



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**UNIDAD ACADÉMICA PROFESIONAL TIANGUISTENCO**

---

***“EVALUACIÓN DE AZODICARBONAMIDA Y  
BICARBONATO DE SODIO COMO AGENTES  
ESPUMANTES EN RESINAS DE POLIETILENO (PE)  
Y ETILENO VINIL ACETATO (EVA).”***

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO EN PLÁSTICOS

P R E S E N T A

**ABRAHAM NÁJERA AYALA**

DIRIGIDO POR:

**M. EN A. HUGO MANUEL MORALES ARELLANO**

TIANGUISTENCO, MÉX. MARZO 2014



**UAEM** | Universidad Autónoma  
del Estado de México

## Unidad Académica Profesional Tianguistenco

El comité revisor designado por la Unidad Académica Profesional Tianguistenco de la Universidad Autónoma del Estado de México, aprobó la tesis **EVALUACIÓN DE AZODICARBONAMIDA Y BICARBONATO DE SODIO COMO AGENTES ESPUMANTES EN RESINAS DE POLIETILENO (PE) Y ETILENO VINIL ACETATO (EVA)** del C. ABRAHAM NÁJERA AYALA el día 9 de Abril de 2014.

ATENTAMENTE  
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO  
*"2014, 70 Aniversario de la Autonomía ICLA-UAEM"*



M. EN A. Hugo Manuel Morales Arellano

Uo.Bo

Dr. Ana Lilia Flores Vázquez

M. Liliana Ivette Ávila Córdoba



[www.uaemex.mx](http://www.uaemex.mx)

Paraje el Tejocote, San Pedro Tlaltizapan, Tianguistenco Estado de México  
CP. 52640  
Teléfono (722) 4810800

## **DEDICATORIAS**

### **EN DIOS CONFÍO Y A MIS PADRES LES DEDICO.**

Esta tesis va dedicada a varias personas, las cuales han dejado una huella en mí, que me han ayudado a crecer en todos los ámbitos de mi vida.

A mis padres por su apoyo brindado incondicional a lo largo de todas las etapas que he vivido, les agradezco a los dos infinitamente todo lo que han hecho por mí.

A mis hermanos quienes cada uno de ustedes me han dado aliento y consejos los cuales me han ayudado a lograr mis objetivos y por todo su apoyo muchas gracias hermanos.

A mis amigos y compañeros, con los cuales pasé 5 años de mi vida juntos y quienes a pesar de todo siempre fueron de gran ayuda, mostrándome su apoyo y amistad para seguir adelante.

**Abraham Nájera Ayala.**

## **Agradecimientos**

A Dios que me ha dado fuerzas para seguir adelante a pesar de circunstancias difíciles, que me ha guiado para ser un hombre de bien y que siempre ha estado cuando más lo necesito, gracias por tu apoyo dios mío.

Agradezco a la Unidad Académica Profesional Tianguistenco Universidad Autónoma del Estado de México de este nuevo profesionista orgulloso de sus orígenes.

Agradezco a la Dra. Georgina Montes de Oca por su infinita paciencia por su ayuda y todo el apoyo brindado en su asesoría de este trabajo, el cual culmina con un trabajo muy importante en mi vida el cual aporta un pequeño “grano de arena” a la investigación de plásticos.

Agradezco al M.A. Hugo Manuel Morales Arellano asesor de tesis por su gran ayuda, consejos y retroalimentaciones para que de este trabajo culmine una etapa más de mi vida y comience una nueva como Ingeniero en plásticos.

Agradezco a la M. Adriana López por todo su apoyo, ayuda y confianza en la realización de este trabajo el cual culmina exitosamente.

Al Centro de Ingeniería y Tecnología del Plástico (CIATEQ) sede estado de México, por todo el apoyo brindado en utilización de equipos y materiales para el logro de este proyecto.

Al Ing. Italo Martínez, Ing. Susana Valencia, Q. Ma. Guadalupe e Ing. Pedro Vázquez por toda la ayuda y apoyo brindado en la ejecución de pruebas y asesorías técnicas.

A mis profesores y profesoras que gracias a ellos he aprendido que en la vida siempre será de aprendizaje y que está solo en nosotros el poder aprender y aplicar en la vida diaria lo aprendido.

**Abraham Nájera Ayala**

## CONTENIDO

Acrónimos	7
Resumen	8
Problemática	9
Objetivos	10
Introducción	11
<b>CAPITULO I ANTECEDENTES</b>	<b>12</b>
1.1 Definición de polímero	12
1.1.1 Clasificación de los polímeros de acuerdo a su estructura interna.	13
1.1.2 Mecanismos de polimerización.	13
1.1.3 Métodos de polimerización.	15
1.2 Polietileno (PE).	16
1.2.1 Estructura del polietileno y su síntesis.	17
1.2.2 Propiedades físicas del polietileno.	18
1.2.3 Propiedades químicas del polietileno	20
1.3 Etileno Vinil Acetato (EVA).	23
1.3.1 Propiedades y características.	24
1.3.2 Aplicaciones del EVA.	25
1.4 Espuma plástica.	28
1.5 Agentes espumantes.	31
1.5.1 Agentes espumado químicos.	32
1.5.2 Importancia en el mercado.	33
<b>CAPITULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL.</b>	<b>39</b>
2.1 Materiales y equipo.	39
2.1.1 Inyectora demag sumitomo systec	39
2.1.2 Esterilizador electrónico de vapor	39
2.1.3 Dispositivo de densidad.	40
2.1.4 Medidor de alturas mitutoyo LH-600	41
2.1.5 Dispositivo de compresión.	42
2.1.6 Microscopio óptico olympus BX 41	43
2.1.7 Inserto de probeta.	43
2.1.8 Materiales	44
2.2 Metodología	46
2.2.1 Preparación de mezcla e inyección de prototipo.	47
2.2.2 Densidad	48
2.2.3 Resistencia a la compresión método Ciateq basado en la norma ASTM 3575	52
2.2.4 Microscopía óptica	54
2.2.5 Absorción de agua.	55

<b>CAPITULO III RESULTADOS.</b>	<b>59</b>
3.1 Resultados de EVA	59
3.1.2 Densidad.	59
3.1.2 Resistencia a la compresión.	61
3.1.3 Microscopía.	62
3.1.4 Absorción de agua.	64
3.1.5 Resultados del espumado de etileno vinil acetato EVA y análisis.	65
3.2 Resultados de LDPE.	65
3.2.1 Densidad.	65
3.2.2 Resistencia a la compresión.	67
3.2.3 Microscopía.	68
3.2.4 Absorción de agua.	70
3.2.5 Resultados del espumado de polietileno de baja densidad LDPE y análisis.	71
3.3 Discusión de resultados y comparación.	73
<b>CAPITULO IV CONCLUSIONES.</b>	<b>80</b>
4.1 Conclusiones.	80
4.2 Referencias	82

## Acrónimos

Acrónimos	Significado
PE	Poliétileno.
LDPE	Poliétileno de baja densidad, por sus siglas en inglés (low density polyethylene)
EVA	Etileno vinil acetato.
VA	Vinil acetato.
HDPE	Poliétileno de alta densidad, por sus siglas en inglés (high density polyethylene)
PVAc	Copolimero de acetato de vinilo.
EVOH	Alcohol vinílico- etileno.
PIB	Poliisobuteno.
CBAs	Por sus siglas en inglés (Chemical Blow Agents) agentes químicos de soplado.
AZ	Azodicarbonamida.

## RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló el estudio de la evaluación de dos agentes de espumado azodicarbonamida y bicarbonato de sodio en resinas de polietileno de baja densidad (LDPE) y etileno vinil acetato (EVA) para la mejora de propiedades mecánicas de compresión, actualmente la temperatura de procesamiento de estos agentes espumantes es de (240°C), lo que ocasiona que la resina pierda propiedades mecánicas por manejarse a temperaturas altas, dando lugar a tamaño de celdas no homogéneas y reduciendo sus propiedades de compresión, ya que al no bajar la temperatura de reacción ocasiona que el proceso sea más largo en cuestión de tiempo, y la resina pierda propiedades al ser calentada a altas temperaturas y esperar a que reaccione el agente espumante. Por lo que al bajar la temperatura de procesamiento, se acortarán el tiempo de residencia de la resina dentro del husillo, haciendo que no exista una degradación del material por lo tanto las propiedades permanecerán en la resina, ocasionando un mejor tamaño de celda, mejor espumado y mejor propiedad a compresión.

La metodología consistió en la adición de diferentes concentraciones de los agentes espumantes en las resinas, que fueron 0.5% y 1% (en masa) ya que son las cantidades reportadas en la bibliografía. Para formar la mezcla de la resina y el agente espumante, este último se adicionó en forma de polvo y se agitó mecánicamente hasta homogenizarla, posteriormente se procesó en una máquina inyectora para la obtención de probetas a las cuales se realizaron las pruebas de caracterización que son: microscopía óptica, absorción de agua, densidad y compresión, para las cuales se siguieron las normas ASTM- D3575 y ASTM-D792, la microscopía se utilizó para la determinación del tamaño de celda. Para obtener resultados confiables las pruebas de absorción, densidad y compresión se realizaron cinco veces por cada formulación, en el caso de la microscopía se hicieron dos tomas una superficial y una interna igual por cada formulación.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que en el espumado de EVA la formulación con mejores propiedades mecánicas fue la de 1% de azodicarbonamida como agente espumante aunque este tipo de espumado rígido no es estable ya que al enfriar la espuma tiende a contraerse. Para el espumado de LDPE se pudo concluir que las formulaciones con mejores propiedades mecánicas fueron: (LDPE con 1% de azodicarbonamida y LDPE con 1% de bicarbonato de sodio) estas muestras obtuvieron propiedades similares sin embargo el bicarbonato de sodio es un material más comercial y de bajo costo en comparación con la azodicarbonamida.

## **Problemática**

El polietileno es uno de los materiales más consumidos y utilizados en el ámbito de los plásticos, ya que al tener buenas propiedades químicas y mecánicas lo hace apto para distintas aplicaciones, entre las que se encuentran las espumas rígidas de polietileno de baja densidad (LDPE) y etileno vinil acetato (EVA).

La desventaja surge cuando se producen espumas de PE y EVA en grandes volúmenes de producción debido a que los agentes espumantes utilizados usualmente requieren de altas temperaturas de procesamiento (240°C) lo que ocasiona que la resina pierda propiedades mecánicas, dando lugar a tamaño de celdas no homogéneas y reduciendo sus propiedades de compresión, al no bajar la temperatura de reacción ocasionando que el proceso sea más largo en cuestión de tiempo y que la resina pierda propiedades al ser calentada a altas temperaturas para esperar a que reaccione el agente espumante.

Para contrarrestar esta desventaja, se han utilizado catalizadores que ayudan a disminuir la temperatura de reacción del agente espumante sin embargo los resultados no han sido satisfactorios. Dado lo anteriormente expuesto se propuso este trabajo de investigación con la finalidad de evaluar las propiedades mecánicas de compresión y físicas del espumado de LDPE y EVA con azodicarbonamida y bicarbonato de sodio como agentes espumantes.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general.**

- Evaluar la eficiencia de bicarbonato de sodio y azodicarbonamida como agentes espumantes en resinas de polietileno de baja densidad (LDPE) y etileno vinil acetato (EVA), para la mejora de propiedades físicas y mecánicas de compresión.

### **Objetivos específicos:**

- Desarrollar y caracterizar PE espumado de baja densidad (LDPE) por los métodos de densidad, compresión, microscopia y absorción de agua.
- Desarrollar y caracterizar EVA espumado por los métodos de densidad, compresión, microscopia y absorción de agua.

## Introducción

El presente trabajo de tesis está basado en la evaluación de azodicarbonamida y bicarbonato de sodio, como agentes espumantes en resinas de polietileno de baja densidad y etileno vinil acetato para la mejora de propiedades mecánicas de compresión. Los agentes espumantes químicos son productos que se descomponen a altas temperaturas, generando un gas con el cual se expande el material plástico dándole una estructura espumosa.

El polietileno es un plástico semicristalino, se destaca por ser un material con buena resistencia química, a la elongación así como satisfactorias propiedades de aislamiento térmico, este material es utilizado en aplicaciones como bolsas, cubetas, espumas para embalaje por mencionar algunas. El etileno vinil acetato o mejor conocido como EVA es el copolímero de etileno y acetato de vinilo, es una resina con buena claridad, brillo, tiene propiedades de alta barrera y resistencia a bajas temperaturas, este material es utilizado como adhesivo en caliente, película para protección de invernaderos, película espumada para decoración (foami), espumas rígidas.

**Capítulo I:** En este capítulo de la tesis se presenta los antecedentes de la investigación el cual conlleva varios temas que ayudarán al entendimiento del desarrollo de este trabajo, como lo son: definición de polímero, polietileno, tipos de polietileno, etileno vinil acetato, aplicaciones, espuma plástica, tipos de espuma, aplicaciones de espumas, agentes espumantes entre otros.

**Capítulo II:** Este capítulo el tema a tratar es sobre la metodología utilizada para la preparación de las formulaciones e inyección de probetas de las espumas, a su vez también se explica paso por paso la forma en que fueron ejecutadas las pruebas de caracterización las cuales son: densidad, absorción de agua, microscopía y compresión, en donde los métodos fueron basados en las normas ASTM 3575 y ASTM 792.

**Capítulo III:** En este capítulo de la tesis se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización. La secuencia en las que se presentan es: densidad, compresión, microscopía y absorción de agua, respectivamente se realiza el análisis de resultados y una breve discusión sobre las mejores formulaciones de LDPE y EVA que presentaron buenas propiedades físicas y mecánicas.

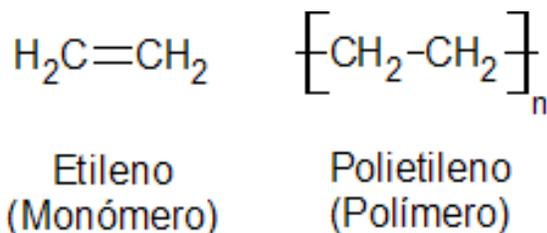
**Capítulo IV:** En este capítulo se muestran las conclusiones consecuentes al desarrollo de la investigación y se presenta las referencias utilizadas en la tesis.

# CAPITULO I ANTECEDENTES

## 1.1 DEFINICIÓN DE POLÍMERO.

Un polímero es una molécula muy grande formada por la unión de muchas moléculas más pequeñas llamadas monómeros, los monómeros son por tanto, sustancias químicas de bajo peso molecular capaces de reaccionar consigo mismo o con otras agentes para formar un polímero. En sentido etimológico la palabra “polímero” se deriva del griego *poli* y *meros* que significan *muchas* y *partes*, respectivamente en contraste con “monómero” (*mono* que significa *uno*), también el término macromolécula se suele utilizar con el mismo significado que el de polímero; lo mismo sucede con la expresión cadena polimérica [1].

Todos estos compuestos son cadenas rectas de moléculas de carbono e hidrógeno como se muestra en la **Figura 1.1**. La diferencia básica es la longitud de las cadenas, tanto el punto de fusión como la resistencia son proporcionales al tamaño de las moléculas [2].



**Figura 1.1 Modelo de cadena polimérica [2].**

Los polímeros, base de los plásticos, han estado presentes desde el inicio de la humanidad ya que la naturaleza sintetiza polímeros como la celulosa, desde tiempos muy antiguos a la invención de los productos sintéticos por el hombre. La celulosa es el principal constituyente de las fibras de la madera y el algodón. Algunos otros polímeros naturales son las proteínas, el caucho, el alquitrán y las resinas [2].

### **1.1.1 Clasificación de los polímeros de acuerdo a su estructura interna**

Los polímeros por su estructura interna se clasifican como:

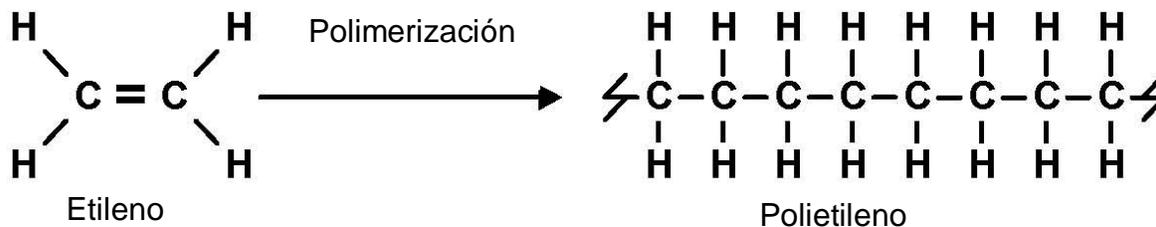
- **Termoplásticos:** Son aquellos que por su estructura interna, formada por cadenas lineales se pueden reblandecer o fundir fácilmente con calor y volverse a solidificar varias veces, situación que los hace ideales para el reciclado [1].
- **Termoestables:** Son aquellos que por su estructura interna, formada por cadenas entrecruzadas, se degradan con el calor antes de que el plástico se funda, solo pueden fundirse y fabricarse una vez y tiene poca capacidad de reciclado [1].
- **Elastómeros:** Son un tipo de termoestables, que solo pueden fundirse una vez, pero debido a su estructura interna con cadenas ramificadas, presentan un elevado grado de elasticidad [2].

### **1.1.2 Mecanismos de polimerización.**

Los mecanismos de polimerización pueden clasificarse en dos categorías que son adición y condensación. La polimerización por adición es la combinación de monómeros por reacción entre enlaces dobles del carbono ( $C=C$ ), la mayor parte de las reacciones de adición son de tipo etilénico, un enlace doble del etileno se rompe al exponerlo a la acción de un iniciador apropiado, el resultado es una serie de reacciones formándose una cadena molecular larga [3].

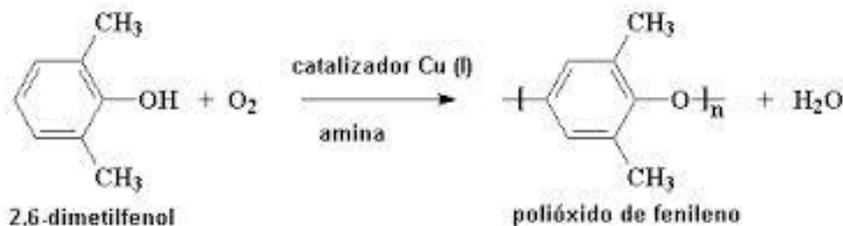
Un iniciador muy común es el radical libre, que es un compuesto con un par de electrones sin aparear, así con un iniciador de tipo peróxido y un radical libre se empieza la fase de iniciación; después se pasa a la fase de propagación en donde el iniciador más el radical libre y el monómero de etileno se unen, finalmente se lleva a cabo la fase de terminación esta acción puede ser ocasionada por otro radical libre o bien la reacción en si [3].

En la **Figura 1.2** se muestra el cambio del monómero de etileno al ser polimerizado y se forma el polietileno, el cual son cadenas largas de hidrogeno y carbono.



**Figura1.2 polimerización de polietileno [2].**

- Polimerización por condensación: los polímeros de condensación se obtienen mediante una serie de reacciones químicas. Estas reacciones se basan en dos centros activos que suelen unirse para formar un enlace químico. Muchas de estas reacciones producen desprendimientos de sustancias secundarias. Tal como se muestra en la **Figura 1.3** dos moléculas reactivas pueden unirse para formar un compuesto nuevo. Si se usan moléculas disfuncionales, las reacciones pueden repetirse, formando una cadena polimérica larga. Las reacciones típicas de esta clase desprenden subproductos tales como H<sub>2</sub>O, HCl o metanol [2]. Como se muestra en la **Figura 1.3**



**Figura 1.3 Ejemplo de una polimerización por condensación [2].**

### 1.1.3 Métodos de polimerización.

En la **Tabla 1.1** se muestran los métodos de polimerización utilizados en la industria para la obtención de los distintos tipos de polímeros, los cuales son: Polimerización directa, solución, suspensión, emulsión y fase gaseosa.

**Tabla 1.1 Métodos de polimerización [4].**

<b>Nombre</b>	<b>Método</b>
<b>Polimerización directa</b>	Los monómero y el activador se mezclan en un reactor y se calientan o se enfría según se requiera. Sucesivamente se añade el segundo monómero con lentitud, para que se genere la reacción; éstas suelen ser exotérmicas y se tienen que tomar precauciones especiales para disipar el calor generado.
<b>Polimerización en solución</b>	El monómero se disuelve en un disolvente no reactivo y se cataliza. El calor limitado disminuye la velocidad de reacción por lo que este tipo de proceso se utiliza para polímeros que se van a emplear en forma líquida como pinturas.
<b>Polimerización en suspensión</b>	El monómero se mezcla con el iniciador y se dispersa en agua requiriéndose agitación. El agua se utiliza para controlar la reacción exotérmica de la polimerización, por lo que al término de ésta se pueden separar los polímeros, como pueden ser de tipo vinílicos, poliestireno o metacrilato.
<b>Polimerización por emulsión</b>	Este proceso es similar al de suspensión, solo que se añade un emulsificante (jabón) lo que ayuda a romper las partículas pequeñas. En este caso el monómero está disuelto en agua; después de la polimerización, el polímero se precipita, se lava y se seca.

## Continuación de la **Tabla 1.1 Métodos de polimerización**

<b>Polimerización en fase gaseosa</b>	La unión Carbide ha desarrollado un proceso para polimerizar monómeros de adición en fase de vapor. Este proceso se basa en hacer pasar un monómero gaseoso como el etileno, a través de un lecho catalítico. Se ha reportado la obtención de polietileno de alta uniformidad usando un catalizador de cromo activo [4].
---------------------------------------	--

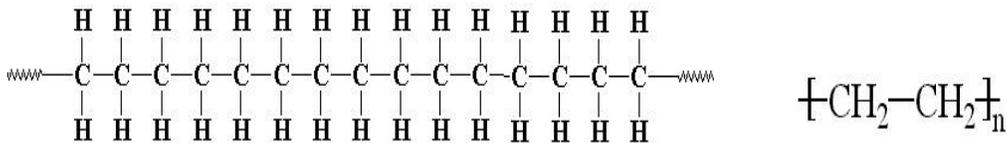
### **1.2 POLIETILENO (PE).**

El polietileno fue sintetizado en primera ocasión por el químico alemán Hans von Pechmann quien lo preparó por accidente en 1898, pero fue hasta el año de 1933 que se utilizó prácticamente a nivel industrial por Fawcett y Reginald Gibson en ICI (Imperial Chemical Industries) en Northwich, Inglaterra. En 1935 otro químico del ICI, Michael Perrin, transformó este accidente en una síntesis a alta presión para el polietileno reproducible, que se convirtió en la base para el comienzo de la producción industrial de polietileno de baja densidad en 1939. Durante la Segunda Guerra Mundial, se llevaron a cabo más investigaciones sobre el proceso del ICI y en 1944 la Bakelite Corporation en Sabine, Texas, y Du Pont en Charleston, Virginia Occidental, comenzaron la producción comercial a gran escala bajo la licencia de ICI. En 1953, el químico alemán Karl Ziegler desarrolló un sistema catalítico basado en haluros de titanio y compuestos de órgano-aluminio que trabajaban en condiciones aún más leves que el catalizador de Phillips y Ziegler, por lo que estaban siendo utilizados para la producción de polietileno de alta densidad [5].

La familia de catalizadores, basados en metalloceno y Ziegler, demuestran ser flexibles en la copolimerización de etileno con otras olefinas y se han convertido en la base de la amplia gama de resinas de polietilenos disponibles en la actualidad, incluyendo polietileno de muy baja densidad y polietileno lineal de baja densidad. Tales resinas, en forma de fibras como Dyneema, a partir de 2005, han comenzado a sustituir a las aramidas en muchas aplicaciones de alta resistencia [5].

### 1.2.1 Estructura del PE y su síntesis.

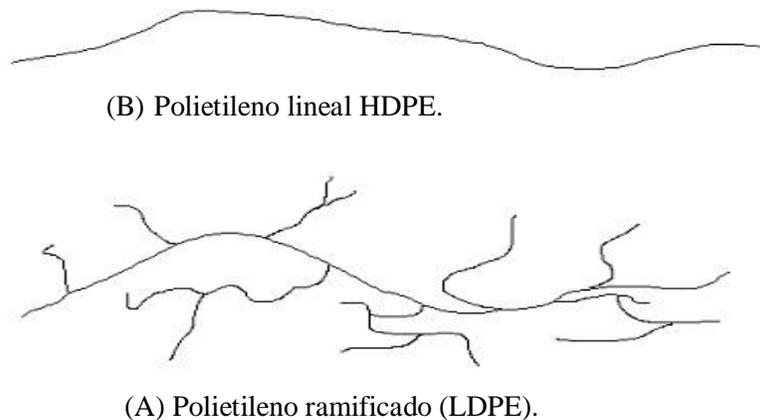
Los plásticos que se encuentran en el grupo de las poliolefinas (polímeros de etileno, propileno y butileno) son termoplásticos semicristalinos. Se destacan en general por su buena resistencia química, altas tenacidades y elongación en la rotura, así como satisfactorias propiedades de aislamiento eléctrico. Una molécula del polietileno es una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono [4]. En la **Figura 1.4** se muestra la fórmula química del PE



**Figura 1.4 Estructura química del Polietileno [4].**

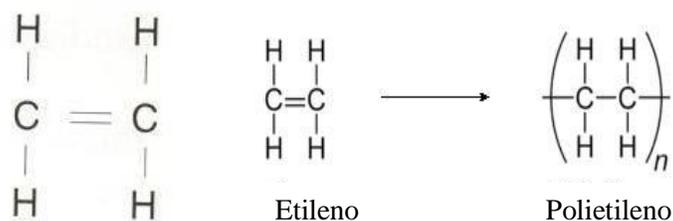
A veces algunos de los carbonos, en lugar de tener hidrógenos unidos a ellos, tienen largas cadenas de polietileno. Esto se llama polietileno ramificado, o de baja densidad, LDPE. Cuando no hay ramificación, se llama polietileno lineal, o HDPE. El polietileno lineal es mucho más fuerte que el polietileno ramificado, pero el polietileno ramificado es más barato y más fácil de fabricar [4].

En la **Figura 1.5** se muestra la diferencia entre un polietileno lineal y uno ramificado.



**Figura 1.5 (A) Polietileno Lineal y (B) Polietileno ramificado [4].**

El polietileno se obtiene a partir del monómero etileno. Tiene la fórmula  $C_2H_4$ , que consiste en un par de grupos metilenos ( $CH_2$ ) enlazados por una doble ligadura, como se muestra en la **Figura 1.6**



**Figura 1.6 Monómero de etileno y polietileno [4].**

Debido a que algunos catalizadores son altamente reactivos, el etileno debe ser de gran pureza ya que si no es así puede afectar en las propiedades del material y en su aplicación final. Las especificaciones típicas son <5 ppm de agua, oxígeno, así como otros alquenos. Los contaminantes aceptables incluyen  $N_2$ , etano (precursor común para etileno), y el metano. El etileno se produce generalmente a partir de fuentes petroquímicas, pero también puede ser generada por la deshidratación de etanol [4].

El etileno es una molécula bastante estable que se polimeriza en contacto sólo con los catalizadores. La reacción es altamente exotérmica (el proceso libera una gran cantidad de calor). Para la polimerización del etileno se utilizan cloruros u óxidos metálicos. Los catalizadores más comunes constan de cloruro de titanio (III), llamado catalizadores Ziegler-Natta. Otro catalizador común es el catalizador de Phillips, preparado mediante el depósito de óxido de cromo (VI) sobre sílica. El polietileno puede ser producido mediante polimerización por radicales, pero esta ruta es sólo de utilidad limitada y generalmente requiere un equipo de alta presión [4].

### 1.2.2 Propiedades físicas del polietileno.

El polietileno es un polímero termoplástico que consiste en largas cadenas de hidrocarburos. Dependiendo de la cristalinidad y el peso molecular, un punto de fusión y de transición vítrea puede o no ser observables. La temperatura a la que esto ocurre

varía fuertemente con el tipo de polietileno. Para calidades comerciales comunes de polietileno de media y alta densidad, el punto de fusión está típicamente en el rango de 120 a 130°C (248 a 266°F). El punto de fusión promedio del polietileno de baja densidad comercial es típicamente 105 a 115°C (221 a 239°F) [6].

En la **Tabla 1.2 y 1.3** se muestran propiedades físico químicas del polietileno de alta y baja densidad las cuales ayudan para la selección del material indicado a la hora de estar buscando alguna aplicación o tipo de proceso en específico.

**Tabla 1.2 propiedades físico químicas del polietileno de baja densidad y alta densidad [6].**

<b>Parámetros de comparación</b>	<b>LDPE</b>	<b>HDPE</b>
<b>Grado de cristalización [%]</b>	40-50	60-80
<b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b>	0.915-0.94	0.94-0.965
<b>Módulo de cizallamiento [N/mm<sup>2</sup>]</b>	+/-130	+/-1000
<b>Rango de fusión cristalina [°C]</b>	105-110	130-135
<b>Resistencia química</b>	Buena	Mejor

**Tabla 1.3 Propiedades físicas del PE [6].**

<b>Propiedades</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma DIN</b>	<b>LDPE</b>	<b>HDPE</b>
<b>Densidad</b>	g/cm <sup>3</sup>	1306/53479	0.90	0.955
<b>Tensión en el límite de fluencia</b>	N/mm <sup>2</sup>	53371/53455	8.0-10.0	20.0/30.0
<b>Elongación en el límite de fluencia</b>	%	53455	20	12
<b>Resistencia al impacto</b>	mJ/mm <sup>2</sup>	3453	n.r.	n.r.
<b>Resistencia al impacto entallado.</b>	mJ/mm <sup>2</sup>	53453	n.r.	1-n.r.
<b>Dureza a la penetración</b>	N/mm <sup>2</sup>	53456	20	50
<b>Modulo E</b>	N/mm <sup>2</sup>	53457	200	1000

Continuación de la **Tabla 1.3 Propiedades físicas del PE [6].**

<b>Coefficiente de dilatación térmica lineal</b>	1/k	-	$20 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$
<b>Temperatura de uso con esfuerzo mecánico a temperatura ambiente.</b>				
<b>Por poco tiempo</b>	°C	-	80-90	90-105
<b>Por largo tiempo</b>	°C	-	60-75	70-80
<b>Temperatura de ablandamiento Vicat</b>	°C	53460	45	75
<b>Resistividad transversal específica</b>	$\Omega \cdot \text{cm}$	53482	$>10^{17}$	$>10^{17}$
<b>Factor de pérdida dieléctrica</b>	-	5483	0.0002	0.0003
<b>Constante dieléctrica (hasta 106 Hz)</b>	-	53483	2.3	2.4
<b>Absorción de agua</b>	%	53495	<0.1	<0.1

### 1.2.3 Propiedades químicas del polietileno.

La mayoría de los grados de polietileno de baja, media y alta densidad tienen una excelente resistencia química, lo que significa que no son atacados por ácidos fuertes o bases fuertes. También son resistentes a los oxidantes suaves y agentes reductores. El polietileno se quema lentamente con una llama azul que tiene una punta de color amarillo y desprende un olor a parafina. El material continúa ardiendo con la eliminación de la fuente de llama y produce un goteo. El polietileno (aparte del polietileno reticulado) generalmente se puede disolver a temperaturas elevadas en hidrocarburos aromáticos tales como tolueno o xileno, o en disolventes clorados tales como tricloroetano o triclorobenceno [6].

En la **Tabla 1.4** se muestran los diferentes tipos de polietilenos que existen, algunas propiedades como: densidad, peso molecular entre otras así como aplicaciones en donde se utilizan.

**Tabla 1.4 Clasificación de polietilenos [4].**

<b>Tipos de polietileno</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE)</b>	Peso molecular entre 3.1 y 5.67 millones, lo cual hace que el material sea muy duro, con una estructura semicristalina de extraordinaria tenacidad, bajo desgaste y excelente resistencia química.	Piezas de manipulación de máquinas, piezas móviles de máquinas de tejer, rodamientos, engranajes, articulaciones artificiales y tablas de cortar de carnicería.
<b>Polietileno de alta densidad (HDPE)</b>	Con una densidad de 0.941 g/cm <sup>3</sup> tiene un grado bajo de ramificación, puede ser producido por catalizadores Ziegler-Natta o metaloceno.	El polietileno de alta densidad se utiliza en envases tales como jarras de leche, botellas de detergente, envases de margarina, contenedores de basura y tuberías de agua.
<b>Polietileno reticulado (PEX o XLPE)</b>	Es un polietileno de media a alta densidad que contiene enlaces entrecruzados en la estructura del polímero. Su resistencia química es mayor que los demás PE.	Bidones y tanques de combustibles, nipples.
<b>Polietileno de media densidad (MDPE)</b>	Tiene una densidad de 0.926-0.940 g/cm <sup>3</sup> , puede ser producido con catalizadores cromo/sílica, Ziegler-Natta y	Se utiliza en tuberías y accesorios de gas, sacos, película de embalaje, bolsas de plástico y los cierres de los

Continuación de la **Tabla 1.4 clasificación de polietilenos**

	metaloceno, tiene buena resistencia a choque y caída.	tornillos.
<b>Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)</b>	Tiene una densidad de 0.915-0.925 g/cm <sup>3</sup> . Es una copolimerización de etileno con alfa olefinas de cadenas cortas; presenta una buena resistencia al impacto.	Se utiliza en envases, en particular en películas para bolsas y láminas, recubrimiento de cables, juguetes, tapas, cubetas, recipientes y tuberías.
<b>Polietileno de baja densidad (LDPE)</b>	Tiene una densidad de 0,910-0,940 g/cm <sup>3</sup> con un alto grado de ramificaciones en la cadena polimérica. Su resistencia a la tracción es baja, pero su ductilidad es alta	Se utiliza tanto para aplicaciones de envases rígidos y película para bolsas.
<b>Polietileno de muy baja densidad (VLDPE)</b>	Tiene una densidad de 0,880-0,915 g/cm <sup>3</sup>	Se utiliza para mangueras, tubería, bolsas para hielo, alimentos congelados y películas para emplayar.
<b>Polietileno clorado</b>	Es un tipo de polietileno de fórmula molecular $-(CH_2-CHCl-CH_2-CH_2)_n-$ , sus propiedades varían dependiendo del contenido del cloruro, peso molecular y cristalinidad. Posee buenas características de impermeabilización,	Es utilizado principalmente para recubrimientos de cables y mangueras hidráulicas.

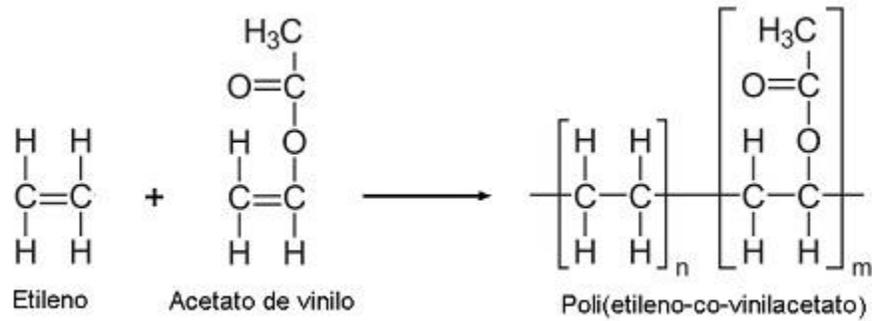
Continuación de la **Tabla 1.4 Clasificación de polietileno [4]**.

	resistencia a los alcoholes, ácidos, aceite y envejecimiento.	
<b>Polietileno de ultra bajo peso molecular (ULMWPE)</b>	Tiene una densidad de 0.93-0.95g/cm <sup>3</sup> y su punto de ablandamiento se sitúa entre 95-100°C	Es utilizado como aditivo lubricante del PVC, también para caucho, y como dispersante en tintas y pinturas.
<b>Copolímeros</b>	Copolimerización con alfa-olefinas, copolímero etilvinilacetato o EVA	Se utiliza en las espumas de suelas de calzado atlético

### 1.3 ETILENO VINIL ACETATO (EVA)

El etilenvinilacetato (más conocido como EVA) es el copolímero de etileno y acetato de vinilo. El porcentaje en peso de acetato de vinilo por lo general varía de 8 a 40%, siendo el resto etileno. Aunque en algunos casos, este porcentaje puede ser un tanto mayor (hasta un 75%), se trata de un polímero que se acerca a los elastómeros en cuanto a la suavidad y flexibilidad, sin embargo, puede ser procesado al igual que los termoplásticos, por lo que este tipo de materiales recibe el nombre de elastómero termoplástico. La resina tiene buena claridad y brillo, propiedades de barrera, resistencia a bajas temperaturas y frente al estrés-cracking. Presenta propiedades de adhesivo pegado en caliente a prueba de agua y resistencia a la radiación UV. El EVA tiene poco o ningún olor y compite con la goma y productos vinílicos en muchas aplicaciones eléctricas [7].

El copolímero etileno-vinil acetato es un polímero de adición formado por unidades repetitivas de etileno y acetato de vinilo como se muestra en la **Figura 1.7**



**Figura 1.7 Etileno Vinil Acetato [5].**

### 1.3.1 Propiedades y características.

La incorporación del acetato de vinilo en el proceso de polimerización del etileno produce un copolímero con una cristalinidad más baja que la del homopolímero de etileno común, por lo tanto, estas resinas de más baja cristalinidad tienen temperaturas de fusión y temperaturas de termo-sellado más bajas, además de que se reduce la rigidez, resistencia a la tracción y dureza. Son más transparentes y flexibles a baja temperatura; presentan mayor resistencia a la ruptura y al impacto, pero sus propiedades a altas temperaturas son menores que las del LDPE. También son más permeables al oxígeno, al vapor de agua y al dióxido de carbono. La resistencia química es similar a la del LDPE, pero las resinas de EVA con mayor contenido de acetato de vinilo tienen una resistencia un poco mayor a los aceites y grasas [6].

En la **Tabla 1.5** se presentan algunas propiedades típicas de EVA con un contenido de 8% de vinil acetato (VA) para adhesivos y recubrimientos, las cuales están basadas en normas ASTM.

**Tabla 1.5 Propiedades típicas de EVA para adhesivos y recubrimientos [6].**

Propiedades	Método	unidad	Valor
<b>Contenido de vinil acetato (VA)</b>		%	8
<b>Densidad</b>	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	0,925
<b>Índice de fluidez (MFI)</b>	ASTM D1238	g/10min.	85
<b>Resistencia a la tracción</b>	ASTM D638	Kg/cm <sup>2</sup>	80

Continuación de la **Tabla 1.5**

<b>Alargamiento a la rotura</b>	ASTM D638	%	400
<b>Fragilidad en frio</b>	ASTM D746	°C/F50	<-76
<b>Punto de ablandamiento Vicat</b>	ASTM D1525	°C	70
<b>Punto de fusión</b>	ASTM D3418	°C	96
<b>Dureza shore A</b>	ASTM D2240	-	40

En la **Tabla 1.6** se muestran algunas propiedades típicas de EVA con un contenido de 16 % de vinil acetato (VA) para procesamiento de inyección y extrusión, el cual están basadas en normas ASTM. En comparación con el EVA a 8% de vinil acetato se puede observar que al disminuir el porcentaje existen variaciones en las propiedades, tales como: la fluidez, resistencia a la tracción, alargamiento a la rotura, punto de fusión, las cuales son utilizadas para el procesamiento de este material y para la selección de su aplicación.

**Tabla 1.6 Propiedades típicas de EVA para inyección o extrusión [6].**

<b>Propiedades</b>	<b>Método</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Contenido de vinil acetato (VA)</b>		%	16
<b>Densidad</b>	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	0.937
<b>Índice de fluidez (MFI)</b>	ASTM D1238	g/10min.	1.5
<b>Resistencia a la tracción</b>	ASTM D638	Kg/cm <sup>2</sup>	170
<b>Alargamiento a la rotura</b>	ASTM D638	%	700
<b>Fragilidad en frio</b>	ASTM D746	°C/F50	<-76
<b>Punto de ablandamiento Vicat</b>	ASTM D1525	°C	67
<b>Punto de fusión</b>	ASTM D3418	°C	89
<b>Dureza shore A</b>	ASTM D2240	-	37

### 1.3.2 Aplicaciones de EVA.

- **Adhesivos de fusión en caliente:** Este tipo de aplicación es utilizada en las barras de pegamento las cuales se calientan, son comúnmente hechos de EVA,

por lo general con aditivos como la cera y resina. El EVA también se utiliza como un aditivo para mejorar el pegado-despegado en envolturas de plástico para empaques.

El contenido de acetato de vinilo generalmente cae en el rango de 14 a 35% aunque otros porcentajes pueden encontrarse para aplicaciones específicas. El peso molecular posee una amplia influencia en las propiedades adhesivas y reológicas de la adhesividad en caliente. Cuanto mayor sea el contenido de etileno, mejor será la adhesión específica a sustratos no-polares, tales como poliolefinas. Los copolímeros que contienen alto contenido de acetato de vinilo muestran una buena adhesión a sustratos polares, como el papel. Los polímeros de bajo peso molecular disminuyen la viscosidad de fusión y son más fáciles de procesar y aplicar. Éstos también proporcionan humectación y por lo tanto una alta adherencia mecánica para sustratos porosos, como el papel y la madera. Los copolímeros de alto peso molecular se utilizan para aplicaciones que requieren una óptima fuerza de cohesión a temperaturas elevadas y una buena flexibilidad a bajas temperaturas [8].

- **Goma espumada:** La goma EVA es uno de los materiales popularmente conocidos como caucho expandido o gomaespuma. La espuma de EVA se utiliza como relleno en los equipos de varios deportes, como las botas de esquí, hockey, boxeo, artes marciales, botas de wakeboard, botas de esquí acuático, empuñaduras de cañas y otros artefactos. Se suele utilizar, por ejemplo, como un amortiguador en el calzado deportivo. Se utiliza para la fabricación de flotadores para las redes de pesca comerciales, tales como redes de cerco y las redes de enmalle. Además, debido a su flotabilidad, el EVA ha hecho su camino en productos no tradicionales, tales como lentes flotantes.

Las zapatillas y sandalias de EVA, hoy en día, son muy populares debido a sus propiedades tales como peso ligero, facilidad para moldear, acabado brillante y un costo más barato en comparación con el caucho natural [2].

- **Tapones y juntas de hermeticidad:** Debido a su elasticidad y buenas propiedades barrera, el EVA se puede utilizar como un sustituto del corcho y para juntas de estanqueidad en tapas de bebidas carbonatadas [2].
- **Recubrimientos:** Las emulsiones de EVA son copolímeros de acetato de polivinilo (PVAc) sobre la base de acetato de vinilo (VAM) internamente plastificado con etileno acetato de vinilo. Los copolímeros con PVAc son adhesivos utilizados en embalajes, textiles, encuadernación de libros, superficies de metal y revestimientos de papel.

El copolímero de acetato de vinilo-etileno también se utiliza en la formulación de recubrimientos de buena calidad en pinturas para interiores de base acuosa al 53% de dispersante primario [8].

- **Producción/modificador de otros polímeros:** La hidrólisis de EVA genera el copolímero alcohol vinílico-etileno (EVOH), muy usado en la industria del envasado de alimentos por su excepcional propiedad barrera. También se utiliza para mejorar el apego de film de polietileno de baja densidad o de policloruro de vinilideno. El LDPE y el PVDC no son lo suficientemente “pegajosos” por su propia cuenta y no se adhieren a ellos mismos. Para lograr el aferramiento deseado, ciertos polímeros de menor peso molecular se añaden; los dos más comúnmente utilizados son poliisobuteno (PIB) y polietileno-co-vinilacetato (EVA). Sus cadenas fácilmente interactúan unas con otras y su menor peso molecular las hace más móviles dentro de la matriz polimérica [4].
- **Otros usos:** El EVA se utiliza en la fabricación de balones de fútbol (Adidas Jabulani). El EVA también se emplea en aparatos ortopédicos, cigarrillos a prueba de fuego (FSC), tablas de surf, almohadillas de tracción para skimboard y para la fabricación de flores artificiales. En otro sentido se emplea como aditivo para mejorar el apego excesivo en envolturas de plástico y como mejorador de flujo en frío para combustible diesel o como separador en filtros HEPA (High-Efficiency Particulate Air). También se utiliza para hacer los protectores bucales termoplásticos que se ablandan en agua hirviendo para un mejor ajuste en un

usuario específico. Usos adicionales se encuentran en la realización de los parches transdérmicos de nicotina. El EVA también se utiliza para la fabricación de bolsas para cadáveres y aislamiento de cables eléctricos [9].

## 1.4 ESPUMA PLÁSTICA

La espuma plástica es un plástico expandido químico, mecánico o térmicamente para formar una estructura celular ligera mediante la introducción de burbujas de aire o gas. También llamada plástico expandido; plástico celular. Existen diferentes tipos de espumas como son:

- **Espuma de polietileno**

El espumado de polímeros, por sí sólo, no tiene grandes aplicaciones. Sin embargo, si se obtienen productos con mayores aplicaciones si primero se entrecruza el polímero y después se procede con un proceso de espumado. En los últimos años las espumas de poliolefinas entrecruzadas han aumentado de manera considerable su presencia en el mercado, debido a sus nuevas aplicaciones. Estos materiales presentan una gran variedad de propiedades favorables, por ejemplo, mantienen un cierto carácter termoplástico que permite su aplicación en ciertas técnicas de post fabricado. La estructura de celda cerrada de la espuma lleva a unos bajos niveles de absorción de agua y transmisión, ninguna absorción de polvo y un buen aislamiento frente al impacto.

Estos materiales, debido a su estructura molecular entrecruzada, también tienen un amplio rango de temperatura de trabajo, presentan una elevada resistencia a los agentes químicos y poseen una buena estabilidad frente a las condiciones atmosféricas y frente a la radiación ultra violeta. Además, la composición poliolefínica juega un papel importante en la industria moderna para el desarrollo de nuevas aplicaciones donde se hace necesario el uso de un polímero uniforme. Este aspecto es particularmente útil para el reciclado de materiales [10].

Las espumas poliolefinicas entrecruzadas se usan como material de embalaje en la manufactura de componentes microelectrónicos, estos materiales se pueden encontrar también en la industria automotriz y de la construcción, los materiales requeridos para este tipo de aplicaciones generalmente incluyen una baja expansión térmica, elevada estabilidad térmica y buenas propiedades mecánicas. Otra gran ventaja que ofrecen los compuestos espumados es la elevada reducción de material y costos. Una disminución en la densidad se convierte directamente en un ahorro de costos, y este es el principal motivo por el cual la producción comercial de productos espumados va inexorablemente dirigida a obtener la densidad más baja posible para una aplicación determinada. Aunque también es cierto que a medida que las densidades se hacen más bajas, el control y optimización de las propiedades físicas se vuelve más complejo. Para facilitar este control, se hace necesario un estudio entre la composición, la estructura celular, la matriz, la morfología y las propiedades físicas [10].

- **Poliestireno expandido (EPS).**

El poliestireno expandido o EPS es un polímero del estireno que contiene un agente expansor. Se fabrica como elementos sueltos de estructura celular cerrada y rellena de aire (98%) y se aglomera posteriormente en forma de paneles. Se obtiene a partir del procesamiento del gas natural y del petróleo, para conseguir el etileno y diversos compuestos aromáticos. A partir de ellos se obtiene el estireno. La espuma de poliestireno se produce combinando estireno con isobutileno.

Su buena capacidad de aislamiento térmico se debe a la propia estructura del material que esencialmente consiste en aire ocluido dentro de la estructura celular conformada por el poliestireno. Aproximadamente un 98% del volumen del material es aire, únicamente un 2% material sólido (poliestireno). Su conductividad térmica es muy baja, del orden de  $0.03\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  y varía en función de la temperatura a la que se efectúa la medición y a una serie de factores tales como la densidad y contenido de humedad, ningún material aislante debe utilizarse sin cubrir, no solo por el fuego, sino también

para preservar las propiedades mecánicas y de aislamiento a largo plazo. La industria recomienda que el EPS se utilice con un material de recubrimiento [11]

## **Ventajas**

- Material aislante más económico, buena relación prestaciones/precio.
- Puede manejarse sin causar irritaciones, eccemas ni inflamaciones de la piel, los pulmones o los ojos. Para trabajar con EPS no son necesarias máscaras para respirar, gafas ni prendas de vestir o guantes protectores.
- Seguridad en el manejo y facilidad para ser cortado al tamaño requerido. Bajo peso, fácilmente manejable en obras.
- No absorbe la humedad y sus propiedades mecánicas y aislantes no se degradan. Imputrescible, no constituye un soporte para crecimiento de mohos u hongos.
- La espuma de poliestireno (EPS) es ligera, rígida y no quebradiza.
- Las paredes aisladas con EPS no emiten fibras dañinas para los pulmones, según la Asociación de Neumología Americana (ALA).
- Se puede reciclar en Centros ECO EPS: se limita el nivel de contenido de material reciclado por debajo de 25%, para mantener las prestaciones técnicas, pero se puede llegar al 100% mediante procesos especializados [2].

## **Inconvenientes**

- Material combustible, a temperaturas por encima de 100°C se reblandece y funde. A temperaturas por encima de 350°C produce gases combustibles.
- No tiene buena resistencia.
- Se disuelve en contacto con ácidos, anhídridos, gasolina, base de benceno, hidrocarburos clorados, cetonas y aceites minerales.
- El EPS-SE (poliestireno “autoextingible) contiene HBCD (retardante de llama compuesto de bromo) que ha sido identificado como contaminante orgánico persistente (COP; PBT en sus siglas en inglés). Se están buscando retardantes de llama adecuados para sustituir el HBCD [8].

## **Aplicaciones**

El EPS se utiliza en el sector de la construcción, principalmente como aislamiento térmico y acústico, también en soluciones de aligeramiento y conformado de diversas estructuras, además de otras aplicaciones como moldes de encofrado y juntas de dilatación. Los productos de EPS empleados en construcción como aislamiento térmicos llevan marcado CE conforme a la norma de producto UNE-EN 13163. Las especificaciones de los productos deben quedar recogidas en las etiquetas y en la formación suministrada por el fabricante, por su versatilidad y resistencia es un material que se puede utilizar tanto en cerramientos verticales y cubiertas como en soleras y pavimentos [11].

### **1.5 AGENTES ESPUMANTES**

El término agente espumante también puede denotarse en el sentido estricto como aquella sustancia que puede emplearse como agente de soplado, un mineral o sustancia orgánica utilizada en materiales poliméricos para producir una estructura espumosa. Hay tres tipos principales de proceso de expansión (físicos, químicos y mecánicos) [12].

- Físicos: A través de la adición de compuestos volátiles que al calentarse originan dentro del polímero una serie de celdas, debidas al burbujeo de los gases producidos.
- Mecánicos: Consiste en la incorporación de aire a los polímeros mediante procedimientos de agitación o burbujeo.
- Químicos: Son productos que en determinadas condiciones de temperatura reaccionan generando gases, como el bicarbonato de sodio.

Los agentes químicos de expansión presentan ventajas dado su fácil almacenamiento, manipulación, dosificación y control en la generación de gas, pero es necesario que estos compuestos cumplan varias condiciones las cuales son:

- (i) La formación de gas debe ser inocua, es decir, no deben producirse gases ni subproductos explosivos y con el fin de evitar especiales medidas de trabajo. Tampoco deben ser tóxicos.
- (ii) Es necesario que no sean corrosivos o químicamente activos con los moldes, ni con el polímero o los aditivos restantes.
- (iii) Buena mezcla o dispersión en el polímero.
- (iv) Su descomposición debe de efectuarse a temperaturas adecuadas para que no existan pérdidas de gases producidas antes de la reticulación y expansión. Como ya se ha descrito anteriormente, dichas temperaturas pueden ser modificadas mediante reactivos de activación.
- (v) Las propiedades de los subproductos no deben perjudicar las propiedades finales del polímero espumado, ni provocar olor ni modificaciones del color.

### **1.5.1 Agentes de espumados químicos.**

Los agentes espumantes químicos (Chemical Blowing Agents, por sus siglas en inglés CBAs) son productos que se descomponen a alta temperatura. Al menos una de las descomposiciones de los productos es un gas, con el cual se expande el material plástico para dar una estructura espumosa. La cantidad y el tipo de agente de expansión influyen en la densidad del producto terminado y su estructura de poros de las cuales son posibles dos: célula abierta y cerrada [14].

Los plásticos de celda cerrada tienen poros pequeños, autónomos que son más o menos esféricos; las celdas abiertas contienen poros interconectados que permite que los gases pasen a través de los huecos en el plástico. Los factores que determinan la formación de una espuma plástica de célula fina con una estructura celular regular son: el tamaño de partícula del agente de soplado, la dispersión de propiedades de la

máquina de procesamiento de plásticos, la descomposición del agente de soplado y la viscosidad de fusión de la resina procesada [14].

Los CBAs derivados de hidracina son principalmente sólidos. La formación de gas debe tener lugar en un rango de temperatura cerca de la de procesamiento del polímero. Además los productos de la descomposición deben ser compatibles con los plásticos. Típicamente estos aditivos se pueden descomponer en un intervalo de temperatura relativamente estrecho. Los CBAs pueden ser mezclados con el polímero a temperatura ambiente ya que no requieren un procesamiento especial ni equipo. Por lo tanto los CBAs pueden ser reformulados con otros aditivos como agentes catalizadores de soplado o agentes de nucleación bajo la temperatura del descomposición de los CBAs, mientras que los agentes de nucleación proporcionan sitios para formación de una celda de la espuma plástica [14].

Los agentes de soplado se utilizan en los plásticos por varias razones: reducción de peso, el ahorro en costos, material y para obtener nuevas propiedades. Las características adquiridas incluyen el aislamiento contra el calor o el ruido, diferente aspecto de la superficie, rigidez mejorada, aumento en la calidad (eliminación de rechupes en piezas moldeadas por inyección) y mejora de propiedades eléctricas.

Los CBAs también se pueden subdividir en dos categorías principales: endotérmicos y exotérmicos. Los agentes de soplado exotérmicos liberan energía durante su descomposición, mientras que los agentes de expansión endotérmicos, requieren energía durante la descomposición. En general, los procesos endotérmicos generan dióxido de carbono como principal gas. Los de tipo exotérmico comercialmente disponibles evolucionan principalmente de gas nitrógeno, a veces en combinación con gas de efecto. El nitrógeno es un gas más eficiente en expansión debido a su lenta tasa de difusión a través del polímero en comparación con el dióxido de carbono [14].

En la **Tabla 1.8** se muestran los agentes espumantes exotérmicos químicos y una descripción de ellos por ejemplo, materiales plásticos que pueden ser compatibles, su temperatura de reacción, algún activador que les ayude a reaccionar a menor temperatura.

**Tabla 1.8 Agentes espumantes exotérmicos [15].**

Agente químico	Descripción
<p><b>Azodicarbonamida (AZ).</b></p>	<p>Genera una reacción exotérmica. Como material puro es un polvo de color amarillo o naranja, con temperatura de descomposición es de 200-220°C. Produce 220-240 cm<sup>3</sup>/g de gas, principalmente de nitrógeno y monóxido de carbono; no inflamable. Está aprobado por FDA y se utiliza para casi todos los polímeros como PE, PP, PS, ABS, PVC y EVA.</p> <p>La temperatura de reacción puede ser modificada y reducida hasta 170-190°C e incluso a temperaturas más bajas mediante la adición de activadores, los cuales pueden ser compuestos de metales de transición, aminas, amidas y glicoles. Por ejemplo compuestos que contienen Zn, Cd y Pb son activadores que se utilizan generalmente en forma de óxidos, sales y normalmente una sal de ácido graso, por ejemplo estearato.</p>
<p><b>Sulfonilo Semicarbazidas</b></p>	<p>Su temperatura de descomposición es alta de 440 a 450°F, su forma original es en polvo cristalino de color crema con un rendimiento de gas de 140 cm<sup>3</sup> / g, compuesta principalmente de nitrógeno y agua, es inflamable quema rápidamente cuando se enciende, es utilizado en polímeros como ABS, PPO, Poliamida y HIPS.</p>

Continuación de la **Tabla 1.8 Agentes espumantes exotérmicos.**

<b>Azobis(isobutironitrilo)</b>	<p>Este compuesto fue descubierto como agente de espumación en Alemania durante los años 50's (Lober,1952 y Stevens, 1951), obteniéndose a partir de hidracina, acetona, cianuro sódico y medio ácido, usando cloro para oxidar el compuesto intermedio (hidrazo bis(isobutironitrilo)).Fue introducido para la producción de artículos de caucho esponjosos, aunque más tarde fue recomendado para el PVC expandido. Este compuesto no es decolorante y proporciona al PVC una estructura celular uniforme.</p> <p>La descomposición del azobis(isobutironitrilo) ocurre rápidamente a temperaturas por encima de los 100 °C y más lentamente a temperaturas inferiores. La completa descomposición proporciona 137 mL de gas por gramo (medido en condiciones normales). El residuo de la descomposición (tetrametilsuccinonitrilo) es una sustancia tóxica y se deben tomar medidas de precaución para eliminarla.</p>
<b>Bencenosulfonilhidrazida.</b>	<p>Es un compuesto aromático más simple dentro de la clase de las sulfonilhidrazidas. Se prepara a partir del cloruro de sulfonilbenceno con hidracina en presencia de una base de amoniac. El producto es un sólido cristalino blanco que funde y empieza a descomponer cerca de los 105°C, desafortunadamente el olor es fuerte y desagradable debido al tiofenol o disulfuro de difenilo, cuando es utilizado con PVC.</p>
<b>Dinitrosopentametilentetramina (DNPT)</b>	<p>Este compuesto se prepara mediante nitrosación de la heximetilentetramina (producto de la reacción del formaldehído y amoniac). Este producto, cuando se calienta solo o en presencia de diluyentes inertes,</p>

Continuación de la **Tabla 1.8 Agentes espumantes exotérmicos.**

	<p>descompone cerca de los 200°C; pero cuando se utiliza en cauchos o plásticos en presencia de ciertos activadores, puede producir gases en el rango de temperaturas entre 130 y 195°C. La cantidad de gas producida a partir de material no diluído está cerca de los 2 moles por mol de agente espumante (cerca de 265 mL/g medido en condiciones normales).</p> <p>La temperatura de descomposición de este agente espumante puede ser substancialmente reducida y acelerada mediante la adición de sustancias ácidas, tales como el ácido salicílico y el anhídrido ftálico. La dinitrosopentametilentetramina se utiliza en cauchos pero no mucho en plásticos, debido al olor que deja el residuo. Este agente espumante no es decolorante.</p>
<p><b>p-Toluensulfonilhidrazida.</b></p>	<p>EL compuesto es similar a la bencenosulfonilhidrazina, incluso los mecanismos de reacción y olores exepcto que el punto de fusión y de descomposición que son superiores a los 120°C.</p>
<p><b>p,p'-oxibis(bencenosulfonilhidrazida).</b></p>	<p>Este agente espumante no presenta olor cuando se aplica en plásticos, se prepara por clorosulfonación del difenileter con ácido clorosulfónico y la subsecuente reacción con hidracina en presencia de una base.</p> <p>El producto es un sólido cristalino blanco que tiene una temperatura de descomposición a 164°C e incluso menores en presencia de cauchos o plásticos como el polietileno, proporcionando 125 cm<sup>3</sup>/g de gases.</p>

En la **Tabla 1.9** se muestra los agentes espumantes endotérmicos y algunas características como: cuanto gas produce, temperatura de reacción y tipo de gas que libera.

**Tabla 1.9 Agentes espumantes endotérmicos**

Agente químico	Descripción
<b>Borohidruro de Sodio (NaBH<sub>4</sub>).</b>	Es un agente de soplado endotérmico efectivo debido a que su reacción con agua produce de 10 a 20 veces la cantidad de gas generado por agentes químicos de soplado, por lo que debe de evitar el contacto con agua.
<b>Bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>).</b>	Tiene una temperatura de descomposición de 140°C emitiendo CO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O, su descomposición es muy rápida y tiene aplicaciones en agentes de soplado para plásticos termoplásticos con mayor temperatura que los polímeros de estireno.
<b>Ácido policarbonico</b>	Su temperatura de descomposición es de 320°F y emite alrededor de 100 cm <sup>3</sup> /g de dióxido de carbono. Tiene aplicación como agente de nucleación en la formación de espumas.

### 1.5.2 Importancia en el mercado.

Hay menos de 50 proveedores de agentes de espumado en todo el mundo. La mayoría de las empresas líderes, han construido su negocio con agentes químicos de soplado durante al menos 20 años muchos de los agentes químicos de soplado únicamente se venden como línea completa de productos en una sola región y se exportan solo productos seleccionados. No hay proveedores de agente de soplado químico que tengan una posición de liderazgo en las tres grandes regiones del mundo. Muchos de los principales productores de agentes químicos de soplado se encuentran en la región de Asia / Pacífico. Hay una docena de productores de agentes químicos de soplado sólo en China. Debido a la mala logística en ese país, el envío de los productos químicos es bastante costoso, por lo que la mayoría de las compañías no suministran localmente.

El proveedor líder de agentes de expansión químicos en América del Norte es Chemtura antes Uniroyal Chemical; Bayer es el proveedor líder de productos de agentes de expansión química en Europa, seguido de Dong Jin en Asia / Pacífico. La región de mayor consumo, cuenta con numerosos proveedores, muchos de venta sólo en esa zona del mundo. Los principales proveedores de esta región suelen fabricar en más de un país, por ejemplo, Dong Jin Química y Otsuka Chemical tienen plantas de producción primaria en Corea y Japón respectivamente, pero también producen en Indonesia a través de asociaciones de empresas conjuntas [15].

# CAPITULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL

## 2.1 MATERIALES Y EQUIPO.

### 2.1.1 INYECTORA DEMAG SUMITOMO SYSTEC 100-430.

Para el desarrollo de este trabajo se empleó una máquina inyectora de plástico para la obtención de las probetas, En la **Tabla 2.1** se muestra lo más importante de la hoja técnica de la máquina de inyección la cual es de marca Demag Sumitomo Systec.

**Tabla 2.1 Hoja técnica de máquina de inyección Demag Sumitomo Systec 100-430.**

Unidad de inyección	
Diámetro del husillo	40mm
Relación L/D	20
Presión de inyección a (400°C)	2025 bar
Volumen de carrera	231cm <sup>3</sup>
Capacidad de la tolva de material	35 L

### 2.1.2 ESTERILIZADOR ELÉCTRICO DE VAPOR A PRESIÓN O AUTOCLAVE.



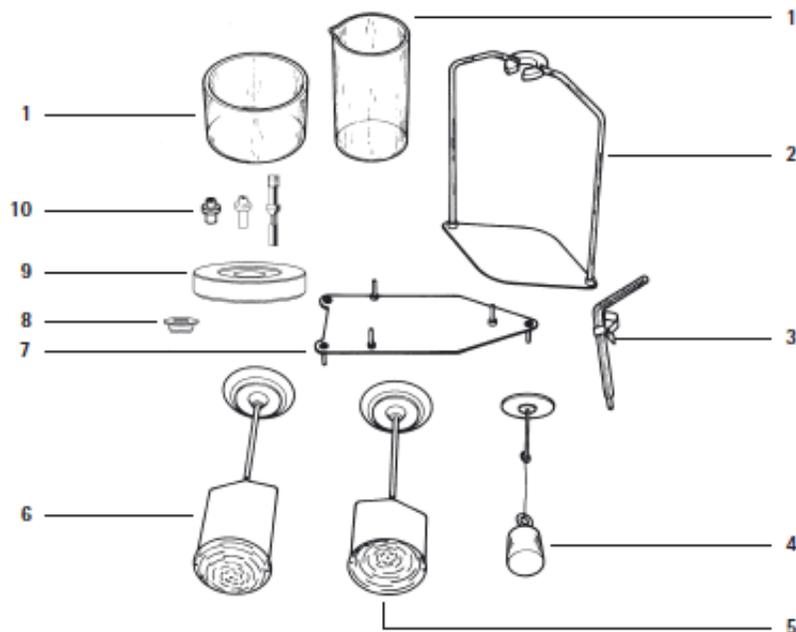
**Figura 2.2** Autoclave.

### Ambiente permitido para la operación.

Esta unidad ha sido diseñada para operar dentro de un medio ambiente entre 5° y 40° Centígrados o 41° y 104° Fahrenheit con una presión de 0.5 Psi hasta 40 Psi. Un grado de polución permitido de IEC664 que no exceda una clasificación de dos. Los niveles relativos de humedad son del 80% para temperaturas hasta 31°C (88°F) y decreciente lineal de 50% a 40°C (104°F).

### 2.1.3 DISPOSITIVO DE DENSIDAD.

El dispositivo de densidad solo se puede utilizar montándolo en una balanza analítica. Se deben utilizar los instrumentos de acuerdo al tipo de material a obtener su densidad, en la **Tabla 2.2** se dan a conocer los nombres de cada una de las partes del dispositivo el cual se muestra en la **Figura 2.4** para la obtención de la densidad en materiales plásticos.



**Figura 2.4** Dispositivo para medir densidad.

**Tabla 2.2 Nombre de cada parte del dispositivo de densidad Sartorius YDK01.**

No. de Parte	Nombre
1	Vasos analíticos (d 76 mm y d 55 mm)
2	Soporte de barras
3	Termómetro con brida de sujeción
4	Dispositivo de vidrio
5	Criba para sumergir muestras
6	Platillo de inmersión
7	Puente metálico
8	Anillo obturador para modelos ME
9	Anillo de ajuste para ME235S/P, ME254S para versiones de modelo hasta fines del año 2004
10	Adattatori (3 pezzi)

#### **2.1.4 Medidor de alturas Mitutoyo LH-600.**



**Figura 2.5 Mitutoyo LH-600**

Este aparato es utilizado para mediciones de objetos en el eje Z, el cual fue útil para realizar las mediciones en la prueba de compresión, por su buena resolución de (0.0001 a 0.1 mm) a una precisión de 20°C.

- Técnica Rango de medición de datos: 0-38 " / 0 - 972mm
- Control deslizante de carrera: 24" / 600 mm
- Resolución: 0,0001 / 0,001 / 0,01 / 0,1 mm (conmutable) 0,0001 / 0,001 / 0,01 / 0,1 mm / 0.000001 " / 0.00001" / 0,0001 " / 0.001" Precisión a 20 ° C.

### 2.1.5 Dispositivo de compresión

El dispositivo está conformado por el soporte de compresión y seis pesas de 1, 2, 4, 8, 9 y 10 kg, para utilizarse se necesita de una probeta de compresión la cual es colocada en la parte inferior de la placa móvil del dispositivo una vez ese paso se coloca la pesa que sea requerida en la parte superior y se ejecuta la prueba.



**Figura 2.6** Dispositivo de compresión y pesas de 1, 2, 4, 8, 9, 10 kg.

### 2.1.6 MICROSCOPIO ÓPTICO OLYMPUS BX41

Este equipo se utilizó para realizar la prueba de microscopía, su forma de uso es sencillo, se coloca la muestra debajo del lente se enciende la luz reflectora y se ajusta la graduación para obtener la mejor legibilidad en la toma, una vez teniéndola se revisa la graduación y se obtiene la imagen.

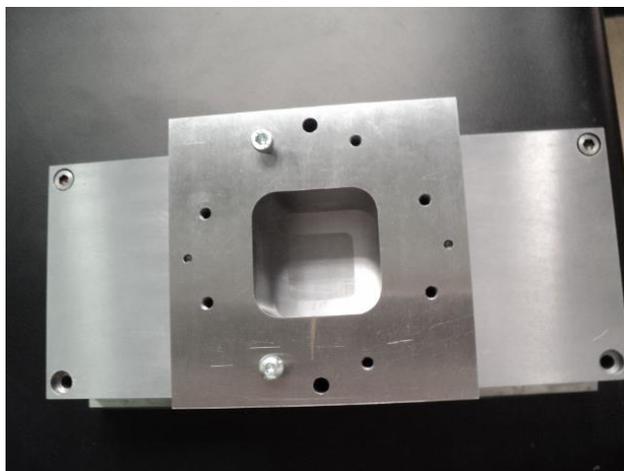


**Figura 2.7** Microscopio óptico Olympus BX41

- La fuente halógena de 12V/100W ofrece una iluminación brillante y equilibrada adecuada para los métodos de observación con el campo claro y con contraste.
- Opciones de iluminación halógena de 100W para brindar luz transmitida o reflejada, HBO (mercurio) de 100W y XBO (xenón) de 75W, LED e iluminación de halogenuro metálico de terceros para trabajar con luz reflejada y fluorescencia.

### 2.1.7 INSERTO PARA PROBETA

- El inserto es desmontable a un molde de inyección, tiene una sola cavidad para una probeta en forma de cubo con un volumen de  $50 \text{ mm}^3$  y un ángulo de desmoldeo de  $1^\circ$ , el cual fue utilizado para la obtención de los prototipos.



**Figura 2.8** Inserto para probeta de inyección.

### 2.1.8 MATERIALES

En la **Tabla 2.3** se presentan las propiedades térmicas y mecánicas más importantes del polietileno de baja densidad Braskem-LDPE D7/13 que fue empleado para la obtención de los prototipos.

**Tabla 2.3** Propiedades mecánicas y térmicas del polietileno de baja densidad.

Índice de fluidez (190°/2.16 Kg g/10 min	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Resistencia al impacto por caída de dardo. g/F50	Resistencia al impacto. gF	Melting point DSC °C
2,2	0.77	120	280/380	80

En la **Tabla 2.4** se presentan las propiedades térmicas y mecánicas más importantes del etileno vinil acetato con 28 % de copolimero, ya que con estas especificaciones se puede ajustar las condiciones de proceso del vinil acetato empleado para la obtención de los prototipos.

**Tabla 2.4 Propiedades mecánicas y térmicas del etileno vinil acetato (EVA) con 28% de copolímero vinil acetato (VA)**

Índice de fluidez (140°/2.16 Kg)	Densidad	Resistencia a la tracción.	Alargamiento de ruptura	Resistencia al impacto por caída de dardo.	Resistencia al impacto.	Melting point DSC
g/10 min	g/cm <sup>3</sup>	Mpa	%	g/F50	gF	°C
5.4683	0.921	20/15	400/670	120	280/380	70

En la **Tabla 2.5** se presenta las propiedades térmicas de la azodicarbonamida como: temperatura de descomposición, rendimiento del gas y plásticos compatibles para este tipo de agente espumante.

**Tabla 2.5 Espumantes y aceleradores base azodicarbonamida.**

Grado	Composición	Temperatura de descomposición °C	Rendimiento del gas (mL/g)	Plástico al cual se adapta
Azodicarbonamida	Tipo orgánico	150~170	20~25	HDPE,PP, EVA

### **CARBONATO DE CALCIO- Grado Industrial.**

El bicarbonato de sodio es un agente espumante endotérmico, con las siguientes especificaciones que se muestran a continuación se determina las condiciones de procesamiento.

Peso molecular: 84,01

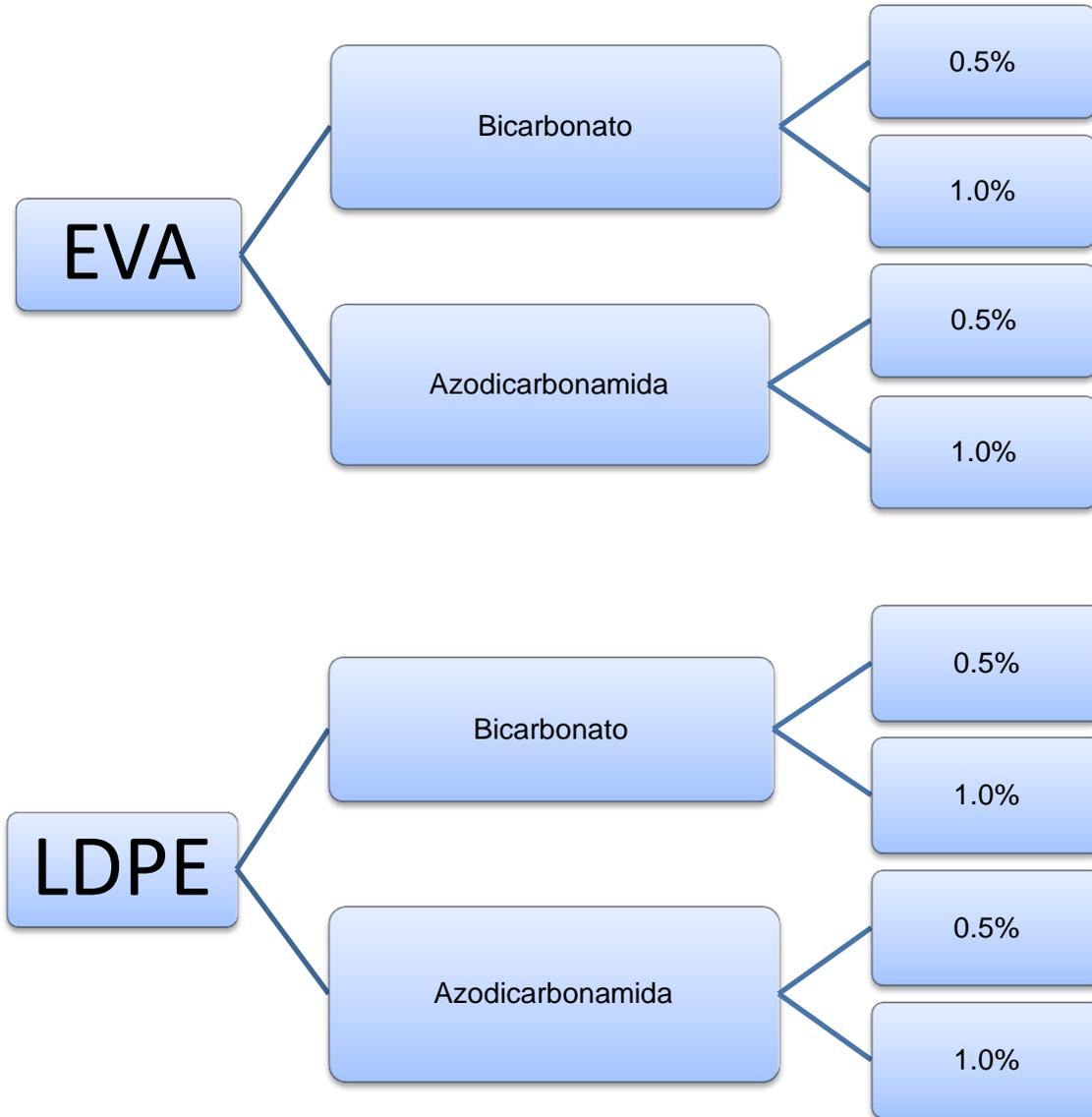
Punto de fusión: Comienza a perder dióxido de carbono a 50°C hasta 270°C.

Punto de ebullición: No hierve, se descompone.

Temperatura de descomposición 140°C.

## 2.2 METODOLOGÍA.

En el siguiente diagrama se da a conocer la metodología que se llevó a cabo para la formulación de la resina con el agente espumante.



En la **Tabla 2.6** se presentan los parámetros y cantidades de resina y agente espumante para la inyección de los prototipos

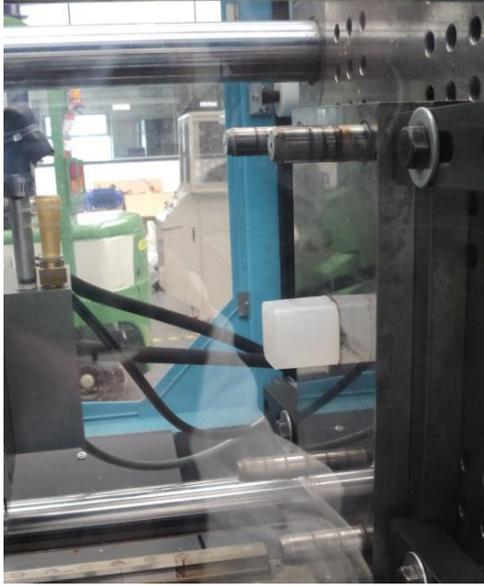
**Tabla 2.6 Cantidades y porcentajes para la preparación e inyección de prototipos.**

Temperatura de procesamiento a 150°C					
Sistema 1	LDPE %	Bicarbonato de sodio %	Azodicarbonamida (%)	Presión (bar)	Tiempo de enfriamiento (seg)
Experimento 1	99.5	0.5	0	1400	60
Experimento 2	99.5	0	0.5	1400	60
Experimento 3	99	1	0	1400	60
Experimento 4	99	0	1	1400	60
Sistema 2	EVA %	Bicarbonato de sodio %	Azodicarbonamida (%)	Presión (bar)	Tiempo de enfriamiento (seg)
Experimento 1	99.5	0.5	0	1400	60
Experimento 2	99.5	0	0.5	1400	60
Experimento 3	99	1	0	1400	60
Experimento 4	99	0	1	1400	60

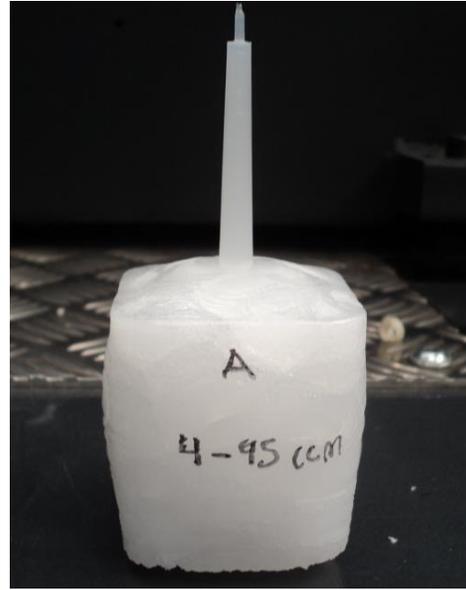
### 2.2.1 Preparación de mezclas e inyección de prototipo.

Con el fin de realizar la inyección de las probetas espumadas a las cuales se les realizaran las pruebas de caracterización se presenta el procedimiento que se llevó para obtención.

1. Se pesó el material en base a las formulaciones de la **Tabla 2.8**.
2. Se mezcló homogéneamente la resina con el agente espumante.
3. Se alimentó la tolva con la resina la cual se procesó en una máquina inyectora a condiciones de proceso ya antes mencionadas en la **Tabla 2.8** y se obtuvieron los prototipos.



A



B

**Figura 2.12 [A] Inyección de probeta, [B] probeta espumada.**

En base a las Normas ASTM- 3575 y ASTM-792 para la evaluación de espumas poliolefinicas se requirieron 4 pruebas básicas para conocer sus propiedades mecánicas y sus posibles aplicaciones en la industria.

Las cuatro pruebas fueron: densidad, compresión, microscopía y absorción de agua, que se describen a continuación.

### **2.2.2 DENSIDAD.**

En la **Tabla 2.7** se muestra el método a utilizar para la realización de la prueba de densidad a espumas poliolefinicas basado en la norma ASTM 792, en la cual dice el tipo de instrumento que se debe utilizar, condiciones de ambiente a la que debe ser sometida la prueba, tipo de muestra y presentación.

**Tabla 2.7 Método para realización de prueba de densidad.**

<b>Método</b>	<b>ASTM D 792</b> <b>Método de Prueba estándar para la determinación de densidad y gravedad específica de plásticos por desplazamiento [13].</b>	
<b>Instrumento</b>	Balanza analítica con resolución de 0.01 mg	
<b>Muestras</b>	Tipo	Trozos de pieza completa
	Otra preparación	No
<b>Condiciones de Prueba</b>	Temperatura	23 °C
	Líquido sumergible	Agua

**Procedimiento:**

1. Se cortan las probetas.



**Figura 2.13 Corte del espécimen a realizar la densidad.**

2.- Se monta el dispositivo en la balanza analítica.



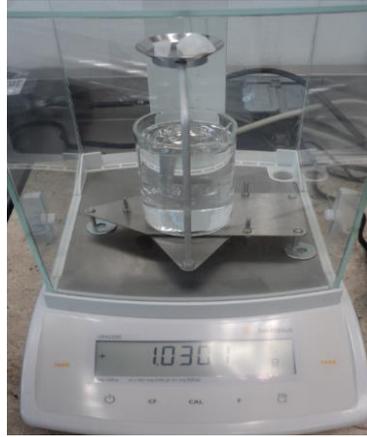
**Figura 2.14 Balanza Analítica con dispositivo de densidad**

2.- Se calientan aproximadamente 250 mL de agua en la parrilla de calentamiento, controlando la temperatura a 23°C.



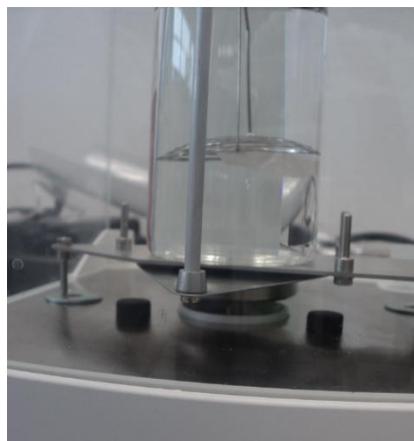
**Figura 2.15 Parrilla de calentamiento**

3.- Una vez que la temperatura del agua es de 23°C, dentro del recipiente se montó el dispositivo que marca la norma ASTM D 729, pesando aproximadamente 1g de la muestra.



**Figura 2.16 Montaje de dispositivo de densidad.**

4.-Una vez pesada la muestra, se tara la balanza analítica y se sumerge para iniciar la prueba, al sumergir el espécimen se obtuvo como resultado un valor negativo el cual se anotó para la aplicación de la **(1)**.



**Figura 2.17 Montaje de dispositivo de densidad, durante la prueba.**

Cálculos: Para obtener el valor de la densidad se utilizó la siguiente fórmula de acuerdo a la norma ASTM 792 para la obtención de densidad de espumas poliolefinicas.

$$\rho = \frac{w(a) \cdot \rho(f)}{0.99983(G)} + 0.0012g/cm$$

(1)

Dónde:

$\rho$  = Densidad

w (a)= Peso de la muestra.

$\rho$ ( f)= Densidad del líquido a la temperatura establecida por la norma.

G= La diferencia del peso queriendo salir a la superficie.

Para obtener un resultado con mayor exactitud se realiza la prueba 4 veces se obtiene el promedio de ellas y es el que se reporta como resultado [13].

### **2.2.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MÉTODO CIATEQ BASADO EN EL DISPOSITIVO DE LA NORMA ASTM-3575.**

El método Ciateq se basa en dejar por 1 minuto la carga sobre el espécimen, haciendo solo dos mediciones una antes de ser comprimida y otra después. Sacando la diferencia de alturas se puede deducir que a menor deformación tiene mejores propiedades a la compresión.

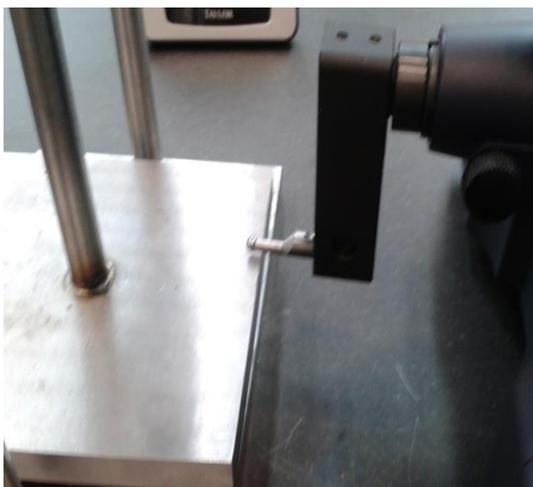
#### **Procedimiento:**

1.- Se coloca el cubo en el dispositivo de compresión como se muestra en la **Figura 2.18**

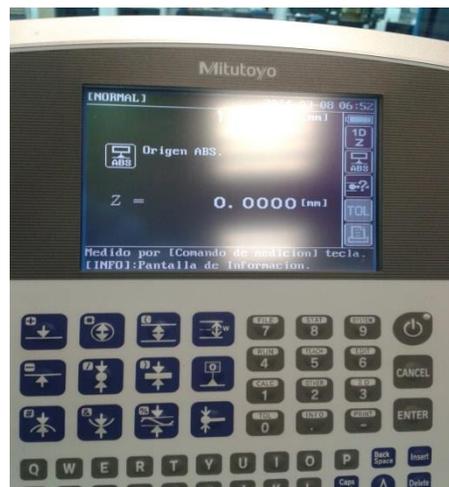


**Figura 2.18 Colocación de la muestra en el dispositivo**

2.- Se mide con el medidor de alturas y se digita en cero la referencia para comparar la deformidad de la muestra al ser puesta la pesa.



A



B

**Figura 2.19 [A] Medición de palpador de bola, [B] Medición de referencia en cero.**

3.- Se coloca la pesa de 8 kg en el dispositivo de compresión y se deja 1 minuto a que la muestra se comprima y se vuelve a medir la altura.



**Figura 2.20 Ejecución de la prueba.**

El paso anterior se repite 5 veces en los especímenes de cada formulación, con lo cual se obtiene el promedio y se reporta la compresión en (mm) que hubo en las muestras. Entre menor sea la deformación en (mm) mejores propiedades a la compresión tiene la espuma.

#### **2.2.4 MICROSCOPIA OPTICA**

Esta prueba fue realizada y mandada hacer a un centro de investigación, el cual cuenta con el equipo indicado para la realización de esta prueba, solo se realizaron 2 tomas ya que esta prueba solo se tomó como referencia para observar la cantidad de área espumada presentada en las probetas, también se verifico el tamaño de celda, el cual ayudara a saber qué relación tiene con las demás pruebas de caracterización.

#### **Procedimiento:**

1. Preparación de la muestra, se corta una sección de la parte a evaluar.



**Figura 2.21 Preparación de la muestra.**

2. Se coloca la muestra en el microscopio óptico y se observa, si es legible el tamaño de celda de la espuma se verifica el aumento y se anota la graduación del lente, si no es legible se tienen que ajustar los lentes a forma de que se pueda ver el tamaño de la celda de la espuma. Se obtienen dos tomas por cada formulación, una externa para la verificación del tamaño de celda y la interna para comprobar la cantidad de área espumada (ver **Figura 2.22**).



**Figura 2.22 Colocación de la muestra en el microscopio óptico.**

## 2.2.5 ABSORCIÓN DE AGUA.

De acuerdo a la norma ASTM-D3575 se muestra en la **Tabla 2.8** el método utilizado para la ejecución de la prueba de absorción de agua, el cual nos indica que dispositivo debemos utilizar, el tipo de muestra, las dimensiones, la presión a la que debe estar sometida la prueba, temperatura y tiempo que debe durar.

**Tabla 2.8 Método para realización de prueba de densidad ASTM-D3575 [4].**

Método	<b>ASTM-D3575- Método de prueba estándar para materiales celulares flexibles hechos de polímeros olefínicos. Parte –L absorción bajo presión constante</b>	
Instrumento	Dispositivo de presión constante	
Muestras	Tipo	Rectángulo
	Largo x Ancho	0.1016 m x 0.1016m
Condiciones de prueba	Presión	4.35 Psi
	Temperatura	18-29°C
	Tiempo de prueba	48h

### Procedimiento:

1. Se prepara la muestra a las dimensiones que indica la norma y se pesa.



**Figura 2.23 Muestra de la espuma.**

2. Se sujeta la muestra a la rejilla para ser sumergida con aproximadamente 10 L de agua.



**Figura 2.24 Colocación de muestra en la autoclave.**

3. Se cierra el autoclave y se le insufla presión a 4.35 Psi. (ver Figura 2.25)



**Figura 2.25 Autoclave para prueba de absorción de agua.**

4. Se deja corriendo la prueba durante 48 h una vez que haya transcurrido el tiempo se saca la muestra y se vuelve a pesar.



**Figura 2.26 Se pesa la muestra una vez ejecutada la prueba.**

Cálculos

Para obtener el resultado de la prueba y basándose en la norma ASTM- D3575; se tendrá que aplicar una fórmula **(2)**.

$$\text{Absorción de agua} = x = \frac{w_2 - w_1}{A}$$

**(2)**

Donde

W2= masa de la muestra inmersa (kg) ó (lb).

W1= masa de la muestra antes de ser inmersa (kg) ó (lb).

A= Área de la superficie de corte (m<sup>2</sup>) ó (ft<sup>2</sup>).

Para una mayor exactitud se tiene que ejecutar la prueba a un mínimo de 5 especímenes para obtener su promedio y la desviación estándar. Las unidades que se manejan son en kg/m<sup>2</sup> [14].

# CAPITULO III RESULTADOS

## 3.1 Resultados de EVA.

### Resultados del espumado de Etileno vinil Acetato (EVA)

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización para las espumas de etileno vinil acetato (EVA) y polietileno de baja densidad (LDPE) de acuerdo a las Normas ASTM D3575 y D792.

La forma en que estarán secuenciados los resultados son:

- ✓ Densidad
- ✓ Compresión
- ✓ Microscopía
- ✓ Absorción de agua.

Primero se presentan los resultados obtenidos de las pruebas hechas para el espumado de (EVA) con su respectiva discusión y al final, el análisis de resultados.

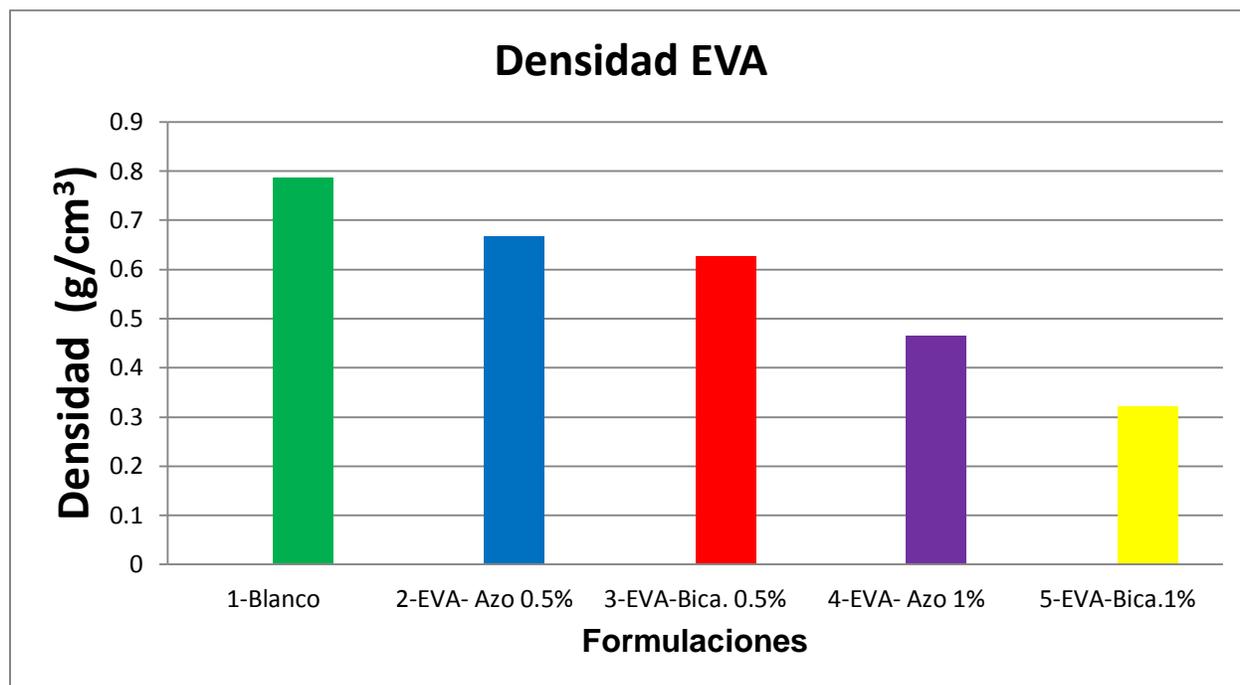
#### 3.1.1 Densidad

De acuerdo a la prueba de densidad se obtuvieron los siguientes resultados; los cuales se muestran en la **Tabla 3.1**

**Tabla 3.1 Densidad obtenida a espumas de etileno vinil acetato (EVA).**

No. De la muestra (% en peso)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Desviación estándar (g/cm <sup>3</sup> )	desviación estándar (%)
1-Blanco	0.7867	0.004213	1%
2-EVA- Azodicarbonamida 0.5%	0.6675	0.001905	0.3%
3-EVA-Bicarbonato de sodio 0.5%	0.6264	0.001990	0.3%
4-EVA- Azodicarbonamida 1%	0.4648	0.008263	2%
5-EVA-Bicarbonato de sodio 1%	0.3205	0.002762	1%

La **Gráfica 3.1** muestra los resultados de la densidad para el espumado de EVA.



**Gráfica 3.1 Densidad del espumado de etileno vinil acetato (EVA).**

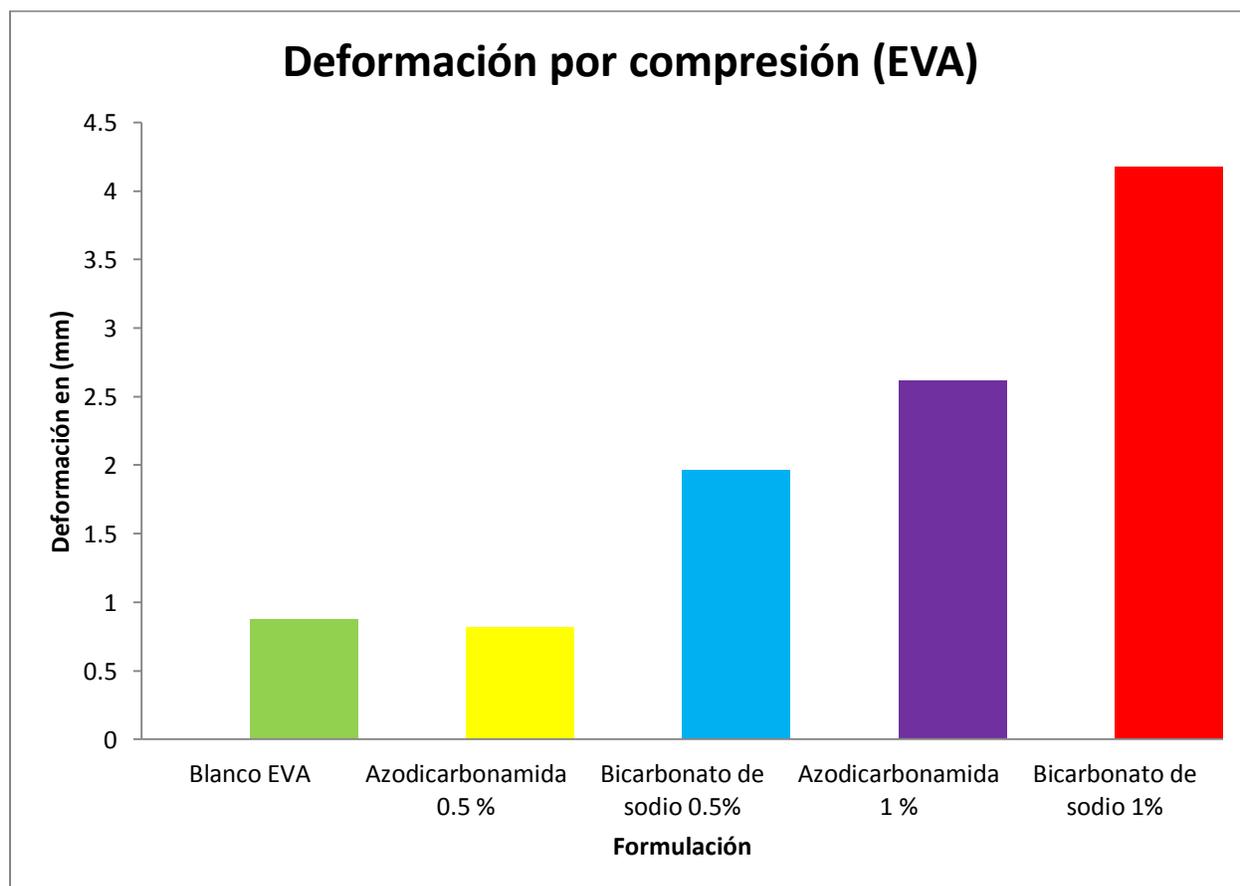
De acuerdo a los resultados obtenidos en el espumado de etileno vinil acetato las formulaciones con 0.5 % de agente espumante presentaron una densidad similar por lo que se infiere que obtuvieron un espumado semejante, sin embargo cuando se agrega el 1% de agente espumante se encuentra una variación significativa en un 5 % entre sus densidades. La muestra 5 presenta una menor densidad en comparación con la muestra 4, por lo tanto el bicarbonato de sodio genera un mayor espumado en comparación con la azodicarbonamida.

### 3.1.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EVA.

Los resultados se presentan en la **Tabla y Gráfica 3.2** respectivamente.

**Tabla 3.2 Deformación por compresión en (mm) del espumado de etileno vinil acetato.**

Nombre de la muestra (% en peso)	Deformación por compresión en (mm) EVA	Desviación estándar mm	Desviación estándar (%)
Blanco EVA	0.8713	0.00241	0.3%
Azodicarbonamida 0.5 %	0.8176	0.00149	0.2%
Bicarbonato de sodio 0.5%	1.9624	0.02671	1.4%
Azodicarbonamifda 1 %	2.6179	0.03897	1.5%
Bicarbonato de sodio 1%	4.1757	0.01897	0.5%



### Gráfica 3.2 Deformación por compresión del espumado de etileno vinil acetato.

De acuerdo a los datos obtenidos en la deformación por compresión del espumado de etileno vinil acetato se puede observar que obtiene mayor resistencia a la compresión el espumado con azodicarbonamida en comparación con el bicarbonato de sodio, esto puede deberse a que con el bicarbonato de sodio se obtuvo una mayor cantidad de espumado.

#### 3.1.3 MICROSCOPIA.

En base a la microscopia realizada en el espumado de (EVA) se obtuvieron los siguientes resultados, que se muestran en las microfotografías de las **Figuras 3.1 a 3.4** la regla con la que se midió el tamaño de celda es de 1000 $\mu$ .

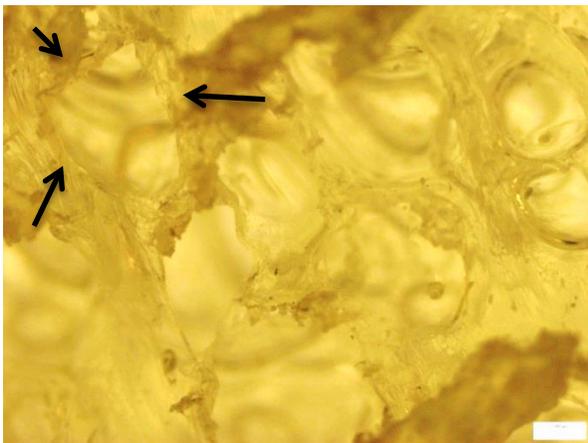


Figura 3.1 EVA-Bicarbonato de sodio 0.5%

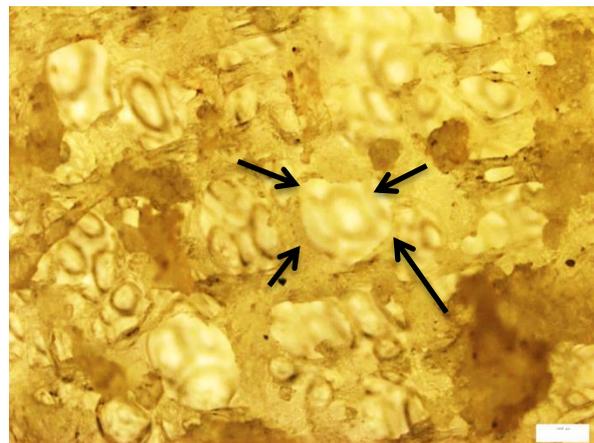


Figura 3.2 EVA-Azodicarbonamida 0.5%

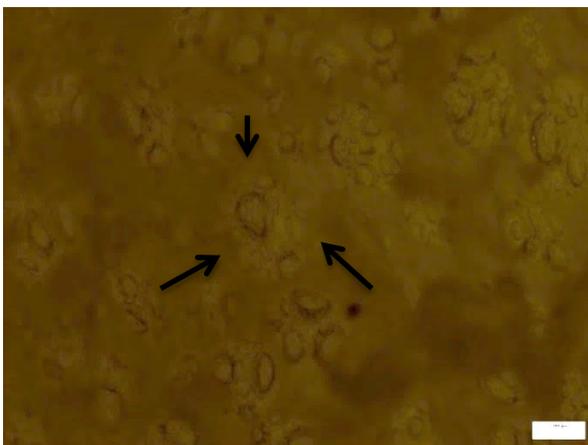


Figura 3.3 EVA-Azodicarbonamida 1%



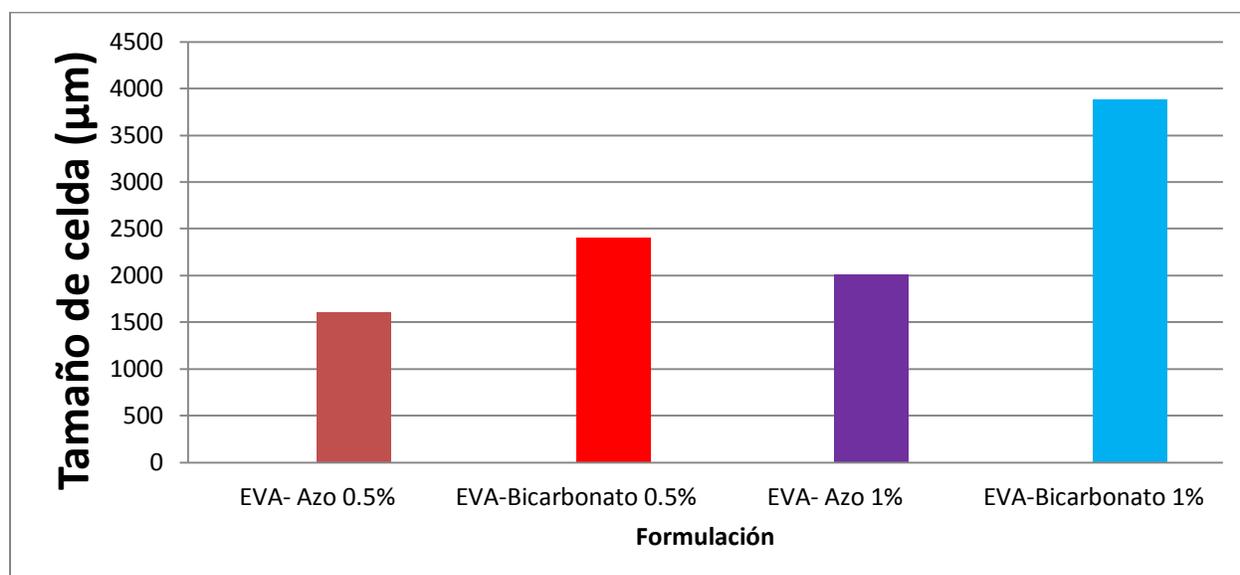
Figura 3.4 EVA-Bicarbonato de sodio 1%

La regla de medición es de 1000 $\mu$  con la cual se realizaron las determinaciones en las celdas marcadas con las flechas en las **Figuras 3.1 a 3.4**

En base a las mediciones realizadas en la microscopía del espumado de (EVA) se obtuvieron los siguientes tamaños de celda, que se muestra en la **Tabla y Grafica 3.3**

**Tabla 3.3 Tamaño de celda obtenida en espumas de etileno vinil acetato (EVA)**

Nombre de la Muestra (% en peso )	Tamaño de celda ( $\mu\text{m}$ )
EVA- Azodicarbonamida 0.5%	1600
EVA-Bicarbonato de sodio 0.5%	2400
EVA- Azodicarbonamida 1%	2000
EVA-Bicarbonato de sodio 1%	3880



**Gráfica 3.3 Tamaño de celda en espumas de etileno vinil acetato (EVA).**

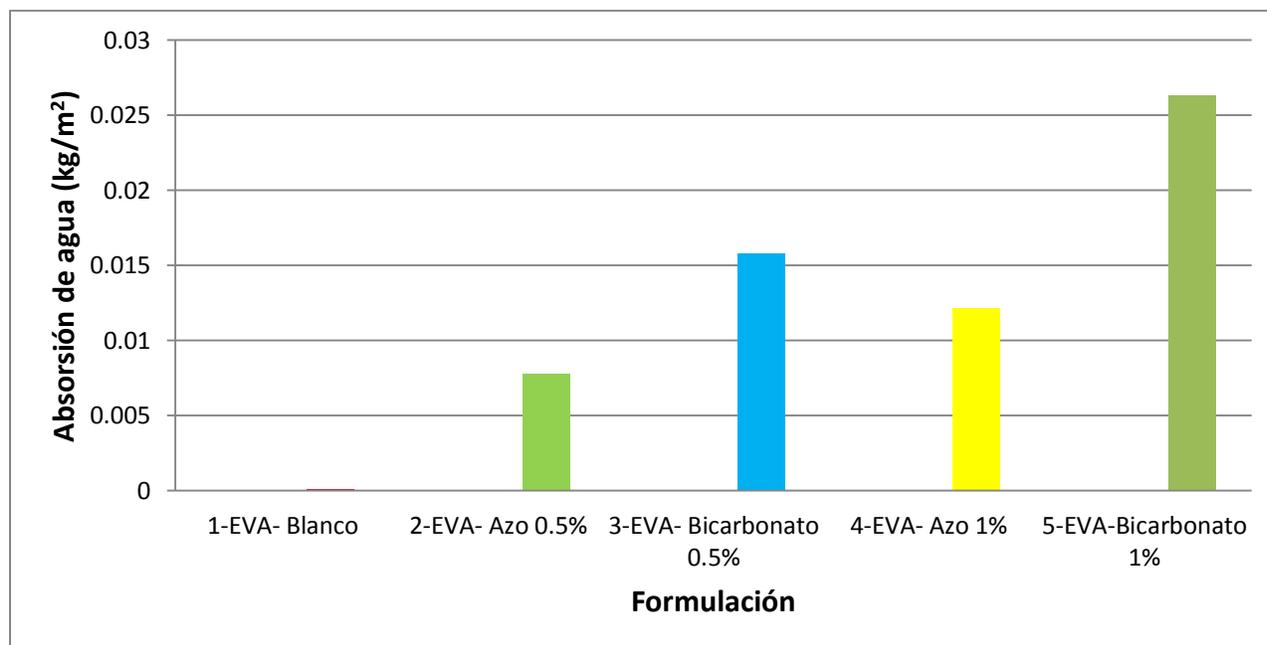
De acuerdo con el tamaño de celda obtenido en el espumado de etileno vinil acetato se puede observar que con el bicarbonato de sodio se obtuvo un mayor tamaño en comparación con la azodicarbonamida, sin embargo la celda presenta una figura ovalada aunque haya variación en su tamaño.

### 3.1.4 PRUEBA DE ABSORCIÓN DE AGUA.

En la **Tabla y Gráfica 3.4** se muestran los resultados obtenidos en la prueba de absorción de agua realizada a la espuma de etileno vinil acetato.

**Tabla 3.4 Resultados obtenidos de absorción de agua del espumado de EVA.**

Nombre de la Muestra (% en peso)	Absorción de agua (kg/m <sup>2</sup> )	Desviación estándar (kg/m <sup>2</sup> )	Desviación estándar (%)
1-Blanco	0.00002	0.0000012	6.0%
2-EVA- Azodicarbonamida 0.5%	0.00776	0.000381	4.9%
3-EVA-Bicarbonato de sodio 0.5%	0.01575	0.000967	6.1%
4-EVA- Azodicarbonamida 1%	0.01213	0.001963	16.2%
5-EVA-Bicarbonato de sodio 1%	0.02634	0.008367	31.8%



**Gráfica 3.4 Absorción de agua del espumado de EVA.**

En base a los resultados, se puede observar que el material espumado con bicarbonato de sodio, absorbe mayor cantidad de agua con respecto al espumado de azodicarbonamida, esto se debe a que el bicarbonato de sodio produjo un tamaño de celda mayor, alojando el agua dentro de los poros.

### 3.1.5 RESULTADOS DEL ESPUMADO DE ETILENO VINIL ACETATO EVA Y ANÁLISIS.

En la **Tabla 3.5** se muestran en resumen los resultados de las pruebas de caracterización para el espumado de EVA.

**Tabla 3.5 Análisis de resultados del espumado de etileno vinil acetato (EVA)**

Muestra (% en peso)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Deformación por compresión (mm)	Tamaño de celda (µm)	Abs. de agua (Kg/m <sup>2</sup> )
Blanco	0.7867	0.8713	-----	0.00002
Azo 0.5 %	0.6675	0.8176	1600	0.00776
NaHCO <sub>3</sub> 0.5 %	0.6264	1.9624	2400	0.01575
<b>Azo 1 %</b>	<b>0.4648</b>	<b>2.6179</b>	<b>2000</b>	<b>0.01213</b>
NaHCO <sub>3</sub> 1 %	0.3205	4.1757	3880	0.02634

#### **Análisis de resultados en el espumado de etileno vinil acetato (EVA).**

Según la **Tabla 3.5** se observa que al agregar 0.5% de agente espumante, la cantidad no es suficiente para generar un espumado homogéneo, ni con tamaño de celda estable, ocasionando que haya espacios sin espumar. Esto repercute ya que la densidad no disminuye lo suficiente lo anteriormente significa que internamente en el espécimen, existe mayor área de material sólido que espumado, sin embargo la deformación por compresión es menor a causa de lo antes mencionado.

Al agregar 1% de agente espumante puede notarse que dicha cantidad es óptima para el espumado, la densidad baja considerablemente, la propiedad mecánica de compresión no disminuye demasiado, y pese a que el tamaño de celda aumenta, tiene una mayor homogeneidad. En el caso del bicarbonato de sodio, se tiende a absorber mayor cantidad de agua en comparación con la azodicarbonamida.

De los agentes espumantes analizados, el bicarbonato de sodio genera un tamaño de celda mucho mayor en comparación con la azodicarbonamida, pero esta presenta mejor propiedad de compresión y menor absorción de agua.

La formulación que obtuvo propiedades óptimas en el caso del etileno vinil acetato es (EVA-1% azodicarbonamida), ya que aunque no fue la menor densidad si fue considerable su disminución. En la prueba de compresión se presentó una deformación intermedia, el tamaño de celda fue homogénea y no tan grande como en el caso del bicarbonato de sodio. En la prueba de absorción de agua como ya se había mencionado anteriormente el espumado con azodicarbonamida mostró buena propiedad al no absorber demasiada agua a diferencia del espumado con bicarbonato de sodio.

### 3.2 RESULTADOS (LDPE)

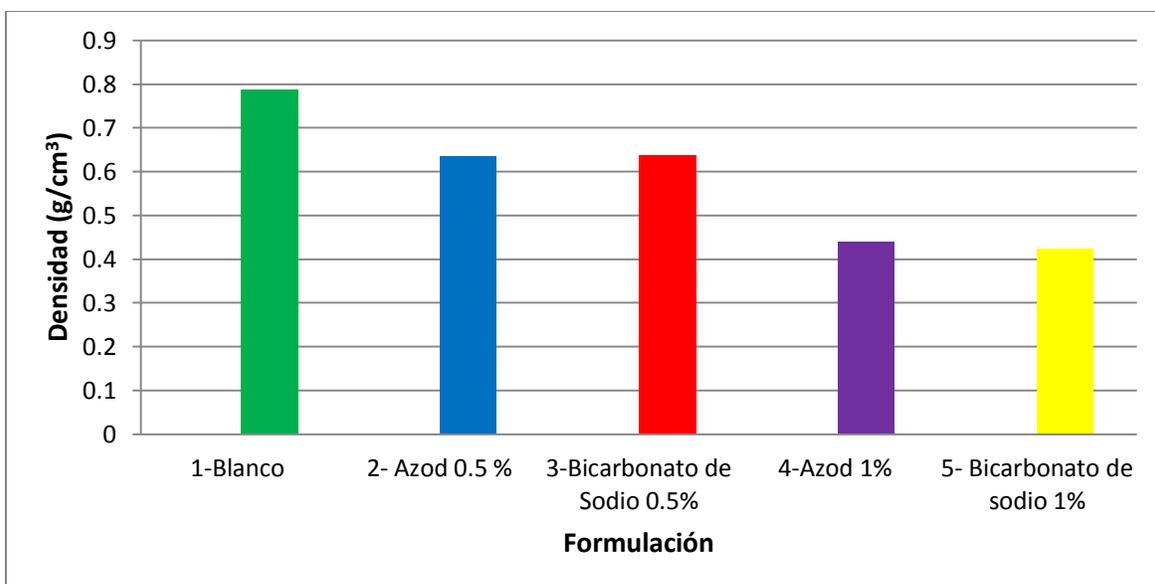
Primero se presentan los resultados obtenidos de las pruebas hechas para el espumado de (LDPE) con su respectiva discusión y al final, el análisis de resultados.

#### 4.1.1 DENSIDAD

Se muestran en la **Tabla 3.6** y en la **Gráfica 3.5** los resultados obtenidos en la prueba de densidad realizada a la espuma de LDPE.

**Tabla 3.6 Densidad obtenida en espumas de polietileno de baja densidad LDPE**

No. De la muestra (% en peso)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Desviación estándar (g/cm <sup>3</sup> )	Desviación estándar (%)
1-Blanco	0.7867	0.0238	3.0%
2-LDPE- Azodicarbonamida 0.5 %	0.6341	0.0147	2.3%
3-LDPE-Bicarbonato de Sodio 0.5%	0.6378	0.0095	1.5%
4- LDPE- Azodicarbonamida 1 %	0.4406	0.0163	3.7%
5- LDPE-Bicarbonato de Sodio 1%	0.4241	0.0098	2.3%



**Gráfica 3.5 Densidad del espumado de polietileno de baja densidad (LDPE).**

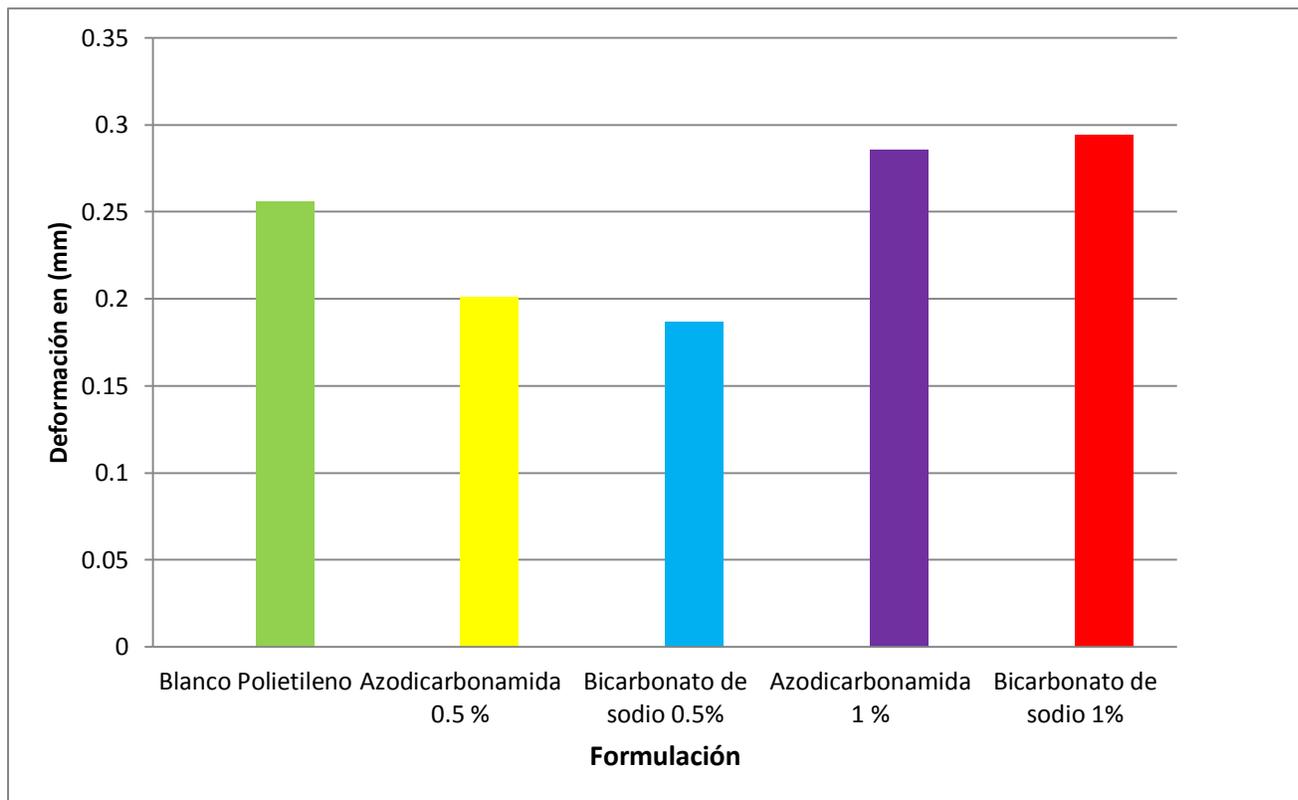
De acuerdo con los resultados obtenidos para la prueba de densidad en el espumado de polietileno de baja densidad (LDPE), se puede observar gráficamente que no se presenta ninguna variación entre los dos tipos de agentes espumantes, en las concentraciones utilizadas de 0.5% y 1%, lo que nos indica que se generaron cantidades similares de gas dispersas en toda el área del espécimen.

### 3.2.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

De acuerdo a la prueba realizada en resistencia a la compresión al espumado de LDPE se obtuvieron los resultados mostrados en la **Tabla 3.7** y **Grafica 3.6**

**Tabla 3.7 Deformación por compresión en (mm) del espumado de polietileno de baja densidad.**

Deformación por compresión en (mm) LDPE			
Nombre de la muestra ( % en peso )	mm	Desviación estándar (mm)	Desviación estándar (%)
Blanco Polietileno	0.2558	0.00539	2.1%
Azodicarbonamida 0.5 %	0.2009	0.00236	1.2%
Bicarbonato de sodio 0.5%	0.1867	0.00562	3.0%
Azodicarbonamida 1 %	0.2857	0.00736	2.6%
Bicarbonato de sodio 1%	0.2942	0.01452	4.9%



**Gráfica 3.6 Deformación por compresión del espumado de polietileno de baja densidad (LDPE)**

En base a los resultados obtenidos en el espumado de polietileno de baja densidad se puede analizar que los dos agentes de espumado, la azodicarbonamida y el bicarbonato de sodio tienen propiedades de compresión muy semejantes sin ninguna variación considerable.

### **3.2.3 MICROSCOPIA**

En base a la microscopia realizada en el espumado de (LDPE) se obtuvieron los siguientes resultados, que se muestran en las microfotografías de las **Figuras 3.5 a 3.8** la regla con la que se midió el tamaño de celda es de 1000 $\mu$ .

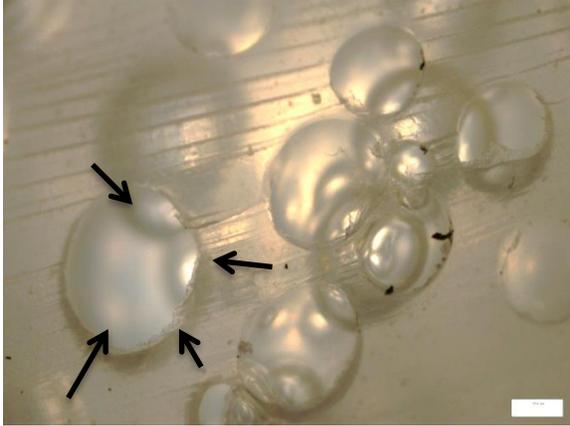


Figura 3.5 LDPE Azodicarbonamida 0.5%

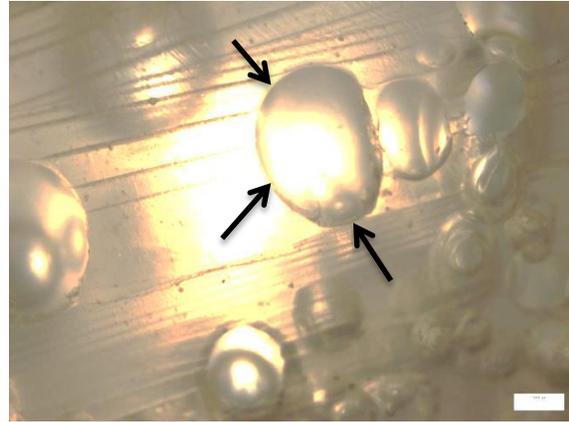


Figura 3.6 LDPE Bicarbonato de sodio 0.5%

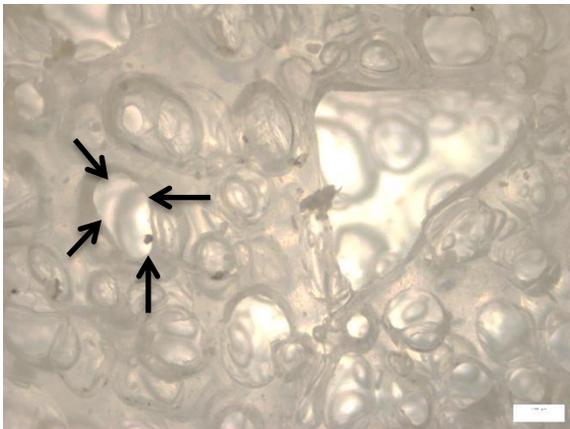


Figura 3.7 LDPE-Azodicarbonamida 1%

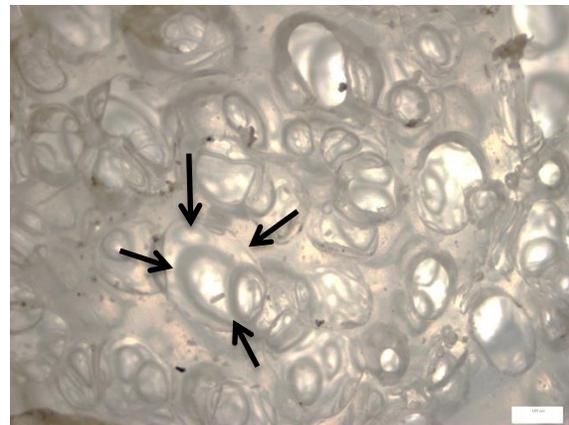
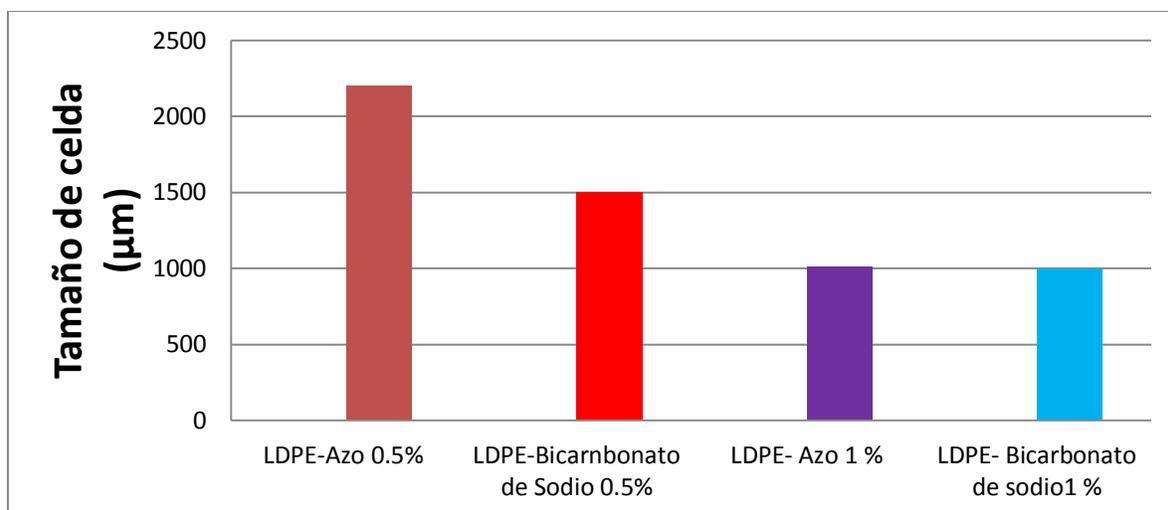


Figura 3.8 LDPE Bicarbonato de sodio 1%

Los tamaños de celda obtenidos se presentan en la **Tabla 3.8** y **Gráfica 3.7** respectivamente.

**Tabla 3.8** Tamaño de celda obtenida en espumas de polietileno de baja densidad (LDPE)

No. De la muestra (% en peso)	Tamaño promedio de celda ( $\mu\text{m}$ )
LDPE- Azodicarbonamida 0.5 %	2200
LDPE-Bicarbonato de Sodio 0.5%	1500
LDPE- Azodicarbonamida 1 %	1000
LDPE-Bicarbonato de Sodio 1%	1000



**Gráfica 3.7 Tamaño de celda en espumas de polietileno de baja densidad (LDPE).**

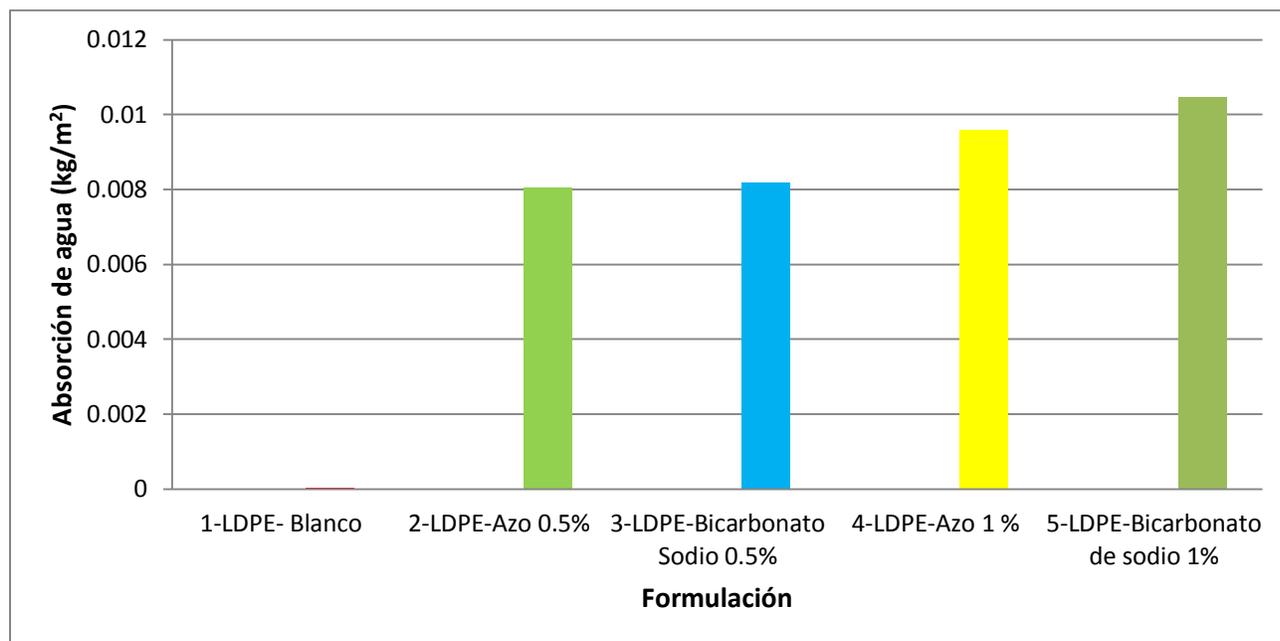
De acuerdo de los resultados de la prueba de microscopía, al agregar 0.5 % de agente espumante se puede notar (gráfica 3.7) que si hay una variación significativa en el tamaño de celda. La azodicarbonamida presentó una celda mayor que la del bicarbonato de sodio, sin embargo al agregar 1 % de del agente espumante estos ya no tuvieron variación en el tamaño de celda, infiriendo que al agregar 1% de agente se espumante homogeneizó esta característica en la espuma.

### 3.2.4 ABSORCIÓN DE AGUA

Los resultados de la prueba de absorción de agua se muestran en la **Tabla 3.9** y **Gráfica 3.8**

**Tabla 3.9 Resultados obtenidos de absorción de agua del espumado de LDPE.**

Nombre de la Muestra (% en Peso)	Absorción de agua kg/m <sup>2</sup>	Desviación estándar (kg/m <sup>2</sup> )	Desviación estándar (%)
<b>LDPE-Blanco</b>	0.00002	0.0000012	6.0%
LDPE- Azodicarbonamida 0.5 %	0.00805	0.0001237	1.5%
LDPE-Bicarbonato de Sodio 0.5%	0.00817	0.0000968	1.2%
LDPE- Azodicarbonamida 1 %	0.00958	0.0000857	0.9%
LDPE-Bicarbonato de Sodio 1%	0.01048	0.00096531	9.2%



**Gráfica 3.8 Absorción de agua del espumado de LDPE.**

Como puede observarse, al agregar 0.5% de agente espumante no hay diferencia en esta propiedad, las dos espumas absorben cantidades similares de agua. Sin embargo al agregar 1% de agente espumante si se puede notar variación: el espumado con azodicarbonamida absorbe menor cantidad de agua, en comparación con el espumado de bicarbonato de sodio. Esto puede deberse a que el bicarbonato genera un espuma más hidrófila con respecto a la azodicarbonamida.

### **3.2.5 RESULTADOS DEL ESPUMADO DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE) Y ANÁLISIS.**

En la **Tabla 3.10** se muestran en resumen los resultados de las pruebas de caracterización para el espumado de LDPE.

**Tabla 3.10 Análisis de resultados del espumado de polietileno de baja densidad (LDPE)**

<b>Muestra (% en peso)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Deformación por compresión (mm)</b>	<b>Microscopia (μ)</b>	<b>Abs. de agua (kg/m<sup>2</sup>)</b>
Blanco	0.7867	0.25583	-----	0.00002
Azo 0.5 %	0.6341	0.20096	2200	0.00805
NaHCO <sub>3</sub> 0.5 %	0.6378	0.18676	1500	0.00817
<b>Azo 1 %</b>	<b>0.4406</b>	<b>0.28571</b>	<b>1000</b>	<b>0.00958</b>
NaHCO <sub>3</sub> 1 %	0.4241	0.29423	1000	0.01048

**Espumado de polietileno de baja densidad LDPE 0.5% de agente espumante.**

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el espumado de polietileno de baja densidad (LDPE) se puede resumir que al agregar 0.5% del agente espumante a la formulación, no se crean celdas homogéneas ni uniformes, como se puede observar en las **Figuras (3.5 y 3.6)** del tercer capítulo). Lo anterior se puede deber a que no es suficiente el agente espumante agregado en la formulación, provocando que en ciertas partes del espécimen no genere ninguna celda, por lo que esto se ve reflejado en sus propiedades mecánicas.

Al realizar la prueba de compresión, no existe una variación considerable entre las dos agentes espumantes, en la prueba de densidad las dos formulaciones obtuvieron un valor de 0.63 g/cm<sup>3</sup> lo que reafirma que dentro del espécimen no se generó la espuma suficiente para disminuir dicha propiedad.

### **Espumado de polietileno de baja densidad LDPE 1% de agente espumante.**

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el espumado de polietileno de baja densidad LDPE con 1% de agente espumante se analiza que las celdas son más homogéneas en las dos formulaciones dando una microscopia de 1000µm en toda la área del espécimen como se puede observar en las **Figuras 3.7 y 3.8** de este mismo capítulo.

Al realizar la prueba de compresión esta obtuvo características similares entre ambos agentes espumantes lo que significa que se puede utilizar cualquiera de los dos tipos. La densidad de estas muestras se presenta entre 0.4 y 0.45g/cm<sup>3</sup> lo que confirma el mayor desempeño de los agentes espumantes logrando que los especímenes tuvieran más celdas internamente en comparación con las muestras espumadas con 0.5% de agente.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la formulación que obtuvo mayor área espumada dentro de los especímenes fue la de polietileno de baja densidad con 1% de bicarbonato de sodio pese a que la propuesta de la formulación de polietileno de baja densidad con 1% de azodicarbonamida es muy parecida en propiedades con la de bicarbonato de sodio. Se puede decir que utilizando cualquiera de los agentes espumantes se obtendrán resultados similares, la única ventaja que podría darse al bicarbonato de sodio es que es más comercial y tiene un costo menor en comparación con la azodicarbonamida.

### **3.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y COMPARACIÓN**

Para la inyección de los prototipos se optó por utilizar bicarbonato de sodio y azodicarbonamida como agentes espumantes, ya que la temperatura de descomposición que tienen los hace óptimos. En el caso del bicarbonato de sodio este material es comercial, fácil de adquirir y barato en costo, sin embargo para poder conseguir la azodicarbonamida tuvo que ser traída de Japón de la empresa Otzuka Chemical, quien donó este material para la investigación, ya que fue la única empresa encontrada que maneja azodicarbonamida con el rango de temperatura de descomposición de 150°C.

Los parámetros de proceso se condicionaron debido a que en la bibliografía encontrada, se mencionan las cantidades óptimas de agente espumante que debe llevar una espuma para ser evaluada, la presión a la que se fijó la máquina inyectora se debió a que si se aumenta la presión no se deja que reaccione el agente espumante, haciendo que se manipule el tamaño de celda pero en este proyecto uno de los objetivos fue verificar qué tamaño de celda se puede obtener y qué relación tiene con las propiedades mecánicas. El tiempo de enfriamiento fue muy largo ya que la pieza al espumar generaba una reacción de descomposición del agente espumante y al suceder esto generaba calor, si la probeta salía antes de tiempo podía suceder que se reventaron, por tal motivo se decidió fijar ese tiempo de enfriamiento [12].

Con los resultados obtenidos en los espumados de LDPE y EVA se realizó una comparación entre las mejores formulaciones, las cuales presentaron buenas propiedades mecánicas y físicas.

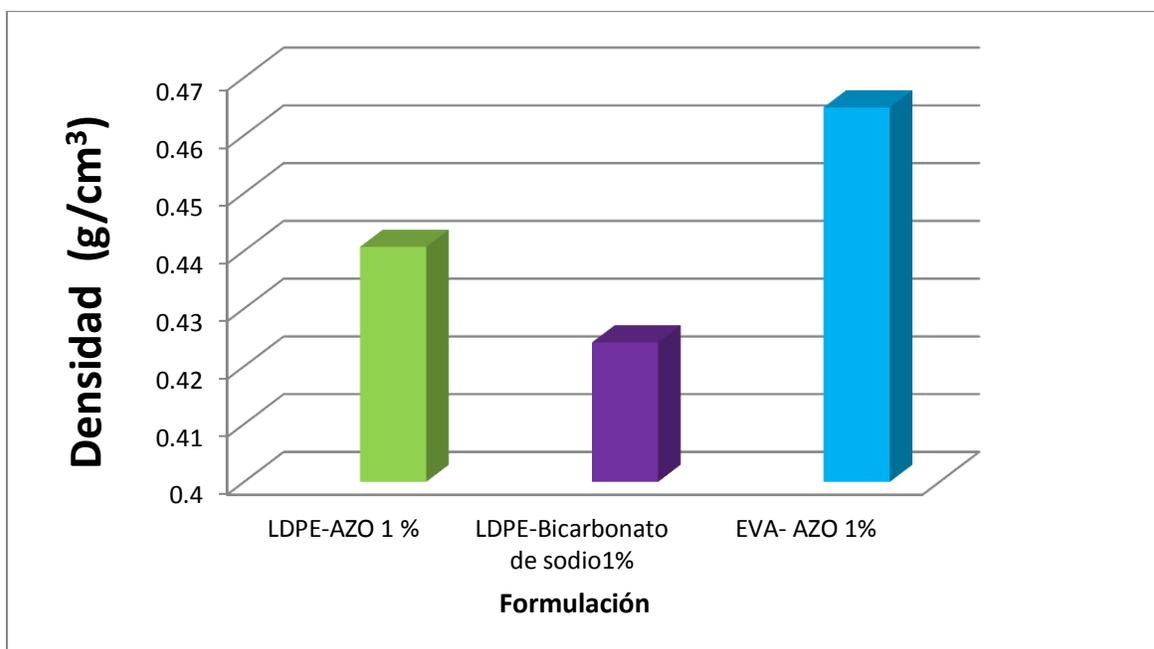
Las tres mejores formulaciones fueron:

- ✓ Polietileno de baja densidad (LDPE) con 1% de azodicarbonamida como agente espumante.
- ✓ Polietileno de baja densidad (LDPE) con 1% de bicarbonato de sodio como agente espumante.
- ✓ Etileno vinil acetato (EVA) con 1% de azodicarbonamida como agente espumante.

En la **Tabla 3.11** y **Gráfica 3.9** se presenta la comparación en los resultados obtenidos en la prueba de densidad.

**Tabla 3.11 Comparación de densidad de las mejores formulaciones de EVA y LDPE.**

No. De la muestra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
LDPE-AZO 1 %	0.44069
LDPE-Bicarbonato de sodio1%	0.424122
EVA- AZO 1%	0.464856



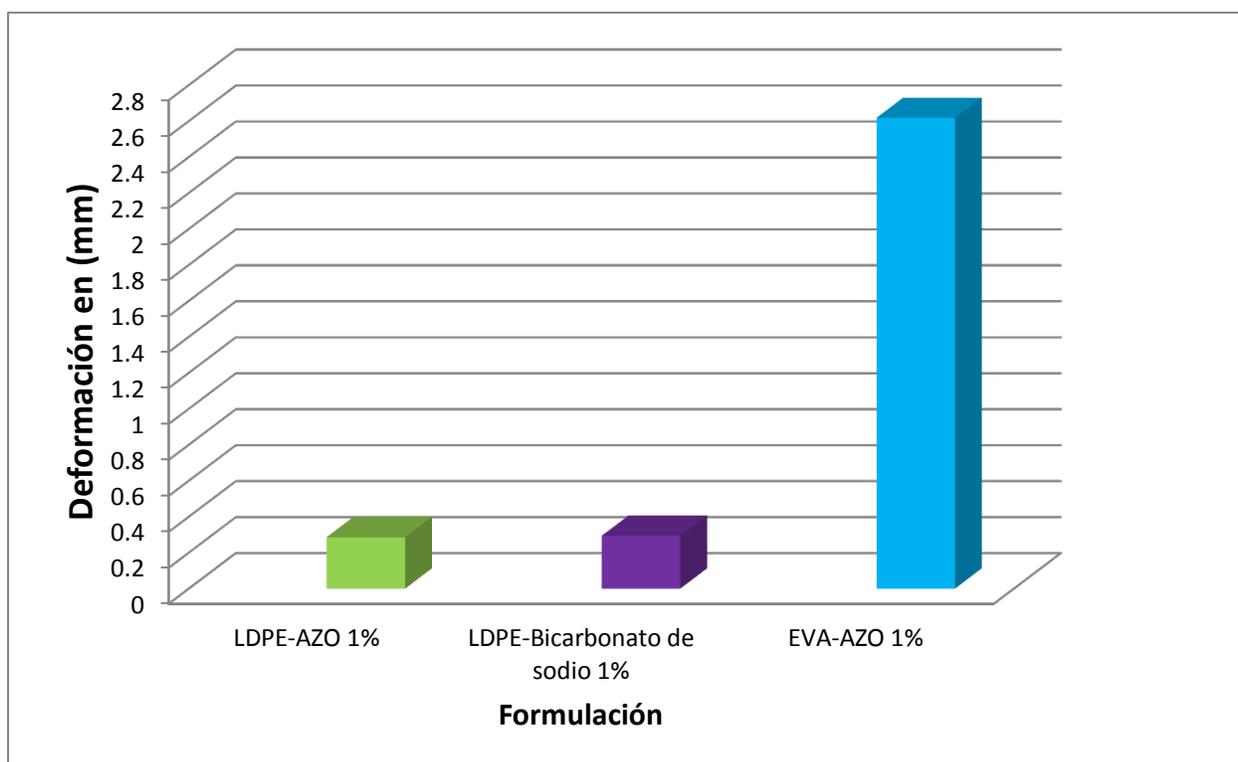
**Gráfica 3.9 Comparación de densidades de las mejores formulaciones de (EVA) y (LDPE).**

De acuerdo a la comparación de densidades la que obtiene mejores resultados es la muestra de LDPE con bicarbonato de sodio 1%.

En la **Tabla 3.12** y **Gráfica 3.10** se presenta los resultados de las tres mejores formulaciones en la prueba de compresión.

**Tabla 3.12 Comparación de deformación por compresión de las mejores formulaciones de (EVA) y (LDPE).**

Deformación por compresión en (mm) EVA	
Nombre de la muestra	mm
LDPE-AZO 1%	0.2857
LDPE-Bicarbonato de sodio 1%	0.2942
EVA-AZO 1%	2.6179



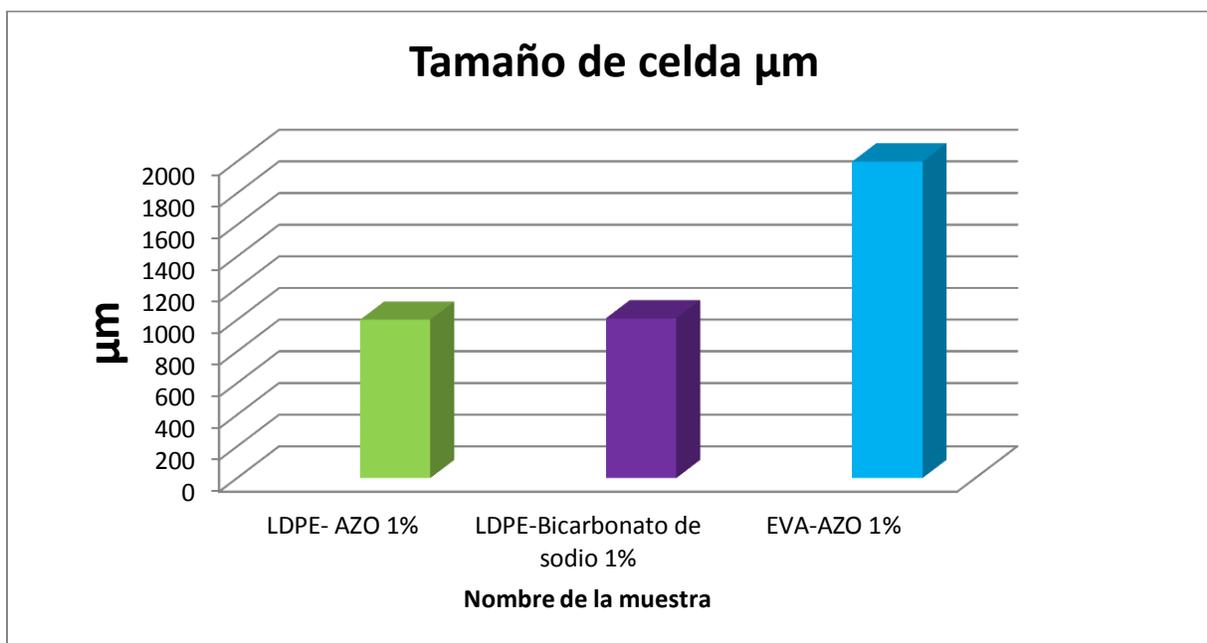
**Gráfica 3.10 Comparación de deformación por compresión de las mejores formulaciones de (EVA) y (LDPE).**

De acuerdo a la comparación realizada las formulaciones de polietileno con azodicarbonamida y bicarbonato de sodio tienen mejor resistencia a la compresión en comparación con la formulación de EVA.

En la **Tabla 3.13** y **Gráfica 3.11** se muestran los resultados de tamaño de celdas en las tres mejores formulaciones de LDPE y EVA.

**Tabla 3.13 Comparación de microscopía óptica de las mejores formulaciones de (EVA) y (LDPE).**

Microscopía óptica	
No. De la muestra	Media ( $\mu\text{m}$ )
LDPE- AZO 1%	1000
LDPE-Bicarbonato de sodio 1%	1010
EVA-AZO 1%	2000



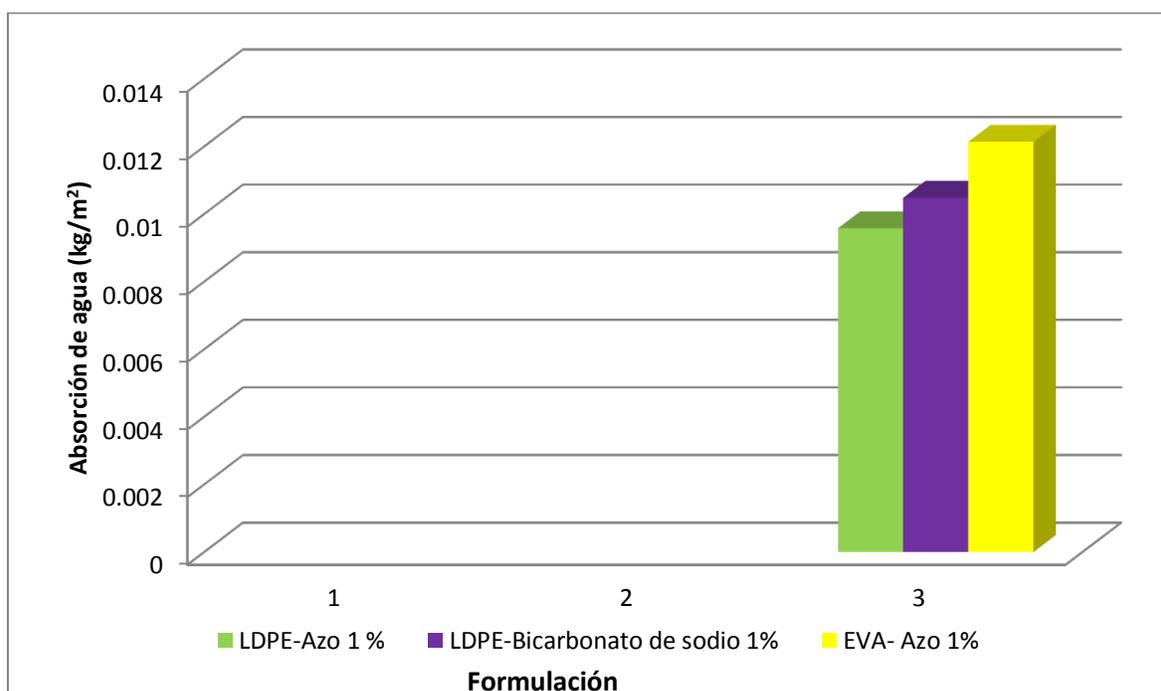
**Gráfica 3.11 Comparación de microscopía óptica de las mejores formulaciones de (EVA) y (LDPE).**

En base a la comparación realizada la formulación de EVA obtuvo mayor tamaño de celda en comparación con las muestras de LDPE, por lo que se infiere que a mayor tamaño de celda disminuyen las propiedades mecánicas de compresión, cabe mencionar que la azodicarbonamida y bicarbonato de sodio como agente espumante del polietileno de baja densidad obtuvieron resultados muy similares.

En la **Tabla 3.14** y **Gráfica 3.12** se muestra la comparación de resultados de las mejores formulaciones de EVA y LDPE para la prueba de absorción de agua.

**Tabla 3.14 Comparación de absorción de agua de las mejores formulaciones de (EVA) y (LDPE).**

Nombre de la Muestra	Absorción de agua (kg/m <sup>2</sup> )
LDPE-Azo 1 %	0.0095852
LDPE-Bicarbonato de sodio 1%	0.0104832
EVA- Azo 1%	0.0121391



**Gráfica 3.12 Comparación de absorción de agua de las mejores formulaciones de (EVA) y (LDPE).**

De acuerdo a la comparación realizada entre las tres mejores formulaciones, la muestra de **POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD CON 1 % DE AZODICARBONAMIDA** presenta las mejores propiedades físicas y mecánicas, sin embargo la formulación de **POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD CON 1 % DE BICARBONATO DE SODIO** también es buena propuesta como espuma, ya que las propiedades mecánicas fueron semejantes. El espumado de etileno vinil acetato

presento buenas propiedades de compresión pero fueron menores que el espumado de LDPE.

Este tipo de espuma obtuvo mayor tamaño de celda, ocasionando que disminuyan sus propiedades de compresión, sin embargo una vez comprimida la muestra esta tiende a recuperar su forma casi original, en comparación con las espumas de polietileno de baja densidad las cuales una vez deformada la probeta ya no recuperan su tamaño inicial.

# CAPITULO IV CONCLUSIONES

## 4.1 CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se concluye que:

- ✓ Las formulaciones que obtuvieron las mejores propiedades empleando los agentes espumantes de prueba en la resina de polietileno fueron: LDPE con 1% de azodicarbonamida y LDPE con 1% de bicarbonato de sodio.
- ✓ La formulación que obtuvo las mejores propiedades empleando los agentes espumantes de prueba en la resina de etileno vinil acetato fue: EVA con 1% de bicarbonato de sodio.
- ✓ La espuma que obtuvo la mejor densidad fue la de LDPE – bicarbonato de sodio 1% en comparación con las demás formulaciones de espumado de LDPE.
- ✓ Las formulaciones de LDPE azodicarbonamida y bicarbonato de sodio tienen mejor resistencia a la compresión en comparación con las de EVA.
- ✓ La formulación de EVA presenta mayor tamaño de celda que la de LDPE por lo que a mayor tamaño de celda menores propiedades mecánicas de compresión presentan.
- ✓ El espumado de EVA presento mayor absorción de agua en comparación con las de LDPE.
- ✓ Las formulaciones de LDPE con bicarbonato de sodio mostraron mayor absorción de agua en comparación con las de LDPE con azodicarbonamida.
- ✓ La inyección de las probetas se realizó a una temperatura de procesamiento de 150°C.
- ✓ El proceso de inyección de las probetas de EVA no es estable por lo que se recomienda utilizar un agente reticulante.
- ✓ En base al costo de los agentes espumantes, para el uso en LDPE se propone usar bicarbonato de sodio ya que es más comercial y barato en costo.

- ✓ Este tipo de espuma se recomienda que puede ser utilizado como relleno de perfiles para estantería, relleno en tarimas o cajas, extrusión de perfiles para elaboración de muebles.

## Referencias

- [1] Lou Kattas, Fred Gastrock, Inessa Levin, Allison Cacciatore, "Plastic Additives, Modern Plastics Handbook", 2004, PP.[ 4.19-4.23].
- [2] Charles. A Harper and Edward M. Petrie, A John Wiley & Sons, "Plastics Materials and Processes A Concise Encyclopedia", Publication, 2003, pp.[170-200].
- [3] María Cinta Vincet Vela, Silvia Álvarez Blanco, José Luis Zaragoza Carbonell, "Ciencia y tecnología de polímeros", Edit. de la UPV, Reproval S.C Universidad Politécnica de Valencia, 2006, pp. [9-20].
- [4] Marcelo G. Almeida, Renan Demori, Ademir J. Zattera, Mara Zeni, "Mechanical properties of foams comprising virgin and waste polyethylene", Polymer Bulletin, December 2007, Vol. 59, pp [677-683].
- [5] M.A. Rodríguez-PérezCorrespondin, J.I. González-Peña, J.A. de Saja, "Anisotropic and heterogeneous thermal expansion of polyethylene foam blocks: Effect of thermal treatments, European Polymer Journal Vol. 43, Issue 10, October 2007, pp.[ 4474–4485].
- [6] Y. Shiina, Y. Hamamoto and K. Okumura, "Fracture of soft cellular solids Case of non-crosslinked polyethylene foam", Europhys Lett Vol. 76 Number 4, 2006.
- [7] Marcelo G. Almeida, Renan Demori, Ademir J. Zattera, Mara Zeni, "Mechanical properties of foams comprising virgin and waste polyethylene", Polymer Bulletin December 2007, Vol. 59, Issue 5, pp [677-683].
- [8] Shigehiko Abe, Masayuki Yamaguchi, Journal of Applied Polymer Science, " Study on the foaming of crosslinked polyethylene", Vol. 79, Issue 12, 2001, pp [2146–2155].
- [9] M. Davari, M. K. Razavi Aghjeh, S. M. Seraji, " Relationship between the cell structure and mechanical properties of chemically crosslinked polyethylene foams", Journal of Applied Polymer Science, Volume 124, Issue 4, 2012, pp.[ 2789–2797].

[10] A. Marcilla, J.C. García Quesada, R. Ruiz-Femenia, M.I. Beltrán, " Crosslinking of rotational molding foams of polyethylene", Polymer Engineering & Science, Volume 47, Issue 11, 2007 pp.[ 1804–1812].

[11] J. Sempere A., Estudio de los procesos de reticulado, espumado y descomposición térmica de formulaciones industriales de copolímeros de EVA y PE: Métodos cinéticos, 2002, pp. [268-361].

[12] Yaolin Zhang, Denis Rodrigue, Abdellatif Ait-Kadi, High-Density Polyethylene Foams. I. Polymer and Foam Characterization, Europhys Lett Vol.18, February 2003, pp [236-242].

[13] ASTM-D3575, Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials Made From Olefin, June 2001, pp. [1-9].

[14] ASTM-D792, Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, June 2007, pp. [1-6].

[15] Marcelo G. Almeida, Renan Demori, Ademir J. Zattera, Mara Zeni, Morphological Analysis of Polyethylene Foams with Post-use Material Incorporated, Europhys Lett, 9 February 2007, pp. [252-263]

[16] Marcelo G. Almeida, Renan Demori, Ademir J. Zattera, Mara Zeni, Mechanical properties of foams comprising virgin and waste polyethylene, Europhys Lett, 8 July 2007, pp. [180-220].

[17] Wei Wang, Weiguang Gong, Preparation of Low-Density Polyethylene Foams with High Rebound Resilience by Blending with Polyethylene–Octylene Elastomer, July 2013, pp. [150-210].

[18] M.R. Thompson, X. Qin, G. Zhang, A. N. Hrymak, Aspects of Foaming a Glass-Reinforced Polypropylene with Chemical Blowing Agents, 6 May 2006, pp [4770].

[19] Jian-Feng Zhang, Xiuzhi Sun, Biodegradable Foams of Poly(lactic acid)/Starch. I. Extrusion Condition and Cellular Size Distribution, 6 April 2007, pp [858-862].

[20] M. A. Rodriguez Perez, A. Duijsens, Effect of Addition of EVA on the Technical Properties of Extruded Foam Profiles of Low-Density Polyethylene/EVA Blends, October 1997, pp [1237-1244].

