

**CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE POLIMERIZACIÓN DE LA RESINA DGEBA  
UTILIZANDO ANÁLISIS TERMOGRAVIMETRICO (TGA) Y CALORIMETRIA  
DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)**

**DANNA IBETH SALAZAR VEGA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, QUÍMICA Y CIVIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**PAMPLONA, (02/07/2021)**

**CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE POLIMERIZACIÓN DE LA RESINA DGEBA  
UTILIZANDO ANÁLISIS TERMOGRAVIMETRICO (TGA) Y CALORIMETRIA  
DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)**

**DANNA IBETH SALAZAR VEGA**

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar por el título de  
INGENIERA QUÍMICA**

**Director: ALEXANDER LUNA CORTÉS**

**MSc.**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, QUÍMICA Y CIVIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**PAMPLONA, (02/07/2021)**

*A mis padres por siempre brindarme su paciencia, apoyo y amor en todo, principalmente por sus consejos, sin ustedes nunca habría podido llegar hasta el final, los amo.*

*A mis hermanas por siempre estar presentes cuando más las necesito, son muy importantes para mí.*

## **Agradecimientos**

Agradezco a primeramente a Dios por darme la paciencia en cada etapa y paso de mi vida, a mis amados padres Hosman Salazar y Judis Vega por brindarme su apoyo total para poder culminar una de mis metas y forjarme a nunca rendirme, por siempre recordarme lo perseverante que debo ser y siempre apoyarme en mis decisiones.

A mi querido director Alexander Luna, por guiarme en este proceso tan importante, por tenerme paciencia, por su acogida y apoyo para que este trabajo fuera posible.

A la universidad Nacional sede Manizales por brindarme la ayuda para poder llevar a cabo este trabajo.

A mi hermana Audith Salazar y Esteffy Salazar por brindarme su amor y apoyo

A mi querida amiga Chris Quintero por siempre creer en mí y apoyarme cuando más lo necesite.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>7</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
3.1 Objetivo general.....	12
3.2 Objetivo específico .....	12
<b>4. MARCO TEORICO</b> .....	<b>13</b>
4.1 Antecedentes .....	13
4.2 Bases teóricas y conceptuales .....	14
4.2.1. Polímeros termofijos.....	14
4.2.2. Resinas epóxicas. ....	15
4.2.2.1 Base epoxi con diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA).....	16
4.2.2.2 Proceso de reacción de curado entre DGEBA y diaminas (TMAB y MCDEA) ..	17
4.2.3 Agentes de curado o endurecedores.....	19
4.2.3.1 TMAB.....	19
4.2.3.2 MCDEA .....	20
4.2.4 Propiedades térmicas. ....	21
4.2.4.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	21
4.2.4.2 Análisis termogravimétrico (TGA).....	22
4.2.5 Propiedades mecánicas .....	24
4.2.5.1 Ensayo de tracción .....	25
<b>5. DESARROLLO DEL PROYECTO</b> .....	<b>28</b>
5.1 Síntesis del polímero.....	28
5.2 Prueba mecánica .....	30

5.3 Prueba térmica .....	30
5.3.1 Análisis termogravimétrico.....	30
5.3 Manejo de datos .....	31
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>33</b>
6.1 caracterización de los polímeros obtenidos .....	33
6.1.1 Prueba termogravimétrica para los sistemas epoxi/amina (EA). .....	33
.....	34
6.1.2 Prueba mecánica para los sistemas EA.....	36
6.1.3 Calorimetría diferencial de barrido para el sistema EA.....	38
6.2 selección de la mejor amina.....	39
<b>7. Conclusiones y recomendaciones. ....</b>	<b>41</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>42</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del pre polímero epoxi. n indica el número de subunidades polimerizados. .....	10
Figura 2. Estructura de un polímero termofijo <sup>18</sup> .....	15
Figura 3. Estructura química del grupo oxirano. ....	16
Figura 4. Reacción de producción de bisfenol A. ....	16
Figura 5. Epiclorhidrina. ....	16
Figura 6. Proceso de síntesis de DGEBA. ....	17
Figura 7. Reacción de curado de DGBEA y TMAB .....	18
Figura 8. Reacción de curado de DGBEA y MCDEA.....	18
Figura 9. Proceso de curado de una resina epoxi por reacción de un prepolímero con una amina. .....	19
Figura 10. Estructura química del TMAB .....	19
Figura 11. Estructura química MCDEA. ....	20
Figura 12. Equipo DSC.....	22
Figura 13. Partes fundamentales equipo TGA.....	23
Figura 14. Ejemplo TGA de poli etilenglicol. ....	24
Figura 15. Maquina ensayo tracción. ....	25
Figura 16. Momento de fractura, ensayo tracción. ....	26
Figura 17. Curva tensión - deformación característica de los polímeros.....	27
Figura 18. Diagrama específico de la síntesis del polímero. ....	28
Figura 19. Muestra entrecruzada y probeta sistema DGBEA/TMAB. ....	30
Figura 20. Datos y cálculos realizados en OriginPro 2019b, DGEBA/MCDEA. ....	31
Figura 21. Grafica reportada por el programa, ensayo TGA (DGEBA/MCDEA). ....	32
Figura 22. TGA de mezcla DGEBA/TMAB. ....	33
Figura 23. DTGA polímero DGBEA/TMAB .....	34
Figura 24. Termograma DGBEA/MCDEA. ....	34
Figura 25. DTGA polímero DGBEA/MCDEA. ....	35
Figura 26. Curva esfuerzo vs deformación sistemas EA. ....	37
Figura 27. Calor de reacción para el sistema EA a temperatura constante (150 °C).....	38

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades TMAB. <sup>26</sup> .....	20
Tabla 2. Propiedades MCDEA. <sup>27</sup> .....	21
Tabla 3. Propiedades térmicas del sistema EA. ....	36
Tabla 4. Propiedades mecánicas de sistema EA. ....	37



## 1. INTRODUCCIÓN

Las resinas epóxicas han sido estudiadas a lo largo del tiempo por los infinitos usos que esta presentan, por ende han tenido una gran aceptación en las últimas décadas, ya que se ha demostrado que presentan buenas propiedades mecánicas. Estos compuestos se utilizan en numerosas aplicaciones a nivel industrial debido a su alta resistencia y rigidez a disolventes, también este tipo de materiales han sido utilizados en recubrimientos de superficies en adhesivos de alto desempeño, entre otros, a lo largo del tiempo se han venido estudiando diversos agentes de modificadores para las resinas epoxicas con el fin de presentar mejoras en sus propiedades térmicas y mecánicas, como lo son la resistencia a la fractura, estabilidad térmica, etc<sup>1</sup>.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar las propiedades mecánicas y térmicas de una resina epoxica tipo DGBEA, para esto se utilizó dos tipos de aminas como agentes de curado, estudiando el comportamiento de estos materiales al ser reforzados por la adición de endurecedores, comparando los dos agentes de curado evaluando la resistencia a la fractura y la estabilidad térmica que cada uno presentaba, teniendo una mejora relativamente buena en ambos casos.

## 2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

Las resinas epoxicas son materiales comerciales los cuales presentan un amplio rango de utilidades en la vida diaria, como el embalaje, construcción, aeroespacial, adhesivo, etc<sup>2</sup>. Por ende, a lo largo del tiempo se han venido realizando estudios para la mejora de sus propiedades, buscando nuevas alternativas de materiales o simplemente modificándolos generando mejoras en los mismos, se han realizado investigaciones del como reforzar este tipo de compuestos, ya sea agregándoles algún tipo de aditivo que mejore sus características, entre muchas otras combinaciones de refuerzos. Teniendo en cuenta sus propiedades químicas, térmicas, mecánicas, se determinan sus aplicaciones ya sean industriales o investigativas, mejorando su resistencia térmica, buena estabilidad química, buena adhesión, etcétera<sup>3</sup>. Este tipo de materiales, suele ser usados para mejorar la adherencia de las capas de pintura, en adhesivos, se utilizan en la construcción de aviones, automóviles, bicicletas, esquís<sup>4</sup>. Sirven para pegar gran cantidad de materiales, sin embargo, hoy en día es necesario recubrir materiales, Las resinas epoxi se usan tanto en la construcción de moldes como de piezas maestras, laminados, extrusiones y otras ayudas a la producción industrial<sup>4</sup>. Los resultados son más baratos, resistentes y rápidos de producir que los hechos de madera, metal, etc.

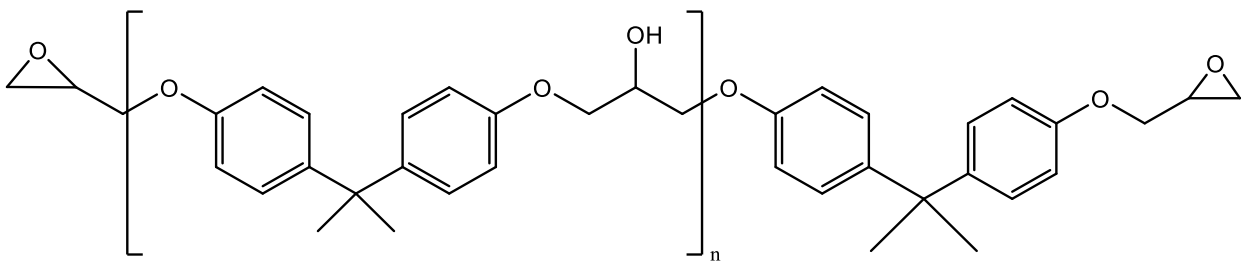


Figura 1. Estructura del pre polímero epoxi.  $n$  indica el número de subunidades polimerizadas.

Para obtener un polímero termofijo es necesario tener un pre polímero (figura 1), dependiendo su estado, ya sea viscoso o semi-sólido, cambia a un polímero irreversible por medio de curado, no obstante, tienden a presentar problemas de degradación si le aplicamos una fuente de calor

constante<sup>5</sup>, por esto, que se busca mejorar estas limitantes aplicando una buena técnica de curado al ciclo de polimerización, el proceso de curado se da gracias a la adición de compuestos químicos llamados endurecedores, formando cadenas largas poliméricas tridimensionales muy resistentes, proporcionando mejoras en el material; teniendo en cuenta el secado, que influye en gran parte del material; el tiempo y la temperatura del secado influyen en sus propiedades según estudios realizados Jaramillo “Es importante saber que las condiciones bajo las cuales se realicen las operaciones de curado y pos curado, en las que es posible variar el tiempo y la temperatura, tienen un importante efecto sobre el grado de conversión de la resina” <sup>6</sup>. Sin embargo, aun suelen presentarse pequeñas fracturas en el material las cuales se pueden mejorar agregándole un aditivo, como lo son las arcillas, las cuales generan mejoras en el material en cuanto a estas fracturas<sup>7</sup>, generando una solución a uno de los problemas que se presentan usualmente a este tipo de materiales.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

- Caracterizar térmica y mecánicamente resina epóxica diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) entrecruzadas con diaminas aromáticas TMAB y MCDEA.

#### **3.2 Objetivo específico**

- Caracterizar mecánicamente el polímero obtenido de la resina epóxica realizando una prueba de tracción.
- Caracterizar térmicamente el polímero utilizando calorimetría diferencial de barrido (DSC).
- Caracterizar térmicamente el polímero utilizando análisis termogravimétrico (TGA).

## 4. MARCO TEORICO

### 4.1 Antecedentes

Una resina epoxi es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador también llamado endurecedor. Haciendo un breve recuento histórico *Prileschajew* fue uno de los principales investigadores en informar sobre la relación entre las olefinas y peróxidobenzoico para formar epóxido<sup>8</sup>. En el 1927 en los Estados Unidos se hicieron los primeros intentos comerciales y de producción de la resina epoxica. En 1930, De *Trey Farers* en Suiza y *Reynolds* en los Estados Unidos produjeron una resina epoxi a base de bisfenol A de bajo punto de fusión que dio una composición termoendurecible al reaccionar con anhídrido ftálico. Las resinas epoxi más frecuentes son producto de una reacción entre epiclorohidrina y bisfenol A, que en los años de 1936 el *Doctor Pierre Castan* preparo diglicidil éter de bisfenol A (DGBEA) con el *Dr. Greenle* produciendo las resinas epoxicas de pesos moleculares más altos, llevándose en conjunto el mérito de primera síntesis de la resina basada en bisfenol A<sup>9,10,11</sup>.

A medida que ha pasado el tiempo se han realizado estudios para la mejora de las diversas propiedades de las resinas epoxicas como lo son las térmicas, mecánicas, entre otras; para esto investigadores profundizan en el estudio del agente de curado. En el siguiente proyecto *Asdrúbal y Vázquez*, utilizaron como agente de curado la amina diaminodifenilsulfona mezclada con DGBEA con el fin de analizar y caracterizar el polímero obtenido, ellos utilizaron la técnica del DSC, ya que es un equipo importante para la caracterización de compuestos poliméricos, este proporciona el calor que adsorbe o cede el material, llegando a la conclusión que este tipo de materiales en el proceso de curado con amina mejoran sus propiedades térmicas<sup>12</sup>.

Otro proyecto importante es el realizado por *T. Boonlert-uthai, A., Kentaro Taki*, en donde se estudió la ocurrencia de los sistemas epoxi durante el curado UV y las propiedades finales de las muestras curadas, se realizó una polimerización foto iniciada de DGEBA<sup>13</sup>, la cual fue modificada utilizando un agente de curado, observando la importancia que tiene el curado en las propiedades

térmicas, las cuales fueron analizadas utilizando DSC, las mejoras presentadas son gracias a la mejora que llevo la formulación del endurecedor en el sistema epóxi<sup>13</sup>.

Para identificar las temperaturas de pérdida de peso se realizan estudios utilizando el análisis termogravimétrico, en un trabajo realizado por *Caizhao, Mingming, Xugang*, estudiaron la influencia de diferentes agentes de curados como lo eran el 4,4'-diaminodifenil metano (DDM) y bisftalonitrilo (BhPN) en DGBEA, gracias a los analisis del TGA, se pudieron identificar que el segundo sistema (DGBEA/BhPN) presento propiedades térmicas más altas que el primer sistema (DGBEA/DDM), es decir que el BhPN es un excelente agente de curado para la resina epóxica tradicional (DGBEA)<sup>14</sup>.

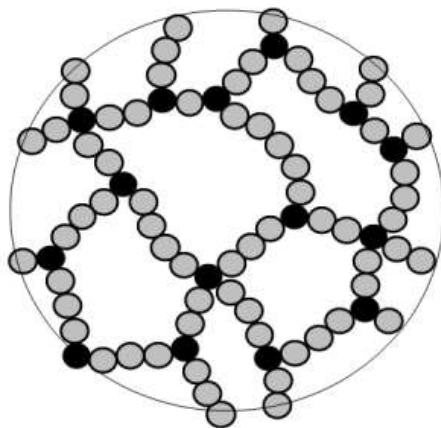
También, las resinas epóxicas suelen tener diferentes tipos de estudios para caracterizarlas, como las pruebas mecánicas, el trabajo realizado por *Ying, Kuan y Tse-Yu* llevaron a cabo un sistema epoxi/amina utilizando como agente de curado 4'-metilendianilina (MDA), con el fin de estudiar la resistencia a la fractura y a la ruptura, para realizar este estudio se utilizó un ensayo de tracción, en donde se obtuvo una buena resistencia al material, las redes reforzadas aumentaron el porcentaje de elongación a la rotura y mejoraron la energía de absorción de las redes durante la deformación por tracción hasta la rotura<sup>15</sup>. Otros estudios realizados por *MinYu, Tongtong* y colaboradores por medio de pruebas mecánicas demostraron que el agente de curado que en este caso fue éster diglicídico del ácido dimétrico tenía efectos significativos de flexibilidad en el MCDEA, generando mejoras en la resistencia al impacto y resistencia a la tracción, evidenciando la importancia que tiene los efectos del agente de curado en las resinas epoxicas<sup>16</sup>.

## **4.2 Bases teóricas y conceptuales**

### *4.2.1. Polímeros termofijos*

Este tipo de materiales son conocidos por ser rígidos con una estructura molecular múltiple y compleja, los cuales por mucho que presenten una elevación de temperatura, estos llegan únicamente a descomponerse, pero no fluyen. Estos suelen ser duros, compactos y resistentes, pero, frágiles<sup>17</sup>. Usualmente los polímeros entrecruzados y curados, como los son las resinas

epoxicas, los cauchos vulcanizados, hacen parte de este tipo de materiales, esta clase de polímeros, presentan estructuras tridimensionales caracterizadas por tener alta resistencia al flujo viscoso incluso a altas temperaturas. Por ende, son muy utilizados en la protección de todo tipo de superficies <sup>17</sup>, los polímeros termofijos suelen diferenciarse de los polímeros termoplásticos en su forma; los segundos al tener una fuente de calor constante se funden, pueden ser moldeados y suelen tener un peso molecular elevado, en cambio, los termofijos solo presentan degradación a altas temperaturas pero nunca llegan a fundirse. En la figura 1, se podrá apreciar la estructura de un polímero termofijo.



*Figura 2. Estructura de un polímero termofijo*<sup>18</sup>.

#### *4.2.2. Resinas epóxicas.*

Las resinas epoxicas, son compuestos en los que se tiene en cuenta dos puntos, inicialmente una base, la cual es conocida como la base epoxi donde se presentan moléculas que poseen dos o más grupos oxirano (figura 3), como segundo, un endurecedor, considerando estos dos reactivos, al mezclarse, se obtiene las resinas epoxicas<sup>19</sup>. Uno de los principales procesos para la síntesis y obtención de este tipo de resinas, es la reacción entre un compuesto que tenga un hidrogeno activo y la epíclorhidrina seguida de una deshidrohalogenación, aunque, también se preparan mediante olefinas con peroxiácidos orgánicos<sup>19</sup>.

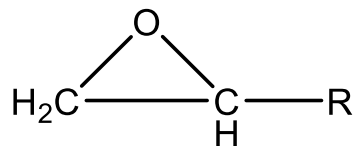


Figura 3. Estructura química del grupo oxirano.

#### 4.2.2.1 Base epoxi con diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA)

El DGEBA, es uno de los monómeros epóxicos más utilizados, este tipo de monómeros pueden reaccionar con más de 50 tipos de agentes de curado, por un mecanismo catiónico o aniónico con el anillo epoxi<sup>20</sup>, la mayor parte de las resinas epoxicas que se utilizan hoy en día se derivan del bisfenol A y la epiclorhidrina, el bisfenol A, se obtiene por condensación de acetona y fenol <sup>21</sup> (ver figura 4 ).

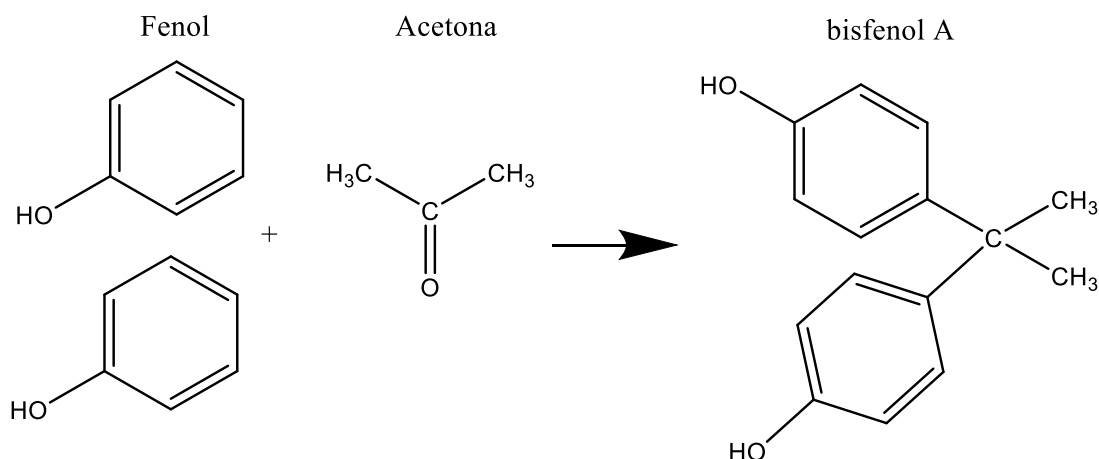


Figura 4. Reacción de producción de bisfenol A.

La epiclorhidrina se obtiene por cloración del propileno (ver figura 5).

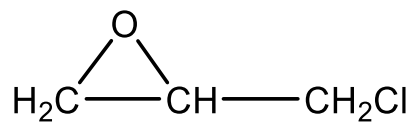


Figura 5. Epiclorhidrina.



A partir de las dos anteriores moléculas, se realiza la síntesis del DGEBA, teniendo en cuenta una temperatura elevada y un medio alcalino <sup>21</sup> (ver figura 6).

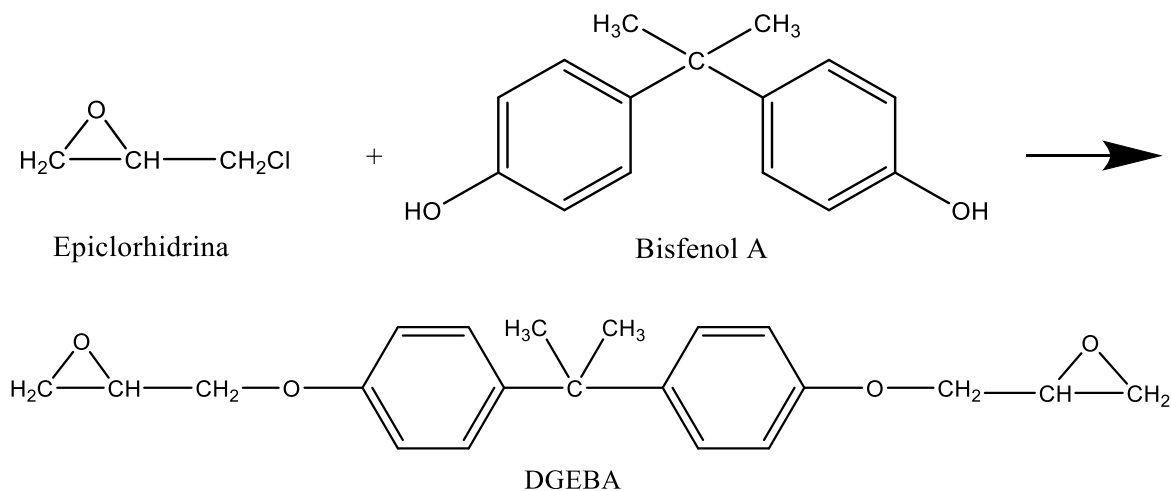


Figura 6. Proceso de síntesis de DGEBA.

#### 4.2.2.2 Proceso de reacción de curado entre DGEBA y diaminas (TMAB y MCDEA)

El mecanismo de reacción entre el oligomeros DGEBA y las diaminas se comprende inicialmente entre uno de los hidrógenos amínicos con un equivalente epoxi, inicialmente ocurre un ataque nucleofílico generando una ruptura sobre el carbono terminal de los anillos oxiranos, esto sucede en ambos procesos de la misma forma (figura 7 y 8), seguido de la ruptura se forma un grupo hidroxilo y un enlace covalente entre el nitrógeno del grupo amino y el carbono del grupo oxirano; teniendo en cuenta que en el nitrógeno queda un radical libre, dispuesto a formar otro enlace con otra cadena carbonada, generando una cadena más grande y sólida con enlaces covalentes, llamada red tridimensional características de los polímeros termoestables<sup>5</sup>.

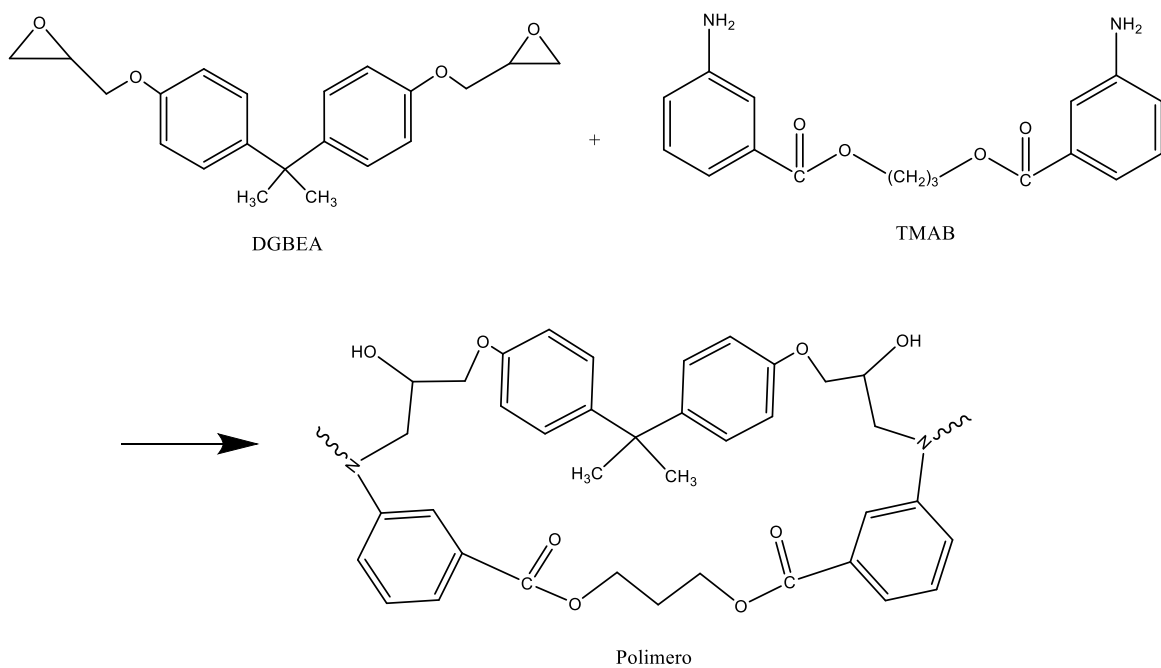


Figura 7. Reacción de curado de DGBEA y TMAB

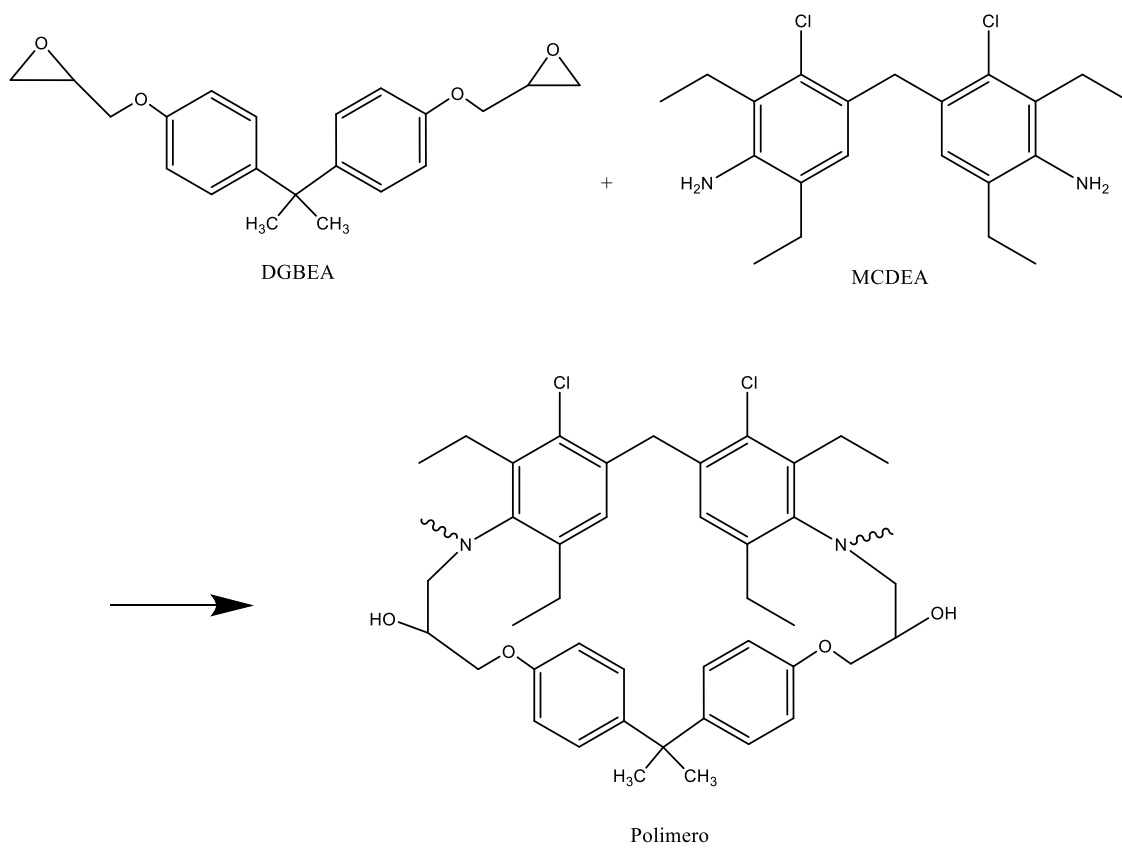


Figura 8. Reacción de curado de DGBEA y MCDEA.

### 4.2.3 Agentes de curado o endurecedores

Los endurecedores, también conocidos como agentes de curado son llevados a cabo mediante un proceso térmico, empleando radiación ultravioleta o utilizando catalizadores, este tipo de sustancias que provocan el proceso de curado, favorecen la unión y reticulación de los polímeros<sup>22</sup>. La cinética de curado ha sido estudiada ampliamente, teniendo en cuenta, condiciones de procesamiento térmico convencionales, ya que si se lleva a cabo un buen curado, genera mejoras de las propiedades en los materiales<sup>23</sup>.

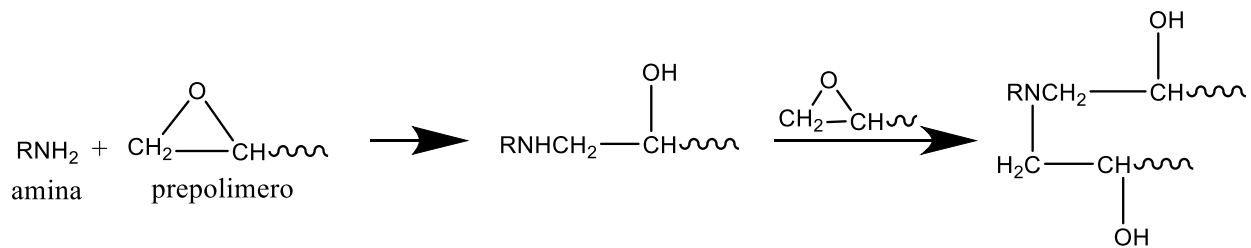


Figura 9. Proceso de curado de una resina epoxi por reacción de un prepolímero con una amina.

#### 4.2.3.1 TMAB

El trimetilen glicol di-p-aminobenzoato (TMAB), es un agente de curado de diamina para poliuretanos introducido en 1976 para reemplazar el popular pero tóxico MOCA®<sup>24</sup>. Es muy soluble en una variedad de disolventes de revestimiento. suele ser usado como agente de curado en resinas epoxicas, presenta buenas propiedades mecánicas, químicas, proporciona resistencia química a hidrocarburos, solventes y es un producto industrialmente seguro<sup>25</sup>.

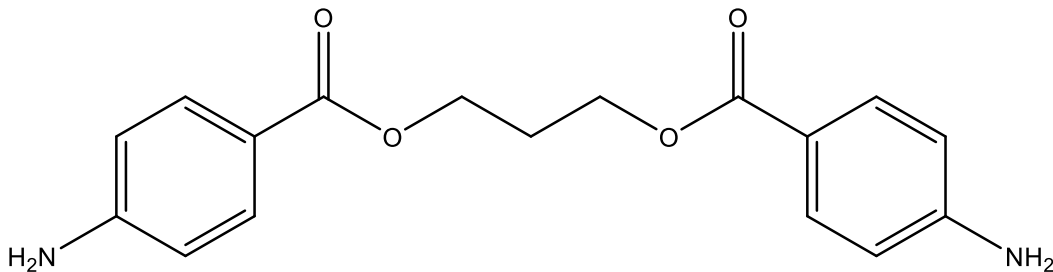


Figura 10. Estructura química del TMAB

Alguna de sus principales propiedades se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades TMAB. <sup>26</sup>

<b>Peso molecular</b>	314,34 g/mol
<b>Densidad</b>	1.14 g/mL a 140 °C
<b>Punto de fusión</b>	124-127 °C
<b>Forma</b>	Polvo (granulado)

#### 4.2.3.2 MCDEA

El Bis (4-amino-2-cloro-3,5-dietilfenil) metano (MCDEA) es muy usado como agente de curado para epóxidos, proporciona propiedades mecánicas y dinámicas mejoradas, es un excelente extensor de cadena para poliuretanos elastómeros.

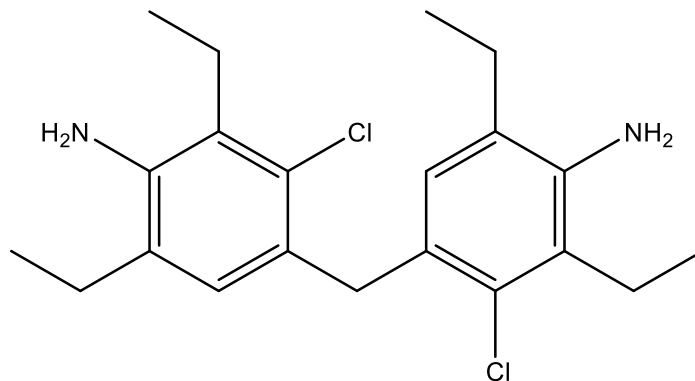


Figura 11. Estructura química MCDEA.

Alguna de sus principales propiedades se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades MCDEA.<sup>27</sup>

<b>Peso molecular</b>	370,37 g/mol
<b>Densidad</b>	1.154 g/mL
<b>Punto de fusión</b>	88 °C
<b>Forma</b>	Polvo cristalino

#### 4.2.4 Propiedades térmicas.

El análisis térmico, comprende un gran número de mediciones que comparten una característica común, miden la respuesta de un material al ser calentado o enfriado. El propósito es establecer una conexión entre las propiedades físicas específicas del material y la temperatura<sup>28</sup>. Por consiguiente, las propiedades térmicas, son ampliamente estudiadas en los polímeros, puesto que sirven para caracterizar y diseñar procesos utilizados en su fabricación y a su vez estimar su vida útil. El análisis térmico es uno de los procedimientos más importantes en la investigación y control de calidad en el desarrollo y fabricación de materiales poliméricos<sup>28</sup>. Entre los diferentes métodos que existen para analizar este tipo de propiedades, uno de los más importantes y más utilizados, tenemos: calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en ingles), análisis termogravimétrico (TG o TGA, por sus siglas en ingles), análisis termomecánico (TMA, por sus siglas en ingles), etcétera.

##### 4.2.4.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica que determina la cantidad de calor que adsorbe o libera una sustancia cuando es calentada o enfriada a una velocidad constante, es decir, encuentra transiciones que implican un intercambio de energía, teniendo en cuenta una temperatura constante y un tiempo determinado<sup>29</sup>. La DSC, es una técnica en la que la diferencia de la tasa de flujo de calor en una sustancia y una referencia se mide en función de la temperatura, mientras que la muestra se somete a un programa de temperatura controlada; disponiendo de dos capsulas, la temperatura de cada una se mide con sensores o ajustando potencias de calentamiento uniformes a la muestra a analizar como la de referencia (figura 12)<sup>30</sup>.

Entre las aplicaciones del DSC, mencionando su fácil y rápida determinación de la temperatura de transición vítrea, la evaluación cinética de las reacciones químicas, como lo son el curado, degradación térmica, además, con este tipo de técnica se puede evaluar la cinética de cristalización de un polímero, entre otras.

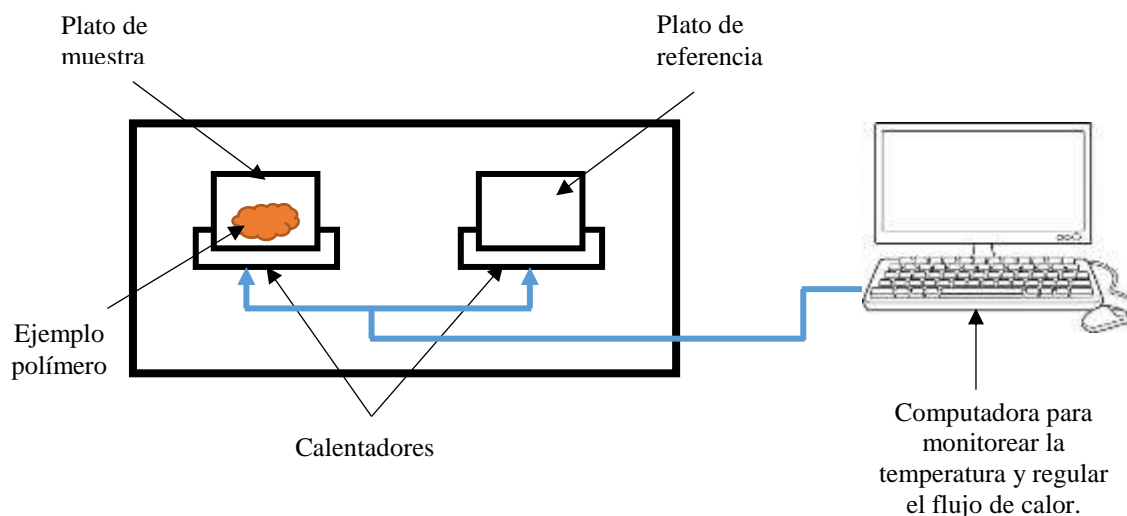


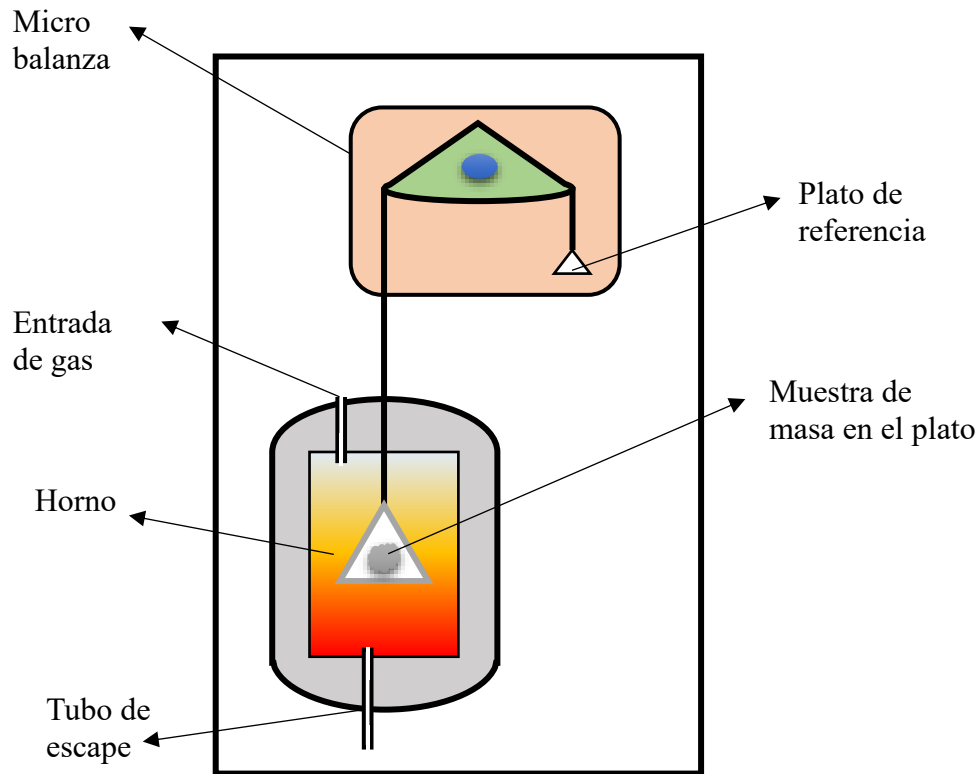
Figura 12. Equipo DSC.

#### 4.2.4.2 Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico, es una técnica que mide el porcentaje de peso de una muestra frente al tiempo o temperatura, teniendo en cuenta una atmosfera específica controlada<sup>29</sup>. Para este tipo de análisis se tienen en cuenta rangos de temperatura que va desde ambiente hasta los 1000 °C o más, un límite superior suficiente para aplicaciones de polímeros. Un gas de purga que fluye a través de la balanza crea una atmósfera que puede ser inerte, como nitrógeno, argón o helio; oxidante, como aire u oxígeno; o reductor, como gas de formación (8 - 10% de hidrógeno en nitrógeno). Con los polímeros, rara vez se necesita una atmósfera reductora. El contenido de humedad del gas de purga puede variar de seco a saturado<sup>31,32</sup>.

En un equipo de TGA (figura 13) se tiene una masa de muestra y una de referencia, estas se miden por separado con unas bobinas impulsoras calibradas con sensibilidad, la diferencia de masas se

envía como señal TG, por medio de una medición de masa diferencial, son cancelados los efectos de expansión del haz, el flujo de convección y la fuerza de flotación, consiguiendo una medición termogravimétrica de alta sensibilidad<sup>33</sup>.



*Figura 13. Partes fundamentales equipo TGA.*

Los resultados del análisis termogravimétrico, se presentan en formas de graficas llamadas termogramas, en este tipo de graficas se ubican en el eje de las coordenadas la variación del porcentaje de masa de la muestra específica a analizar y en el de la abscisa se muestra la variación ya sea de la temperatura o el tiempo o ambas, teniendo en cuenta el termograma inicial, se pueden construir graficas nuevas, como lo es la derivada de la curva inicial y se interpreta como la velocidad de la pérdida o ganancia de masa<sup>34</sup>.

Para entrar un poco más en contexto, tenemos un ejemplo (figura 14) , donde se evidencia en la muestra una pérdida de masa del poli etilenglicol a medida que se aumenta la temperatura (curva roja), la curva que representa el gradiente de la variación de masa (curva negra), corresponde a DTGA, es decir la derivada de la pérdida de masa en función de la temperatura<sup>35</sup>.

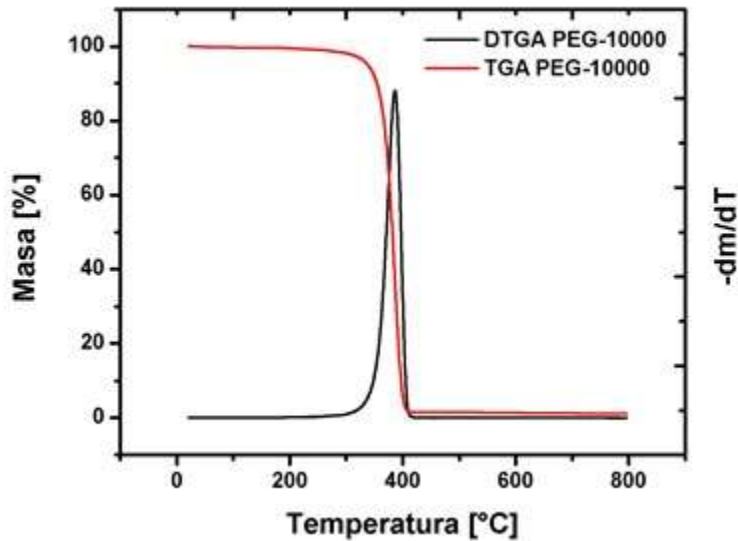


Figura 14. Ejemplo TGA de poli etilenglicol.

Con el uso del TGA, se pueden realizar estudios y analizar procesos de desorción, adsorción, y reacciones de descomposición en un ambiente de gas inerte o en presencia de oxígeno, aclarando que este procedimiento no permite identificar la composición química del compuesto ni los cambios térmicos que no estén asociados con pérdida de masa como lo es la cristalización, este solo registra el cambio de la masa del material teniendo en cuenta una variación de temperatura constante<sup>36</sup>.

#### 4.2.5 Propiedades mecánicas

Los materiales poliméricos presentan diferentes formas, tamaños y fuerzas, por ende este tipo de materiales están sujetos a cargas, es decir, fuerzas, que cuando se utilizan se deforman ya sea alargándose, comprimiéndose u retorciéndose, o simplemente se rompen en función de la carga



aplicada, el tiempo, la temperatura y otras condiciones, muchos de estos materiales, se utilizan en campos industriales por la buena relación que existe entre las propiedades mecánicas que presentan y sus costos, en comparación con otros materiales<sup>37</sup>.

#### 4.2.5.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se basa en obtener información de los materiales en cuanto a su comportamiento mecánico, por medio de una máquina de ensayos se presenta una deformación en la probeta del material a estudiar, ejerciendo una fuerza aplicada uniaxialmente en el sentido de la muestra; mientras esta presenta una deformación, se va registrando la fuerza ejercida como se muestra en la figura 15.<sup>38</sup>

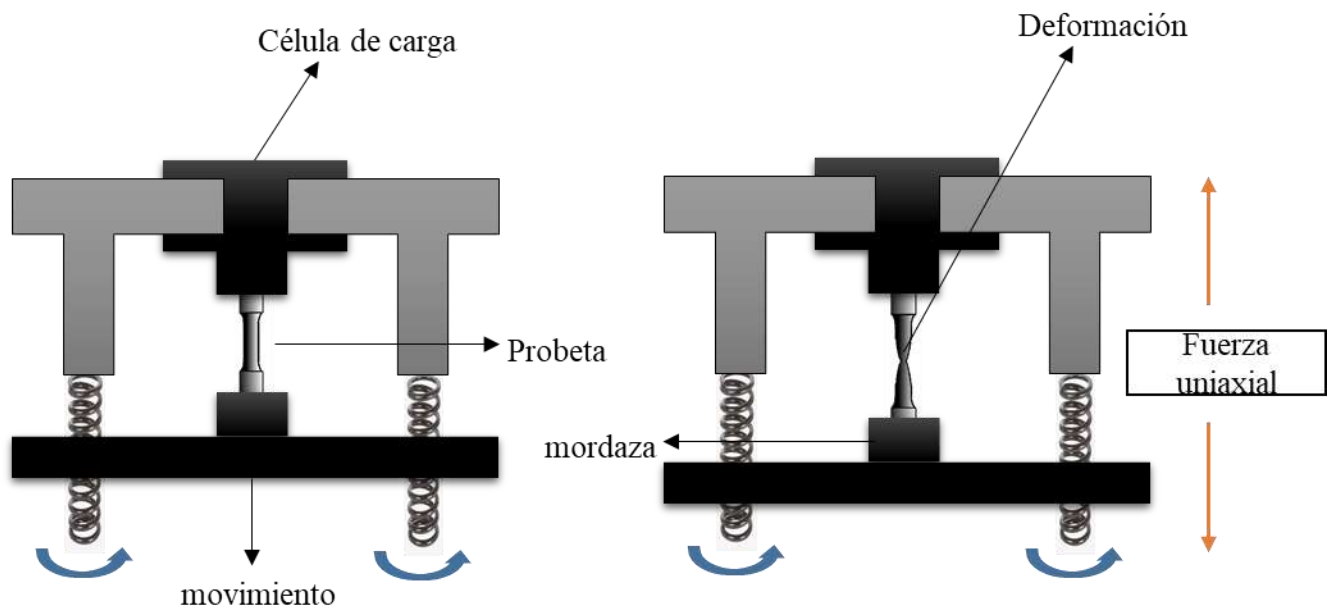
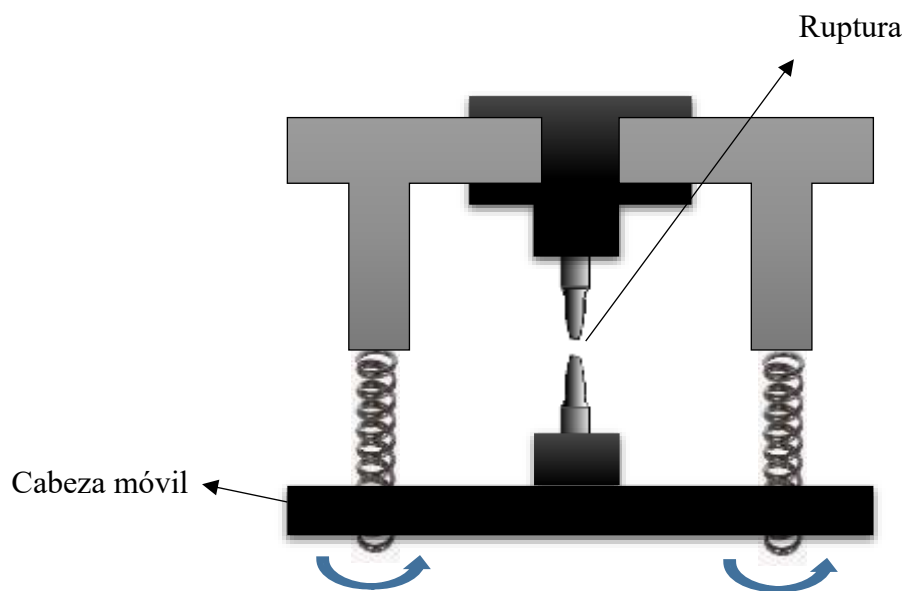


Figura 15. Máquina ensayo tracción.

Siendo más específicos, en la mitad se encuentra la probeta a analizar, la cual es una pieza que está regida generalmente por dimensiones normalizadas, las probetas tienen una sección transversal que

puede ser circular o rectangular, la parte central debe estar mecanizada; este se encuentra sujeto en una celda de carga por medio de dos mordazas ubicadas en los diferentes extremos de la misma, el extremo inferior se encuentra sujeto a la mordaza que genera un movimiento controlado, en el otro extremo se encuentra la mordaza fija, al momento de presentarse el movimiento, la probeta se estirara en dirección de su longitud y encogerá en el sentido del plano perpendicular, conforme se vaya aplicando la fuerza la probeta se presentara una deformación hasta llegar a su ruptura, también llamado momento de fractura (figura 16)<sup>38</sup>.



*Figura 16. Momento de fractura, ensayo tracción.*

Los datos son registrados gracias a un transductor (dispositivo de control de medidores eléctricos). Como resultado de esta prueba se obtiene una gráfica de esfuerzo vs deformación, con esta grafica es posible y fácil caracterizar el material dependiendo de los resultados que arroje la misma los cuales varían dependiendo el caso, en la figura 17 se especifica unas curvas de esfuerzo vs deformación características de ciertos polímeros<sup>38</sup>.

Para el análisis del ensayo de tracción, se tienen en cuenta el módulo de Young, conocido también como el módulo elástico, el cual caracteriza el comportamiento de este material según su fuerza aplicada, el módulo de elasticidad se rige por la ecuación 1.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

DONDE:

$E$  = modulo de Young (Pa)

$\sigma$  = esfuerzo (Pa)

$\varepsilon$  = deformación

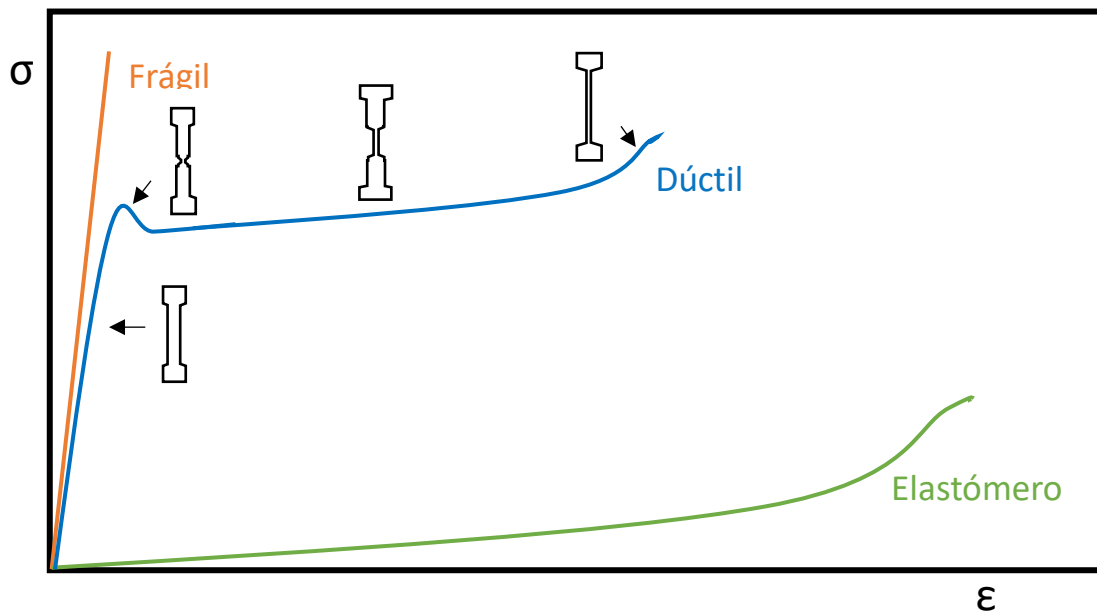


Figura 17. Curva tensión - deformación característica de los polímeros.

## 5. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 5.1 Síntesis del polímero

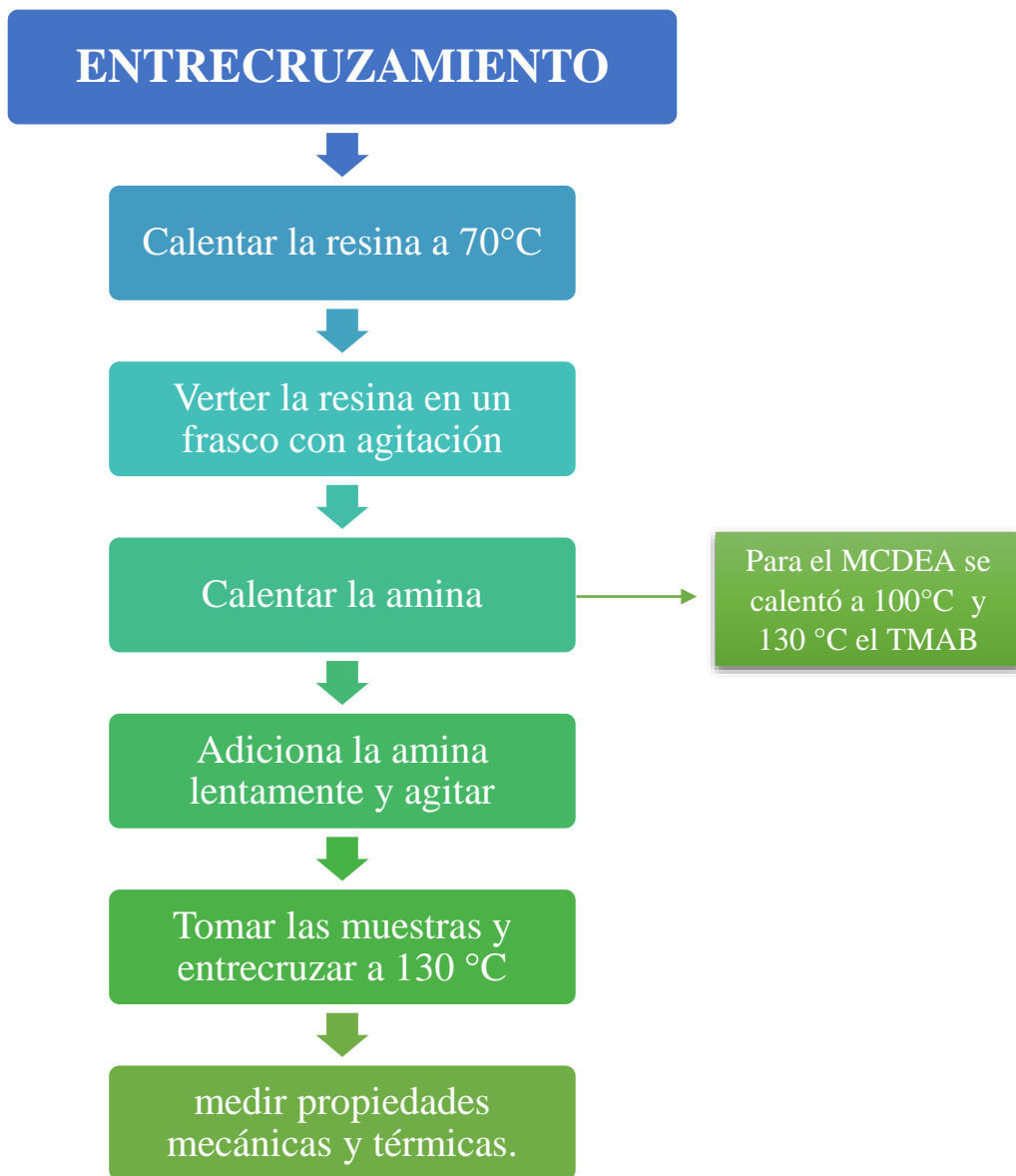


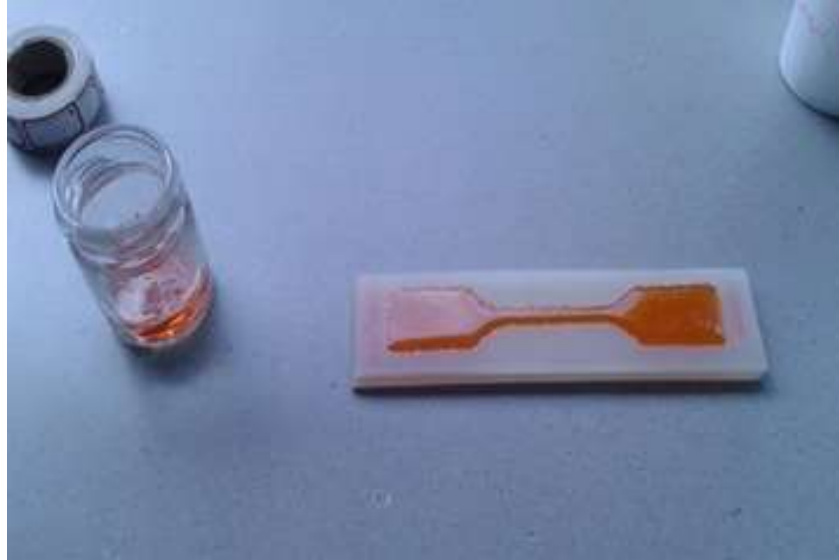
Figura 18. Diagrama específico de la síntesis del polímero.

Como se ha venido especificando, el material que se utilizó en este estudio es un sistema epoxi que se obtuvo mezclando diglicidil éter de bisfenol A (resina epoxica DGBEA) entrecruzando con las diaminas MCDEA y TMAB, los datos proporcionados fueron proporcionados por la universidad Nacional de Colombia sede Manizales, la relación del DGBEA/MCDEA y DGBEA/TMAB, las síntesis se hicieron a cantidades estequiométricas entre los grupos amino y los grupos oxirano.

El procedimiento específico (ver figura 18) fue:

- Se tomó inicialmente DGBEA a temperatura ambiente, el cual paso por un proceso de calentamiento para disminuir su viscosidad, teniendo en cuenta la proporción correspondiente en cada una de las mezclas.
- Se agregó a un recipiente con agitación seguida para mejorar su textura y conservar la sustancia homogénea.
- Previamente a añadir la amina a la resina, esta se debe calentar ya que se encuentra en estado sólido, para que se genere la reacción se debe encontrar en estado líquido y así poder obtener una mezcla compacta, la diamina MCDEA se calentó a una temperatura aproximada de 100 °C para obtenerla en estado líquido y TMAB a una temperatura de 130 °C aproximadamente.
- Finalmente se añadió el endurecedor respectivo en cada caso, agitando la mezcla para poder obtener un buen entremezclado en cada uno de los componentes y la mezcla pueda ser homogénea, las mezclas se entrecruzaron a una temperatura de 130 °C, esa es la temperatura de curado en donde se generó la polimerización.

- La mezcla obtenida se vertió en un molde horizontal (Ver figura 19) para garantizar la lámina con el espesor especificado por las normas, para los posteriores ensayos de caracterización.



*Figura 19. Muestra entrecruzada y probeta sistema DGBEA/TMAB.*

## **5.2 Prueba mecánica**

Para la prueba mecánica se tuvo en cuenta un ensayo de tracción, se utilizó un equipo universal de ensayos mecánicos Shimadzu AGX-50 kN ubicada en el Laboratorio de Polímeros y Materiales Compuestos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Siguiendo lo especificado en la norma estándar (ASTM D 638-10) se realizaron los ensayos, teniendo en cuenta temperatura ambiente y una capacidad de celda básica de 20 kN utilizando una velocidad de tracción de 10mm/min y mordazas tipo cónicas, las dimensiones de las probetas usadas era de 25x6x2 mm<sup>3</sup>.

## **5.3 Prueba térmica**

### *5.3.1 Análisis termogravimétrico*

Para el análisis termogravimétrico se utilizó un analizador TA instruments Q-50 ubicado en la universidad Nacional de Colombia sede Manizales, las pruebas fueron realizadas en atmosfera de nitrógeno con un flujo de purga de 60mL/min, se utilizó una rampa de calentamiento de 10°C/min con muestras de 5 a 10 mg utilizando capsulas de platino teniendo en cuenta la norma estándar de ASTM-E1131-08.

### 5.3 Manejo de datos

Para el manejo de datos se utilizó el software OriginPro 2019b, este es un programa de manejo y análisis de datos, el cual incluye diferentes paquetes para el ajuste de curvas, ajuste de picos, este tipo de ajuste, el programa lo hace gracias a un ajustador de mínimos cuadrados no lineal, lo que facilita el manejo y organización de datos.

Los datos fueron exportados y se realizaron los cálculos en el mismo programa utilizando un lenguaje de programación el cual facilita su organización, la gráfica la muestra automáticamente, en la figura 20 se puede apreciar el manejo de datos que se utilizó en este proyecto.

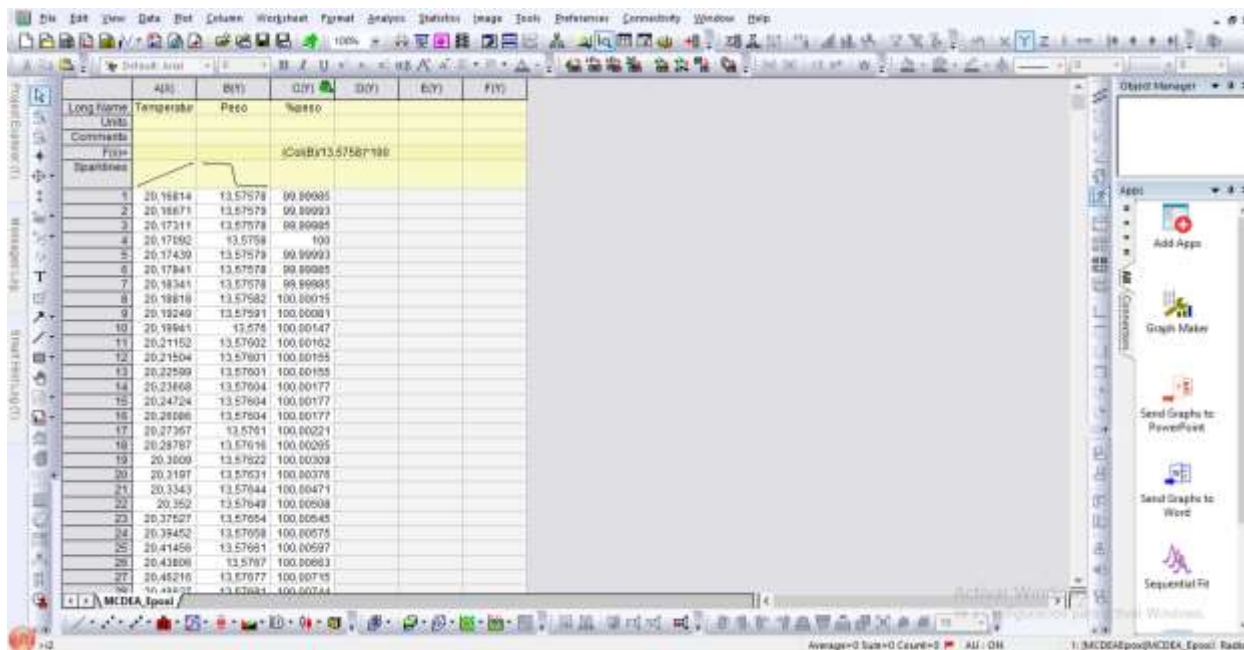


Figura 20. Datos y cálculos realizados en OriginPro 2019b, DGEBA/MCDEA.

Con el uso de los datos anteriores, se realizó la grafica utilizando el indicativo plot (gráfico), como se puede observar en la figura 21.

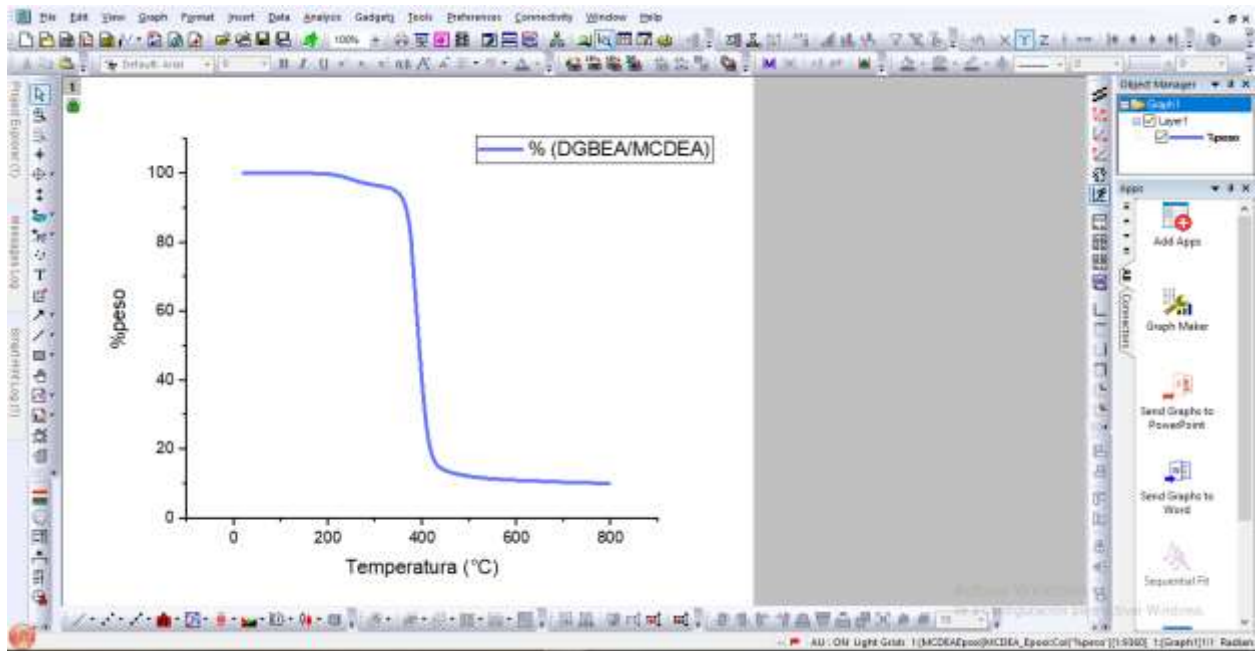


Figura 21. Grafica reportada por el programa, ensayo TGA (DGEBE/MCDEA).



## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 caracterización de los polímeros obtenidos

#### 6.1.1 Prueba termogravimétrica para los sistemas epoxi/amina (EA).

La grafica especificada en la figura 22, muestra el termograma para la muestra epoxi amina DGBEA/TMAB, el cual se realizó utilizando manejo de software OrigenPro 2019b, los datos proporcionados inicialmente para el TGA, fueron el peso y la temperatura, esos son los datos que registra el programa, sin embargo para el termograma de la figura 22 y 24 se tuvo que realizar unos cálculos para que la gráfica quedara en porcentaje de peso vs temperatura, ya que era necesario saber qué porcentaje de masa disminuyo mientras se aumentaba la temperatura de la muestra.

Para realizar un análisis más completo, se realizó un DTGA, es decir, se encontró la derivada de la muestra (ver figura 23), esta lo que proporciona es la velocidad de descomposición de la muestra, lo que hace más sencillo el análisis en cuanto a la temperatura máxima.

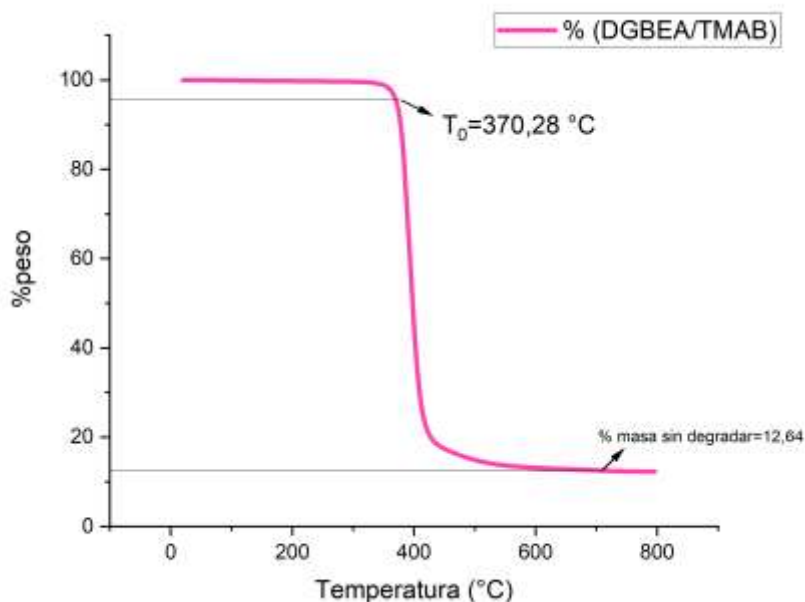


Figura 22. TGA de mezcla DGEBA/TMAB.

Se pudo evidenciar una pérdida en el porcentaje de masa en una temperatura de 370,28 °C, temperatura inicial en la que comenzó la degradación, ya que se evidencia una pérdida significativa

en el porcentaje de masa, el DGBEA/TMAB presento una sola etapa de degradación, con un maximo de perdida de masa de 393,73 °C (ver figura 23), es decir la temperatura maxima, la cual me especifica el alcance que tiene el material al ser expuesto a una fuente de energía constante.

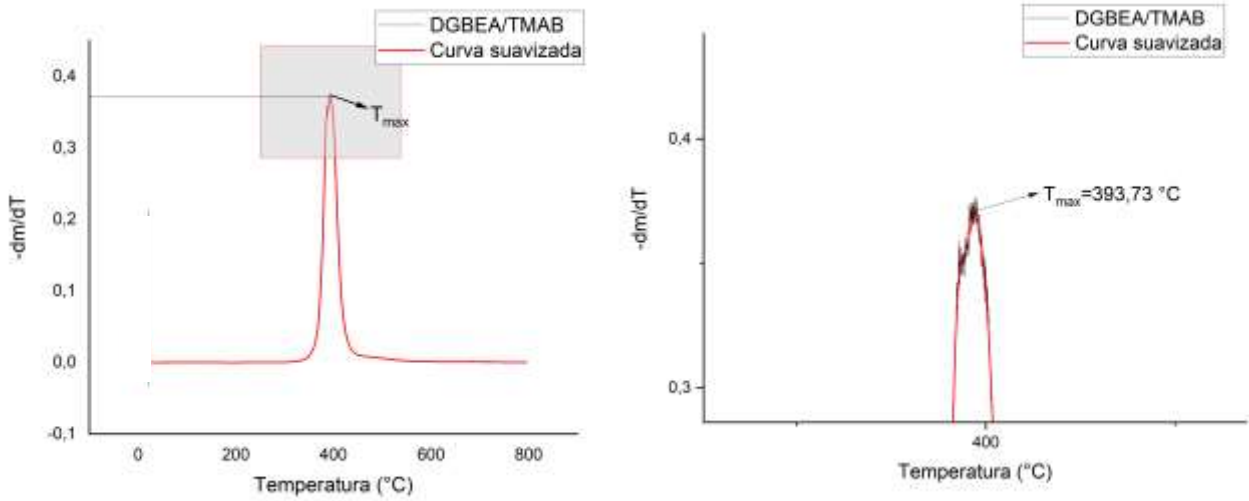


Figura 23. DTGA polímero DGBEA/TMAB

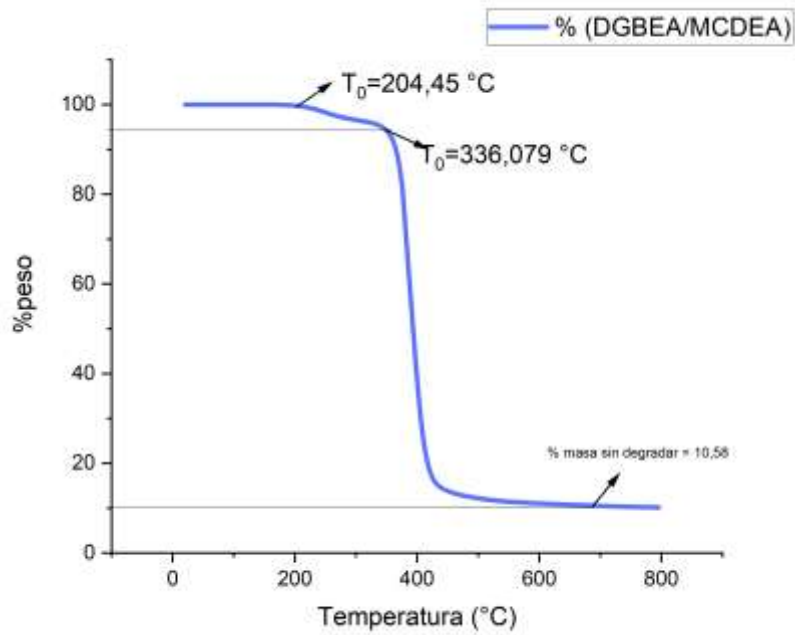


Figura 24. Termograma DGBEA/MCDEA.

En el caso del sistema DGBEA/MCDEA presento una estabilidad térmica buena, en la figura 24, se evidencio una pérdida de porcentaje de masa iniciales en dos puntos, uno en una temperatura de 204,45 °C y 336,12 °C, en la primera temperatura se registró una pequeña fluctuación en el termograma mostrando una perdida en el porcentaje de masa, sin embargo, esta diferencia no es tan significativa tomando la segunda temperatura en si como la temperatura inicial ya que ahí comienza una pérdida de masa significativa y constante. En la gráfica del DTGA (figura 25) se registró una temperatura máxima de 389,59°C.

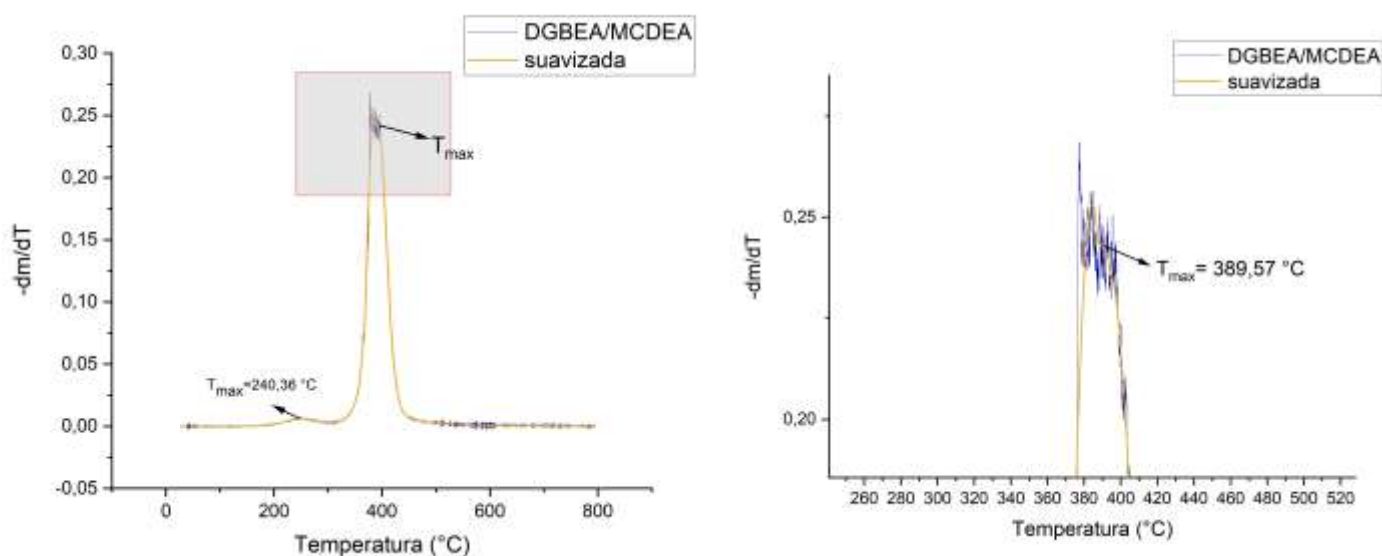


Figura 25. DTGA polímero DGBEA/MCDEA.

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de la prueba TGA para los diferentes sistemas EA. El entrecruzamiento con TMAB presento aproximadamente 5°C más de estabilidad en comparación con el DGBEA/MCDEA, sin embargo la diferencia presentada en la temperatura máxima no es un cambio grande, este tipo de diferencias en la estabilidad térmica están ligadas a los grupos químicos presentes en la muestra, ya que dependiendo el origen y las propiedades de la molécula se pueden presentar mejoras o no en el material.

Tabla 3. Propiedades térmicas del sistema EA.

Sistema epoxi/amina	T <sub>0</sub> (Td5%) (°C)	Tmax (°C)	% Masa sin degradar
DGBEA/TMAB	370,28	393,73	12,64
DGBEA/MCDEA	336,07	389,57	10,58

### 6.1.2 Prueba mecánica para los sistemas EA.

Para el ensayo de tracción se obtuvo una gráfica de esfuerzo vs deformación (ver figura 26), para la realización de esa grafica fue necesario el uso de fórmulas ya que los datos arrojados por la maquina únicamente era la distancia (mm) y la fuerza (N), los cálculos matemáticos fueron manejados en el programan OrigenPro, como se especificó anteriormente, para hallar el esfuerzo y la deformación, se usaron las formulas (2),(3):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3)$$

Donde:

- $\sigma =$  Esfuerzo
- $\varepsilon =$  Deformación
- $\Delta L =$  Variación de la Longitud
- $P =$  Carga aplicada
- $A_0 =$  Area de sección transversal inicial
- $L_0 =$  Longitud unicial

En la figura 26 y tabla 4 se evidencian las propiedades mecánicas de los sistemas epoxi aminas utilizados, a los cuales se le realizo una prueba de tracción en los diferentes casos, obteniendo un módulo de Young de 8,58 Mpa para el DGBEA/MCDEA, este valor es mayor en comparación con el entrecruzado de TMAB que obtuvo un módulo de 7,08, este valor me indica el comportamiento de la recta del material, es decir, la parte en que el comportamiento del material es elástico y

prácticamente lineal, esto es debido a que la diamina TMAB, presenta una cadena de carbonos lineales entre dos anillos aromáticos lo que la convierte en un material más flexible facilitando su movilidad estructural<sup>39</sup>.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de sistema EA.

Sistema EA	Esfuerzo de tracción (N/mm <sup>2</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Limite elástico (%)
DGBEA/MCDEA	41,7	8,58	4,72
DGBEA/TMAB	26,4	7,08	3,73

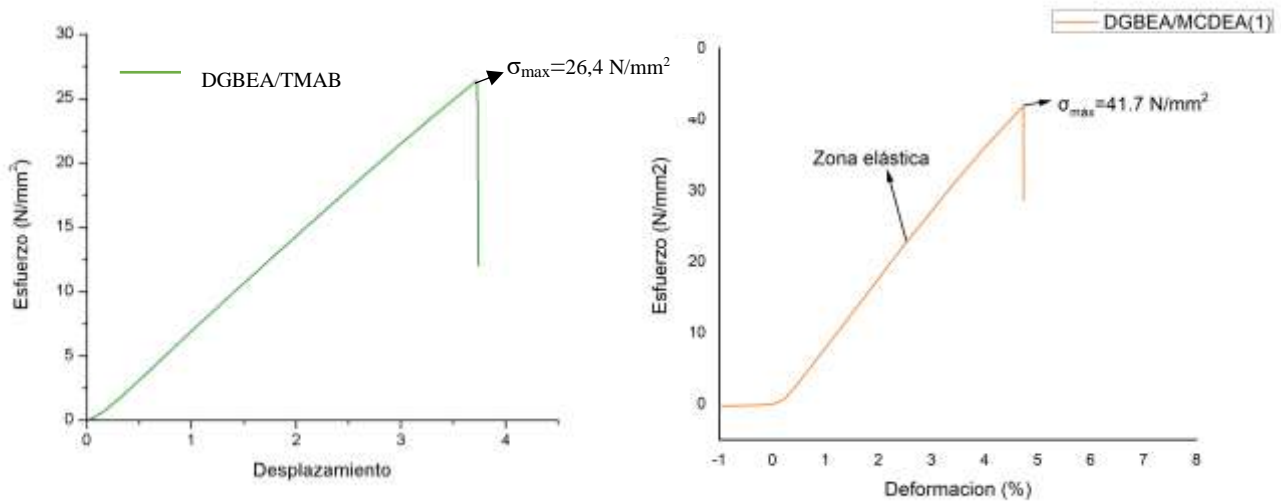


Figura 26. Curva esfuerzo vs deformación sistemas EA.

El esfuerzo máximo alcanzado para sistema DGBEA/MCDEA fue de 41,7 N/mm<sup>2</sup> con respecto al TMAB obteniendo un valor notoriamente menor de 26,4 N/mm<sup>2</sup>, el esfuerzo depende del módulo de Young, es decir de su zona elástica, por lo que, en el caso de la diamina TMAB, su módulo es menor comparado con la MCDEA, y si su módulo es menor, menor es la deformación del material, por ende como se esperaba el TMAB presento menor deformación, para este tipo de análisis se tuvo en cuenta el comportamiento de la gráfica (figura 26) y la ecuación (1).

### 6.1.3 Calorimetría diferencial de barrido para el sistema EA

Para realizar el análisis del DSC, se realizó una revisión bibliográfica en donde se realizaron estudios semejantes a este teniendo en cuenta la misma relación de sistema EA, ya que no fue posible la tomar los datos para este ensayo; según lo reportado en la literatura, para el entrecruzamiento MCDEA/TMAB, se obtuvieron graficas de DCS, registrando los siguientes datos (figura 27).

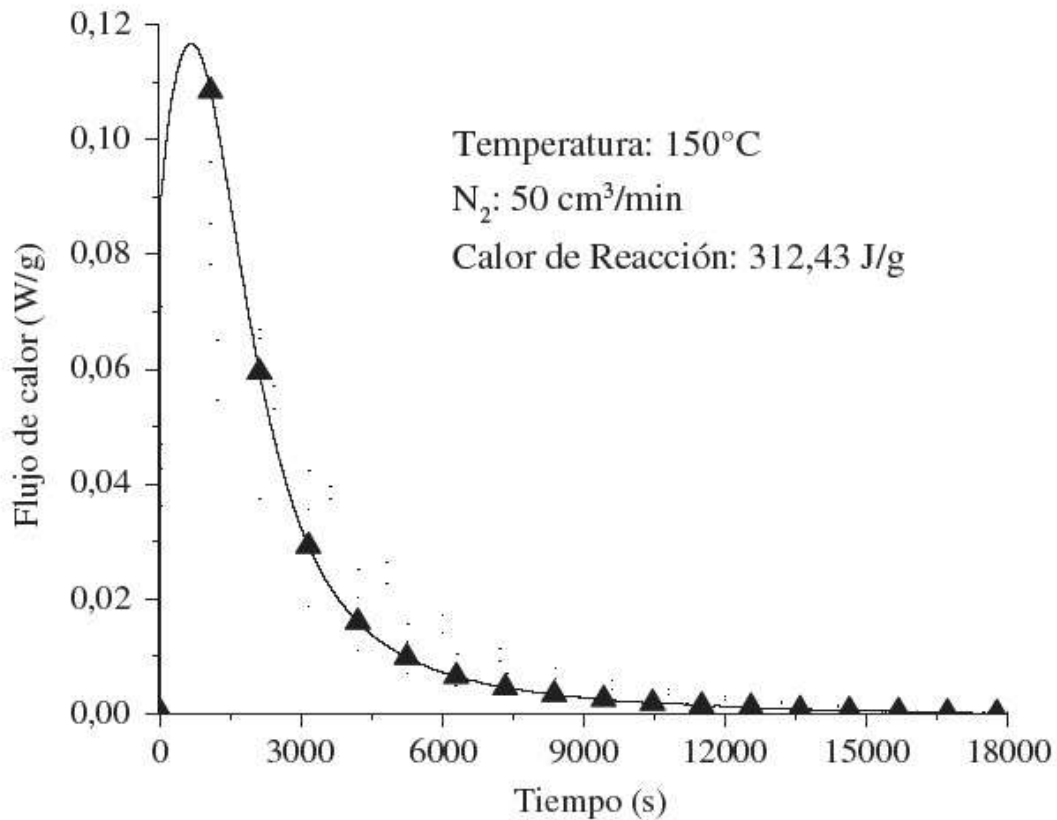


Figura 27. Calor de reacción para el sistema EA a temperatura constante (150 °C)

En esta investigación se analizó el comportamiento de calor de la reacción a 150 °C y el tiempo necesario para regresar a la línea base, para esto se utilizó un equipo DSC TA Instruments Q-2000, con un flujo de 50 cm<sup>3</sup> / min, ellos obtuvieron un calor de reacción máxima de 312,43 en 300 minutos, mientras transcurría el tiempo se presentó una disminución notoria del flujo de calor<sup>5</sup>.

## 6.2 selección de la mejor amina

Con las curvas obtenidas se pudo analizar la influencia que presenta el curado en los diferentes entrecruzados, la prueba térmica arrojó resultados de la temperatura máxima que el polímero podría alcanzar, analizando y comparando los resultados, el DGBEA/TMAB presenta una estabilidad térmica mayor que DGBEA/MCDEA, teniendo en cuenta que los dos agentes de entrecruzamiento presentados (MCDEA-TMAB) son compuestos que presentan grupos aminos y aromáticos, dos grupos en cada caso, para explicar las diferencias en sus propiedades térmicas se enfocó en el comportamiento de los otros grupos funcionales que hacen parte de la molécula y el cómo reaccionaban, en el caso de la diamina TMAB, contiene ésteres los cuales son un grupo conocido por formar puentes de hidrógeno, este sistema EA presentó buena estabilidad térmica, sin embargo, el MCDEA, también presentó una estabilidad térmica favorable en comparación con el caso anterior, debido a que el MCDEA contiene halógenos en su molécula como son los dos grupos cloruro que debido a su baja polaridad y que el halógeno es más electronegativo que el carbono, presenta estabilidad en la unión de su enlace lo que convierte al MCDEA en un compuesto más resistente a la degradación.

Se esperaba que el entrecruzamiento realizado MCDEA tuviera una resistencia térmica mucho mayor que el entrecruzado con TMAB, ya que como se decía anteriormente con el grupo funcional presente en su cadena carbonada y los cloros, los enlaces carbono - halógeno suelen generar mejoras significativas.<sup>40</sup>

Este tipo de materiales lo que sufren son pequeñas degradaciones, pero no se funden, en cuanto a resistencia mecánica, es decir, la capacidad que tiene el polímero a romperse, el DGBEA/TMAB presentó una resistencia menor que DGBEA/MCDEA, de hecho presentaron una diferencia considerable, ya que el primer polímero tuvo un esfuerzo máximo de  $26 \text{ N/mm}^2$ , el segundo obtuvo una resistencia de  $41,62 \text{ N/mm}^2$ , la diferencia obtenida puede presentarse debido a los cambios repentinos de temperatura al que son sometidos al entrecruzamiento por el calentamiento, favoreciendo el apareamiento de fracturas y seguidamente rupturas en el material.

En cuanto a la selección de la mejor amina, ambas presentaron buenas mejoras en los materiales, sin embargo el proceso de curado presentado por la diamina MCDEA, es mucho más eficiente, ya que ciertamente alcanza buena estabilidad térmica, de hecho la diferencia que presentó fue muy

pequeña en comparación con la TMAB, la resistencia mecánica si fue muy notable, en general la diamina MCDEA, presento mejoras buenas en el material y mucho más eficientes que la diamina TMAB.



## **7. Conclusiones y recomendaciones.**

De acuerdo con los resultados obtenidos, las resinas epoxicas presentan mejoras significativas al ser expuestas a un buen proceso de curado, en el caso de las dos aminas utilizadas, ambas presentaron buenos resultados, esto gracias al estudio previo realizado con el fin de analizar las propiedades térmicas y mecánicas, evidenciando la importancia que tienen las pruebas de análisis térmico y mecánico, dejando claro el su funcionamiento y usos, pero sobre todo su fundamento.

Se recomienda realizar más pruebas para mejorar los resultados obtenidos y realizar más estudios utilizando el equipo de DSC, para ampliar los conocimientos en este caso, quedando como una alternativa para futuras investigaciones, también, el mejorar las propiedades del material en cuanto a la porosidad, fracturas, utilizando otros tipos de aditivos como las arcillas, se podría analizar de forma más detallada la influencia de la temperatura y la dureza del material.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. Mathew VS, Sinturel C, George SC, Thomas S. Epoxy resin/liquid natural rubber system: Secondary phase separation and its impact on mechanical properties. *J Mater Sci.* 2010;45(7):1769-1781. doi:10.1007/s10853-009-4154-8
2. Agarwal KK, Agarwal G. A study of mechanical properties of epoxy resin in presence of different hardeners. *Technol Innov Mech Eng.* 2019;(June).
3. Tudorachi N, Mustata F. Curing and thermal degradation of diglycidyl ether of bisphenol A epoxy resin crosslinked with natural hydroxy acids as environmentally friendly hardeners. *Arab J Chem.* 2020;13(1):671-682. doi:10.1016/j.arabjc.2017.07.008
4. López-Barajas F, Ramos-DeValle LF, Sánchez-Valdes S, et al. Curing kinetics of diglycidyl ether of Bisphenol-A epoxy system using a tertiary amine, through the study of its rheometric characteristics. *Polym Test.* 2019;73(November 2018):346-351. doi:10.1016/j.polymertesting.2018.11.043
5. Mesa Rueda FA, Cuéllar Burgos A, Perilla Perilla JE, Vargas-Hernández C. Characterization of DGEBA and TMAB monomers, and monitoring the cross linking reaction by Raman spectroscopy | Caracterización de los monómeros DGEBA y TMAB, y seguimiento de la reacción de entrecruzamiento por espectroscopia Raman. *Ingeniare.* 2013;21(3):414-423. doi:10.4067/S0718-33052013000300011
6. Jaramillo I, Morales C. ESTUDIO DEL CURADO DE RESINAS EPÓXICAS EMPLENADO ESPECTROSCOPIA INFRARROJO. *Dyna.* 2004.
7. Jagtap SB, Rao VS, Ratna D. Preparation of flexible epoxy/clay nanocomposites: Effect of preparation method, clay modifier and matrix ductility. *J Reinf Plast Compos.* 2013;32(3):183-196. doi:10.1177/0731684412462916
8. Jose G. Epoxidación de ésteres grasos insaturados. 2015.
9. M.S B. *Polymer-Plastics Technology and Engineering Epoxy Resins from 1980 to Date .;* 2006.
10. Garc EE, Tecnolog MEN, Pol DE. DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS

FOTOCURABLES CON PROPIEDADES ANTIMICROBIANAS, UTILIZANDO NANOPARTÍCULAS DE PLATA, COBRE Y ÓXIDO DE COBRE, A PARTIR DE MATERIALES HÍBRIDOS POLIMÉRICOS PRODUCIDOS MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE LA FOTOPOLIMERIZACIÓN TIOL- ENE CON EL. 2014.

11. Nuevas redes termoestables a partir de una resina epoxica modificada.
12. Cedeño AJ, Vázquez-torres H. Kinetic Study on the Effect of Curing Polyphenylsulfone Epoxy Resin / Amina by Differential Calorimetry. 2010;20:287-294.
13. Boonlert-uthai T, , Kentaro Taki AS. Properties of DGEBA Modified with Synthesized BPA / PEG Hyperbranched Epoxy after Their. *MDPI*. 2020;(1):1-14. doi://doi.org/10.3390/polym12102240
14. Liu C, Sun M, Zhang B, Zhang X, Xue G, Zhang X. Diamine-functional bisphthalonitrile : Synthesis , characterization and its application in curing epoxy resin. *Eur Polym J*. 2019;121(145):109304. doi:10.1016/j.eurpolymj.2019.109304
15. Hsu Y, Lin K, Lin T, Fang Y, Chen S, Sung Y. Properties of epoxy-amine networks containing nanostructured ether-crosslinked domains. *Mater Chem Phys*. 2012;132(2-3):688-702. doi:10.1016/j.matchemphys.2011.11.087
16. Yu M, Fu Q, Zhang T, et al. Thermochemical Properties and curing kinetics of epoxy resin toughened by dimer acid diglycidyl ester. *Thermochim Acta*. 2021;699(October 2020):178910. doi:10.1016/j.tca.2021.178910
17. ر. الدين زين. *Tema 8.- MATERIALES POLIMERICOS DE MAYOR INTERÉS INDUSTRIAL.*; 2005.
18. 1.2 Estructura molecular – eCUCEI. <https://eucei.com/polimeros/introduccion/1-2-estructura-molecular/>. Accessed July 1, 2021.
19. Morancho JM. Estudio del curado de materiales compuestos por un sistema epoxi y partículas elastoméricas. 1996:140. <http://hdl.handle.net/10803/5896>.
20. Mesa Rueda AF, Cuéllar Burgos A, Vargas Hernandez C, Perilla Perilla JE. KINETIC AND MECHANISM OF DIGLYCIDYL ETHER OF BISPHENOL A AND TRIMETILEN

- GLICOL di-p- AMINO BENZOATE CROSSLINKING. *Dyna*. 2009;77(162):21-29.
21. Torres Miño MA. Modificación del sistema epoxi DGEBA/1,3-BAC con el termoplástico ABS : propiedades mecánicas. 2002.
  22. Fallis, A.GNursalam2016 metode penelitian. *Análisis y Evaluación de Propiedades Térmicas y Mecánicas de Materiales Resínicos Del Tipo Epoxi/Amina*. Vol 53.; 2013.
  23. Navabpour P, Nesbitt A, Degamber B, Fernando G, Mann T, Day R. Comparison of the curing kinetics of the RTM6 epoxy resin system using differential scanning calorimetry and a microwave-heated calorimeter. *J Appl Polym Sci*. 2006;99(6):3658-3668. doi:10.1002/app.22869
  24. Dictionary E. Encyclopedic dictionary of polymers. *Choice Rev Online*. 2007;45(03):45-1201-45-1201. doi:10.5860/choice.45-1201
  25. Rueda FAM, Burgos AC, Hernández CV, Perilla JE. Kinetic and mechanism of diglycidyl ether of bisphenol a and trimetilen glicol di-p-aminobenzoate crosslinking | Cinética y mecanismo de entrecruzamiento de diglicidil eter de bisfenol-a con trimetilen glicol di-p-aminobenzoato. *DYNA*. 2010;77(162):21-29.
  26. TMAB, National library of medicine PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/substance/204357306>. Accessed June 30, 2021.
  27. 4-[(4-Amino-2-chloro-3,5-diethylphenyl)methyl]-3,5-dichloro-2,6-diethylaniline | C21H27Cl3N2 - PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/87073569>. Accessed June 30, 2021.
  28. Menczel JD, Prime RB. *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications.*; 2008. doi:10.1002/9780470423837
  29. Yenny Alejandra Granados Cristancho. Importancia de los ensayos TGA y DSC en el estudio de propiedades térmicas de mezclas asfálticas. 2015.
  30. Simular O, Perfeccionamiento DSC. Práctica 1 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE BARRIDO 1. :1-7.
  31. Solís Cordero A. Calificación E Instalación De Un Analizador Termogravimétrico En El

- Laboratorio De Caracterización, Pruebas Y Análisis De Materiales En El Coyol De Alajuela. 2015.
32. Manals E, Penedo M, Giralt G. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Tecnol Química*. 2011;XXXI(2):36-43. <http://www.redalyc.org/pdf/4455/445543773005.pdf>.
  33. junmeng, Di Xu; Zhujun, Xi Yu; Yang S. Processing thermogravimetric analysis data for isoconversional kinetic analysis of lignocellulosic biomass pyrolysis: Case study of corn stalk Junmeng. *Elsevier*. 2017:1-41.
  34. Eduardo M. Determinación de la composición química y mineralógica, de 5 tipos de calizas y la relación con su grado de quemabilidad en la producción de óxido de calcio, en el bloque sur de la cantera de carbonatos, Planta San Miguel, Cementos Progreso.
  35. Dsc QD. Thermogravimetric Analysis (TGA) and Simultaneous DSC and TGA (SDT) Q-series. 2018.
  36. Villegas E. Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. 2012:25-32.
  37. Madrid DE, Doctoral T. PROPIEDADES MECANICAS ,COMPORTAMIENTO VISCOELASTICO Y ANISOTROPIA DE COPOLIMEROS DE ALCOHOL VINILICO Y ETILENO. 1995.
  38. David A, Becerril L. Obtención de curvas esfuerzo-deformación verdaderas del PP y copolímeros en bloque a velocidad de deformación constante aplicando correlación de imágenes digitales. 2014.
  39. Zhang Y, Vyazovkin S. Effect of substituents in aromatic amines on the activation energy of epoxy-amine reaction. *J Phys Chem B*. 2007;111(25):7098-7104. doi:10.1021/jp071001h
  40. Cort AL. Efecto de la Incorporación de Nanocargas Laminares de Montmorillonita Sobre la Cinética, Propiedades Mecánicas y Degradación Térmica de un Sistema Epoxi Amina Mezclado con Poliétilenglicol (PEG). 2019.

