayos de tracción del material compuestos de resina poliéster insaturada

Variable	Valor -P				
	Desplazamiento al pico	Deformación al pico	Carga al pico	Esfuerzo al pico	Módulo
<b>Concentración</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Tamaño de partícula</b>	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0012

**Tabla AV. 4.** Valor-P para cada parámetro estudiado en los ensayos de flexión del material compuestos de resina poliéster insaturada

Variable	Valor -P				
	Desplazamiento al pico	Deformación al pico	Carga al pico	Esfuerzo al pico	Módulo
<b>Concentración</b>	0,0000	0,0000	0,0095	0,0125	0,3932
<b>Tamaño de partícula</b>	0,0000	0,0000	0,0259	0,0354	0,1560

## ANEXO VI

## PROPIEDADES DE DOMOS Y BALDOSAS COMERCIALIZADAS

Tabla AVI. 1. Propiedades mecánicas de domos comercializados marca Stabilit

Propiedades mecánicas	UNIDADES	NORMAS ASTM	COLADO	EXTRUIDO	EXTRUIDO ALTO IMPACTO
Resistencia en el límite elástico	kg/cm <sup>2</sup>	D-638			
Resistencia a la rotura	kg/cm <sup>2</sup>	D-638	562-773	492-773	386
Elongación a la rotura	%	D-638	4,5	5,0	
Módulo de elasticidad	kg/cm <sup>2</sup>	D-638	24.600-31.000	23000-31.000	
<b>Flexión</b>					
Resistencia en el límite elástico o rotura	kg/cm <sup>2</sup>	D-790	840-1.300	740-1.300	562
Módulo de elasticidad	kg/cm <sup>2</sup>	D-790	27.500-33.400	22.800-32.300	17.500
<b>Compresión</b>					
Resistencia a la compresión (ruptura)	kg/cm <sup>2</sup>	D-695	773-1.330	740-1260	
Módulo de compresión	kg/cm <sup>2</sup>	D-695	27.500-33.300	26.000-32.300	
<b>Impacto</b>					
Resistencia al impacto IZOD	kg/cm <sup>2</sup>	D-256 A	1,9	2,4	6,52
<b>Dureza</b>					
Rockwell		D-795	M-80-M-100	M-68 M-105	R-99
Barcol		D-2583	50	50	35

Tabla AVI. 2. Propiedades mecánicas de las baldosa para uso interior, según la norma UNE 127-020

		USO			
		Normal	Intensivo	Industrial	
<b>Valores mínimos UNE 127020</b>	Resistencia a la flexión (Mpa)	Valor medio	> 5,0	> 5,0	> 5,0
		Valor individual	> 4,0	> 4,0	> 4,0
	Carga a la rotura (kN)	Superficie ≤ 100 cm	> 2,5	> 3,0	> 3,6
		Superficie ≥ 100 cm	> 3,0	> 3,9	> 4,7
	Resistencia al impacto (mm)		> 400	> 500	> 600
	Desgaste por abrasión (mm)		> 25	> 23	< 21

## ANEXO VII

### CÁLCULOS PARA EL BALANCE DE MASA

#### 1. Cálculo de la cantidad de tarjetas de circuitos impresos que se encuentran en os residuos electrónicos.

Según Goodship y Stevels aproximadamente un 8% de los residuos de residuos electrónicos corresponden a las tarjetas de circuitos impresos (PCB por sus siglas en inglés). Por lo tanto si se van a recolectar 600 toneladas por mes de residuos electrónicos la cantidad de tarjetas de circuitos impresos a procesar será:

$$600 \text{ ton RE} \times 0.08 = 48 \text{ ton PCB}$$

#### 2. Cálculo de la cantidad de tarjetas de circuito impreso que que pasan por la corriente 5 y 6 (PFD)

Las 48 toneladas de PCB que atraviesan el tamiz corresponderán al 43.42% (ver Tabla 3.2) de las PCBs que ingresan al tamiz, por lo tanto el 100% corresponderá a la cantidad de residuos que se encuentran en la corriente 5.

$$48 \text{ ton PCB (7)} \times \frac{100}{43,42} = 110,55 \text{ ton PCB (5)}$$

$$110,55 \text{ ton PCB (5)} - 48 \text{ ton PCB (7)} = 62,5 \text{ ton (6)}$$

#### 3. Cálculo de la cantidad de agua añadida a la separación gravimétrica

Se estima que se debe añadir aproximadamente un 30% del total de material que ingresa a la separación gravimétrica para facilitar dicha separación.

$$48 \text{ ton PCB (7)} \times 0.3 = 9,60 \text{ ton de agua (8)}$$

#### 4. Cálculo de la fracción metálica y no metálica

En la Tabla 3.4 se puede observar que se obtuvo un 32,61% de fracción metálica (FM) y un 67,39% de fracción no metálica (FNM).

$$48 \text{ ton PCb} \times 0,3261 = 15,65 \text{ ton FM}$$

$$48 \text{ ton PCB} \times 0,6739 = 32,35 \text{ ton FNM}$$

#### 5. Cálculo de la cantidad de material con tamaño <0,075mm

En la Tabla 3.5 se puede observar que el 26,42% del material que ingresa al segundo tamiz tiene un tamaño menor a 0,075 mm, por ende el 73,58% del material va a ser enviado al molino de discos será el siguiente:

$$32,5 \text{ ton FNM} \times 0,7358 = 23,80 \text{ ton FNM en el molino de discos}$$

#### 6. Cálculo de la cantidad de material utilizado para la producción de materiales compuestos de polimetilmetacrilato y materiales compuestos de resina poliéster insaturada

La propuesta inicial del proyecto fue utilizar el 30% de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos para la producción de materiales compuestos de polimetilmetacrilato y el restante 70% para materiales compuestos de resina poliéster insaturada. Se destina mayor cantidad de residuos para los compuestos de resina debido a que en ellos se utiliza una mayor cantidad de residuos para su producción (35%).

Residuos destinados a materiales compuestos de polimetilmetacrilato:

$$32,35 \text{ ton FNM} \times 0,3 = 9,70 \text{ ton FNM para compuestos PMMA}$$

Residuos destinados a materiales compuestos de resina poliéster insaturada:

$$32,35 \text{ ton FNM} \times 0.7 = 22,64 \text{ ton FNM para compuestos RPI}$$

**7. Cálculo de la cantidad polimetilmetacrilato, resina poliéster insaturada, peróxido de benzoilo, octoato de cobalto y meck peróxido utilizados**

El material compuesto está formado por 20% de residuos y 80% de polimetilmetacrilato por lo tanto la cantidad de polimetilmetacrilato será la siguiente:

$$9,70 \text{ ton FNM} \times \frac{80}{20} = 38,82 \text{ ton de PMMA}$$

El material compuesto está formado por 35% de residuos y 65% de resina poliéster insaturada por lo tanto la cantidad de polimetilmetacrilato será la siguiente:

$$9,70 \text{ ton FNM} \times \frac{65}{35} = 42,05 \text{ ton de RPI}$$

Para la polimerización del PMMA se necesita 0.5% de peróxido de benzoilo.

$$38,82 \text{ ton de PMMA} \times 0,005 = 0,019 \text{ ton de peróxido de benzoilo}$$

Para la polimerización de la resina poliéster insaturada se necesita 0.2% de octoato de cobalto y 2% de Meck peróxido.

$$42,05 \text{ ton de RPI} \times 0,005 = 0,08 \text{ ton de octoato de cobalto}$$

$$42,05 \text{ ton de RPI} \times 0,02 = 0,84 \text{ ton de Meck peróxido}$$

**ANEXO VIII**  
**HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS**

**Tabla AVIII. 1.** Hoja de especificación de Banda transportadora

<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 1</b>		
<b>Nombre del Equipo:</b> Banda Transportadora		
<b>Fabricante:</b> Habasit	<b>Modelo:</b> FAB-2E	<b>Número requerido:</b> 1
<b>Datos técnicos</b>	Temperatura mínima: -30°C Temperatura máxima: 80°C Fuerza de tracción admisible por unidad de ancho: 6N/mm Grosor: 0,7 mm Radio del Canto vivo: 4 mm Diámetro de la polea: 15 mm	
<b>Principio de Funcionamiento:</b> Transporte de las tarjetas de circuitos impreso de residuos de aparatos electrónicos		
<b>Tipo de Operación:</b> Continuo		
<b>Esquema del equipo:</b>		

**Tabla AVIII. 2.** Hoja de especificación de cizalla hidráulica

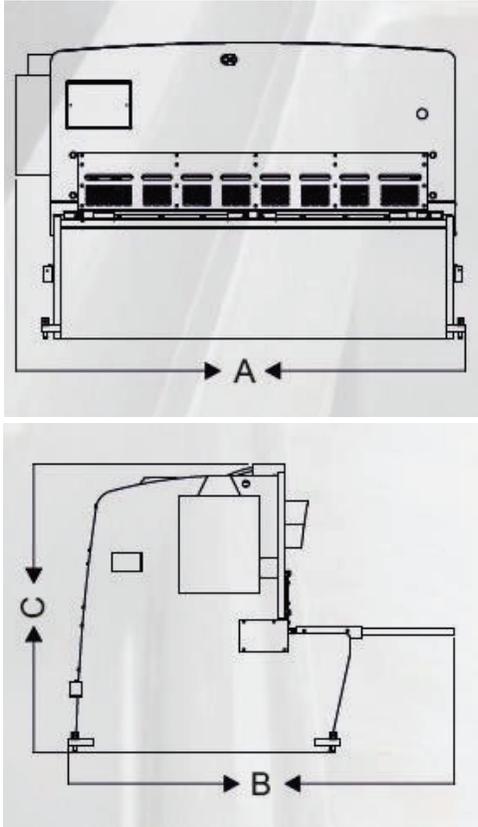
<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 2</b>		
<b>Nombre del Equipo:</b> Cizalla hidráulica		
<b>Fabricante:</b> Nargesa	<b>Modelo:</b> C 3006 CNC	<b>Número requerido:</b> 1
<b>Datos técnicos</b>	Potencia: 9,2 kW Tensión 4 fases: 230/400 V Capacidad de corte: 450 N/ mm <sup>2</sup> Dimensiones: AxBxC 3675 x 2467 x 1816 mm	
<b>Principio de Funcionamiento:</b> Corte de objetos		
<b>Tipo de Operación:</b> Continuo		
<b>Esquema del equipo:</b>		
 <p>The image contains two technical drawings of a hydraulic shear machine. The top drawing is a front view showing the machine's profile with a horizontal dimension line labeled 'A' indicating its width. The bottom drawing is a side view showing the machine's depth and height, with a horizontal dimension line labeled 'B' indicating its width and a vertical dimension line labeled 'C' indicating its height.</p>		

Tabla AVIII. 3. Hoja de especificación de molino de martillos

<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 3</b>		
<b>Nombre del Equipo:</b> Molino de martillos		
<b>Fabricante:</b> Gruber	<b>Modelo:</b> Delta 2MM	<b>Número requerido:</b> 1
<b>Datos técnicos</b>	Potencia: 5,5 kW Capacidad: 1 ton/h Dimensiones: A: 230 mm B: 200 mm C: 1100 mm D: 750 mm E: 140 mm F: 245 mm G: 250 mm H: 655 mm	
<p><b>Principio de Funcionamiento:</b> El material que entra en el molino es golpeado por un conjunto de martillos girando a baja velocidad. De esta manera, se produce una primera rotura por impacto. Estos martillos lanzan el material contra el interior del molino, donde se encuentran una serie de placas de impacto, donde el material se rompe por segunda vez por impacto. Este proceso se repite mientras el material se mantiene en el interior del molino.</p>		
<b>Tipo de Operación:</b> Continuo		
<b>Esquema del equipo:</b>		
<p>The technical drawing consists of two views of a hammer mill. The top view is a side elevation showing the cylindrical grinding chamber with a diameter of 230 mm (A), a height of 245 mm (F), and a total width of 1100 mm (C). It features a motor on the right side with a height of 140 mm (E) and a base height of 655 mm (H). Labels include 'CARCASA ATORNILLADA PARA EXTRACCIÓN DEL CONJUNTO ROTORICO Y PARA CAMBIO DE FERRILLAS' and 'CARGA'. The bottom view is a top-down perspective showing the width of 200 mm (B) and the discharge point labeled 'DESCARGA'. It also shows 'DEFENSA VOLANTE INERCIA' and 'DEFENSA ORBEAS'.</p>		

**Tabla AVIII. 4.** Hoja de especificación del tamiz vibratorio

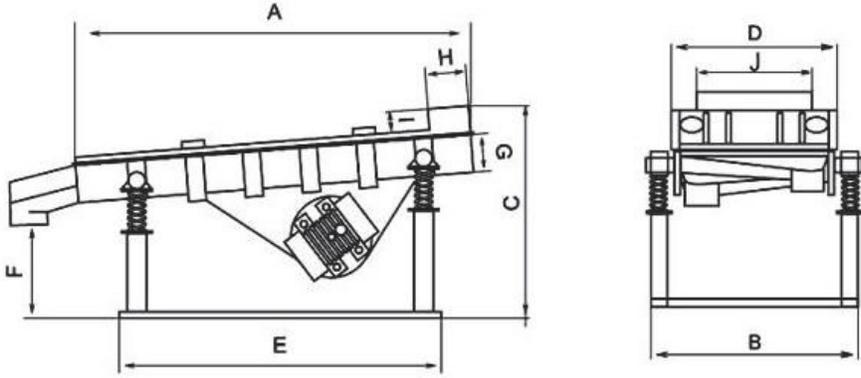
<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 4</b>		
<b>Nombre del Equipo:</b> Tamiz vibratorio		
<b>Fabricante:</b> Wilite	<b>Modelo:</b> Serie YK	<b>Número requerido:</b> 2
<b>Datos técnicos</b>	Potencia: 5,5 Kw Capacidad: 1 ton/h Dimensiones: Largo: 1200 Altura: 1500 mm Ancho: 3500 mm	
<b>Principio de Funcionamiento:</b> El material que entra al tamiz vibratorio y se separa de acuerdo al tamaño de partícula.		
<b>Tipo de Operación:</b> Continuo		
<b>Esquema del equipo:</b>  <p>The technical drawing consists of two views of a vibratory sieve machine. The left view is a side profile showing the machine's frame, a motor at the bottom, and a sieve deck supported by springs. Dimensions labeled include: A (total length), B (width of the base), C (height from base to top), D (width of the sieve deck), E (width of the motor area), F (height of the inlet), G (height of the support), and H (height of the deck). The right view is a front elevation showing the width of the machine (B) and the width of the sieve deck (D). It also shows the internal structure of the deck and the support mechanism.</p>		

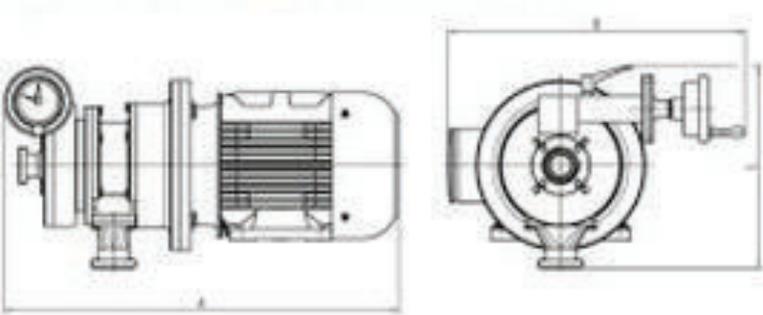
Tabla AVIII. 5. Hoja de especificación de separador gravimétrico

<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 5</b>		
<b>Nombre del Equipo:</b> Separador gravimétrico		
<b>Fabricante:</b> Pinhalense	<b>Modelo:</b> MVF-0	<b>Número requerido:</b> 1
<b>Datos técnicos</b>	Potencia: 2 kW Capacidad: 400 Kg/h Dimensiones: A: 1,7 m B: 0,95 m C: 0,55 m D: 0,90 m E: 1,15 m F: 1,90 m G: 2,00 M H: 1,35 m I: 0,55 m J: 2,15 m	
<b>Principio de Funcionamiento:</b> El material que alimentado al separador densimétrico a través de movimientos vibratorio separa el material de acuerdo al tamaño de partícula.		
<b>Tipo de Operación:</b> Continuo		
<b>Esquema del equipo:</b>		

Tabla AVIII. 6. Hoja de especificación del secador

<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 6</b>		
<b>Nombre del Equipo:</b> Secador		
<b>Fabricante:</b> Pinhalense	<b>Modelo:</b> CTIII	<b>Número requerido:</b> 2
<b>Datos técnicos</b>	Potencia: 2,2 KW Capacidad: 400 Kg/h Temperatura: 50- 140 °C Vapor consumido: 60 Kg/h Placas: 144	
<b>Principio de Funcionamiento:</b> El material es colocado en las bandejas del secador y se establece la temperatura de operación.		
<b>Tipo de Operación:</b> Continuo		
<b>Esquema del equipo:</b>		

**Tabla AVIII. 7.** Hoja de especificación del molino de discos

<b>HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 7</b>		
<b>Nombre del Equipo:</b> Molino de Discos		
<b>Fabricante:</b> Buhler	<b>Modelo:</b> Corindón MK	<b>Número requerido:</b> 1
<b>Datos técnicos</b>	Potencia: 5,5 KW Capacidad: 10 – 160 Kg/h Dimensiones: Longitud: 680 mm Altura: 360 mm Ancho: 540 mm	
<b>Principio de Funcionamiento:</b> El material alimentado es triturado mediante fricción por la unión de dos discos del molino.		
<b>Tipo de Operación:</b> Continuo		
<b>Esquema del equipo:</b>		
		

## ANEXO IX

### CALCULO DE LA DIMENSIÓN DE LOS REACTORES

Reactor para baldosas de resina poliéster insaturada

$$\text{Producción} = 65,62 \frac{\text{ton}}{\text{mes}}$$

Con el flujo másico y la densidad de la resina poliéster insaturada se calcula el volumen, además que se considera un sobredimensionamiento del 20%

$$\text{Volumen} = 65,62 \frac{\text{ton}}{\text{mes}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times \frac{1 \text{ mes}}{20 \text{ días}} \times \frac{\text{m}^3}{1200 \text{ kg}} \times 1,2 = 3,281 \text{ m}^3$$

Para el cálculo del diámetro y altura del reactor se tomó la siguiente relación:

$$H = 1,2D \quad \text{[AIX.1]}$$

El volumen de un cilindro es:

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4} \quad \text{[AIX.2]}$$

Reemplazando la altura tenemos:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V}{1,2\pi}} \quad \text{[AIX.3]}$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4(3,281)}{1,2\pi}} = 1,52 \text{ m}$$

$$H = 1,2(1,52) = 1,82$$

Reactor para domos de polimetilmetacrilato

$$\text{Producción} = 48,71 \frac{\text{ton}}{\text{mes}}$$

Con el flujo másico y la densidad de la resina poliéster insaturada se calcula el volumen, además que se considera un sobredimensionamiento del 20%

$$\text{Volumen} = 48,71 \frac{\text{ton}}{\text{mes}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times \frac{1 \text{ mes}}{20 \text{ días}} \times \frac{\text{m}^3}{940 \text{ kg}} \times 0,2 = 3,116 \text{ m}^3$$

Reemplazando en la ecuación AVI.3 la altura tenemos:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4(3,116)}{1,2\pi}} = 1,49 \text{ m}$$

$$H = 1,2 (1,49) = 1,78 \text{ m}$$

## ANEXO X

### RESUMEN DE COSTOS

#### Sueldos

Para el cálculo anual de la inversión en los sueldos de los trabajadores de la planta se considera: el aporte patronal al IESS, las vacaciones, el décimo tercero y décimo cuarto sueldo y los fondos de reserva.

Sueldo gerente = 3 000 USD

Aporte patronal IESS = (3 000) \* 0,206 = 618 USD

Total mensual ex-bonificaciones = 3 000 + 618 = 3 618 USD

Total mensual ex-bonificaciones anual = 3 618 \* 12 = 43 416 USD

Décimo tercer sueldo = 3 618 USD

Décimo cuarto sueldo = 354 USD

Fondo de reserva = 3 618 USD

Vacaciones =  $\frac{3\ 618}{2}$  = 1 809 USD

Total anual = 43 416 + 3 618 + 354 + 1 809 + 3 618 = 52 815 USD

#### Costo del terreno

Para el costo del terreno se consideró el área del terreno y el costo por metro cuadrado.

Área del terreno = 2 100 m<sup>2</sup>

Costo por m<sup>2</sup> de terreno = 30 USD

Costo total del terreno = 2 100 \* 30 = 63 000 USD

## **Infraestructura**

Para el cálculo de costos de la infraestructura se consideró la construcción de bodegas de materia prima e insumos, bodega de producto terminado, bodega de mantenimiento, el área total de la planta así como la construcción de oficinas para el personal administrativo.

Área de construcción = 495 m<sup>2</sup>

Costo por m<sup>2</sup> de construcción de bodegas = 350 USD

Costo total de bodegas = 350 \* 495 = 173 200 USD

## **Costos considerados en el mantenimiento de equipos**

Para el mantenimiento de equipos se consideró 5% del valor de la inversión en equipos, mientras que para el mantenimiento de infraestructura se consideró un 2% de su valor.

Costo mantenimiento de equipos = 335 474 \* 0,05 = 16 773,70 USD

Costo mantenimiento de infraestructura = 173 200 \* 0,02 = 3 464 USD

## **Costos de servicios básicos**

### **Costo energía eléctrica**

El costo de energía eléctrica se calculó considerando el consumo energético de los equipos indicados en la tabla a continuación.

**Tabla AX. 1.** Energía eléctrica requerida por día

<b>EQUIPO</b>	<b>POTENCIA DEMANDADA (KW)</b>	<b>HORAS DE FUNCIONAMIENTO AL DÍA (h/día)</b>	<b>ENERGÍA GASTADA (kWh/día)</b>
Banda transportadora	5,50	8	44
Cizalla	9,20	8	73,6
Molino de martillos	5,50	2	11
Tamiz vibratorio 1	5,50	6	33
Separador gravimétrico	2,00	2	4
Secador	2,20	6	13,2
Tamiz vibratorio 2	5,50	2	11
Molino de Discos	5,50	4	22
Horno	2,20	8	17,6
<b>TOTAL</b>	<b>43,10</b>		<b>229,40</b>

Precio del kWh = 0,10 USD

Consumo de energía eléctrica por día = 229,40 kWh

Costo de la energía consumida diaria =  $0,10 \times 229,40 = 22,94$  USD

Costo de la energía consumida mensual =  $22,94 \times 20 = 458,80$  USD

Costo de la energía consumida anual =  $458,80 \times 12 = 5 505,60$  USD

### **Costo de agua**

Precio m<sup>3</sup> de agua = 2,59 USD

Consumo de agua mensual = 9600 kg

Consumo de agua mensual = 9,6 m<sup>3</sup>

Costo de agua mensual =  $9,6 \times 2,59 = 24,86$  USD

Costo de agua anual =  $24,86 \times 12 = 298,40$  USD

Costo total anual de servicios =  $298,40 + 5 505,60 = 5 804$

## ANEXO XI

### FLUJO DE CAJA

**Tabla AXI. 1. Flujo de caja**

	De 0 a 5 años					
AÑO	0	1	2	3	4	5
Ventas		5 375 933,85	5 381 309,78	5 386 691,09	5 392 077,78	5 278 104,27
(-)Costo de ventas		4 909 924,26	4 909 924,26	4 909 924,26	4 909 924,26	4 909 924,26
(=) Utilidad bruta		<b>466 009,59</b>	<b>471 385,52</b>	<b>476 766,83</b>	<b>482 153,52</b>	<b>368 180,01</b>
(-) Gastos administrativos		105 630,00	105 630,00	105 630,00	105 630,00	105 630,00
(-) Amortización		2 858,37	2 858,37	2 858,37	2 858,37	2 858,37
(-) Depreciaciones		57 167,46	57 167,46	57 167,46	57 167,46	57 167,46
(=) Utilidad operativa		<b>300 353,75</b>	<b>305 729,68</b>	<b>311 110,99</b>	<b>316 497,69</b>	<b>202 524,17</b>
(-) 15% part. Trab		45 053,06	45 859,45	46 666,65	47 474,65	30 378,63
(-) 11% imp. Rta		33 038,91	33 630,27	34 222,21	34 814,75	22 277,66
(=) Utilidad neta		<b>222 261,78</b>	<b>226 239,97</b>	<b>230 222,14</b>	<b>234 208,29</b>	<b>149 867,89</b>
(+) Depreciación		57 167,46	57 167,46	57 167,46	57 167,46	57 167,46
(+) Amortización		2 858,37	2 858,37	2 858,37	2 858,37	2 858,37
(-) Inversión	571 674,63					
(-) Pago principal		109 597,77	109 597,77	109 597,77	109 597,77	109 597,77
(=) Flujo	<b>-571 674,63</b>	<b>172 689,84</b>	<b>176 668,04</b>	<b>180 650,20</b>	<b>184 636,36</b>	<b>100 295,96</b>
		De 6 a 10 años				
AÑO		6	7	8	9	10
Ventas		5 283 382,37	5 288 665,76	5 293 954,42	5 299 248,38	5 304 547,62
(-) Costo de ventas		4 909 924,26	4 909 924,26	4 909 924,26	4 909 924,26	4 909 924,26
(=) Utilidad bruta		<b>373 458,11</b>	<b>378 741,50</b>	<b>384 030,16</b>	<b>389 324,12</b>	<b>394 623,36</b>
(-) Gastos administrativos		105 630,00	10 5630,00	105 630,00	105 630,00	105 630,00
(-) Amortización		2 858,37	2 858,37	2 858,37	2 858,37	2 858,37
(-) Depreciaciones		57 167,46	57 167,46	57 167,46	57 167,46	57 167,46
(=) Utilidad operativa		<b>207 802,28</b>	<b>213 085,66</b>	<b>218 374,33</b>	<b>223 668,28</b>	<b>228 967,53</b>
(-) 15% part. Trab		31 170,34	31 962,85	32 756,15	33 550,24	34 345,13
(-) 11% imp. Rta		22 858,25	23 439,42	24 021,18	24 603,51	25 186,43
(=) Utilidad neta		<b>153 773,69</b>	<b>157 683,39</b>	<b>161 597,00</b>	<b>165 514,53</b>	<b>169 435,97</b>
(+) Depreciación		57 167,46	57 167,46	57 167,46	57 167,46	57 167,46
(+) Amortización		2 858,37	2 858,37	2 858,37	2 858,37	2 858,37
(-) Inversion						
(-) Pago principal		109 597,77	109 597,77	109 597,77	109 597,77	109 597,77
(=) Flujo		<b>104 201,75</b>	<b>108 111,46</b>	<b>112 025,07</b>	<b>115 942,60</b>	<b>119 864,04</b>

