



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**FACULTAD DE BIOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL**

**Reciclaje de Poliestireno Expandido (EPS) para el desarrollo de  
productos de alto valor agregado**

**TESIS**

**Para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Presenta:**

**José Eduardo Hernández Razo  
Ingeniero Civil**

**Director de Tesis:  
Dr. Ezequiel García Rodríguez**

**Co-Director de Tesis:  
Dr. José Carlos Rubio Avalos.**

**Morelia, Michoacán, de Diciembre de 2018.**

## **AGRADECIMIENTOS.**

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Programa de Maestría de en Ciencias en Ingeniería Ambiental.

Facultad de Ingeniería Civil.

Dr. Ezequiel García Rodríguez.

Dr. José Carlos Rubio Avalos.

Dr. Luis Ochoa Franco.

Dra. Ma. del Carmen Chávez Parga.

Dra. María Alcalá De Jesús.

Arq. Cyntia Nayeli Miranda Rodríguez.

## **DEDICATORIA.**

Dedicada a todas aquellas personas que hicieron posible la culminación de la presente investigación.

## **RESUMEN.**

El reciclaje de los residuos de Poliestireno Expandido (EPS) es una medida de acción en beneficio del medio ambiente y de los seres vivos, incluidas las personas.

La exploración de algunos productos orgánicos líquidos para disolver EPS es parte fundamental, identificando las características aportadas en muestras solvente/Poliestireno. Las muestras que presentan características parcialmente favorables son aplicadas en forma de película sobre diversos sustratos para su evaluación cualitativa ante diversas exposiciones.

En la búsqueda del mejor solvente el uso de cargas minerales inorgánicas de tamaño de partícula nanométrico y de micras limita la propagación de fractura en la matriz de Poliestireno, reduciendo el espesor y la profundidad. La estabilidad dimensional de las películas, dureza, fragilidad y mayor resistencia a la explosión de rayos UV son factores apreciables en las películas desarrolladas.

La selección del solvente con las mejores características conferidas al producto y la adición de cargas minerales son previos al desarrollo de materiales de alto valor agregado. El Adhesivo, las pinturas, los estucos y los paneles tipo sándwich, son los cuatro productos de alto valor agregado obtenidos en esta investigación.

**Reciclaje – Poliestireno – Películas – Minerales - Productos.**

## **ABSTRACT.**

The recycling of Expanded Polystyrene (EPS) waste is a measure of action for the benefit of the environment and of living beings, including people.

The exploration of some liquid organic products to dissolve EPS is a fundamental part, identifying the characteristics provided in solvent/Polystyrene samples. The samples that present partially favorable characteristics are applied in the form of a film on various substrates for their qualitative evaluation before various exposures.

In the search for the best solvent the use of inorganic mineral charges of nanometric particle size and micron limits the fracture propagation in the polystyrene matrix, reducing thickness and depth. The dimensional stability of the films, hardness, fragility and greater resistance to the explosion of UV rays are appreciable factors in the films developed.

The selection of the solvent with the best characteristics conferred to the product and the addition of mineral charges are prior to the development of materials of high added value. Adhesive, paints, stuccos and sandwich panels are the four products with high added value obtained in this research.

**Recycling - Polystyrene - Films - Minerals - Products.**

## ÍNDICE.

ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Situación global.....	1
1.2 Situación en México.....	1
1.3 Residuos plásticos.....	5
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1 Clasificación de los polímeros.....	7
2.1.1 Polímeros termoplásticos.....	7
2.1.2 Polímeros termoestables.....	7
2.1.3 Polímeros elastómeros.....	8
2.2 Estructura del Poliestireno.....	8
2.3 Aspectos históricos del Poliestireno.....	8
2.4 Clasificación de los polímeros de Poliestireno.....	9
2.5 Producción industrial de resinas de Poliestireno y Poliestireno de alto impacto.....	9
2.5.1 La polimerización en masa.....	10
2.5.2 Polimerización en suspensión.....	10
2.6 Propiedades químicas y físicas de las resinas de Poliestireno.....	10
2.6.1 Propiedades químicas.....	10
2.6.2 Propiedades físicas y de procesamiento.....	11
2.7 Productores en el mundo de resinas de Poliestireno y Poliestireno de alto impacto.....	12
2.8. Proceso de fabricación y producción de productos de	

<b>Poliestireno Expandido (EPS)</b> .....	12
<b>2.9. Propiedades del EPS</b> .....	13
<b>2.10 Impacto ambiental en el proceso de fabricación del Poliestireno</b> .....	13
<b>2.11 Reciclaje del Poliestireno</b> .....	15
<b>2.11.1 Reciclaje químico</b> .....	15
<b>2.11.2 Reciclaje térmico</b> .....	15
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	16
<b>3.1 Investigaciones de Poliestireno</b> .....	16
<b>3.1.1 Uso de Poliestireno sin cargas minerales</b> .....	16
<b>3.1.2 Uso del Poliestireno con cargas minerales</b> .....	17
<b>3.2 Instituciones educativas enfocadas al reciclaje del EPS</b> .....	21
<b>3.3 Empresas mexicanas dedicadas al reciclaje del EPS</b> .....	21
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	23
<b>5. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</b> .....	25
<b>5.1 Hipótesis</b> .....	25
<b>5.2. Objetivos</b> .....	25
<b>5.2.1 Objetivo general</b> .....	25
<b>5.2.2 Objetivo particular</b> .....	25
<b>6. DISEÑO EXPERIMENTAL</b> .....	26
<b>6.1 Diagrama de flujo</b> .....	26
<b>6.2 Metodología</b> .....	27
<b>6.3 Desarrollo Experimental</b> .....	28
<b>6.3.1 Materiales y equipo</b> .....	28
<b>6.3.2 Aspectos importantes</b> .....	30
<b>6.3.3 Preliminares al reciclaje del Poliestireno Expandido (EPS)</b> .....	30

6.3.4. Exploración solventes-EPS. Determinación del porcentaje máximo y óptimo de disolución de EPS y adición de nano partículas de sílice. ....	31
6.3.5. Exploración solventes-EPS. Adición de nano sílice y marmolina al por ciento máximo y óptimo de disolución de EPS.....	44
6.3.6. Desarrollo de materiales de alto valor agregado. ....	49
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....	64
7.1. Exploración de solventes-EPS.....	64
7.2. Desarrollo de materiales de alto valor agregado. ....	69
8. CONCLUSIÓN. ....	74
9. REFERENCIAS.....	75
10. ANEXOS. ....	80

## ÍNDICE DE CUADROS.

Cuadro 1. Productos de uso común y residuos peligrosos generados.....	4
Cuadro 2. Resultados de las probetas del bloque A. ....	52
Cuadro 3. Resultados de las probetas del bloque B. ....	53
Cuadro 4. Resultados de las probetas del bloque C. ....	54
Cuadro 5. Resultados de las probetas del bloque D. ....	55
Cuadro 6. Resultados de las probetas del bloque E. ....	56
Cuadro 7. Propiedades físicas de resinas de Poliestireno (PS) y Poliestireno de Alto Impacto (HIPS).....	80
Cuadro 8. Resinas de Poliestireno. ....	81
Cuadro 9. Cantidades totales de PAHs identificados en la combustión del Poliestireno .....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Depósito parcial de residuos sólidos generados en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. ....	5
Figura 2. Simbología y significado de los plásticos. Reciclaje Rahue. ....	5
Figura 3. Enlace estructural del poliestireno puro .....	8
Figura 4. Diagrama de cambio en la microestructura de una grieta a medida que esta crece. Caso de un material de poliestireno.....	19
Figura 5. Estructura de un agrietamiento cercano al extremo de una fisura de un material de poliestireno. ....	19
Figura 6. Diagrama de flujo diseño experimental. ....	26
Figura 7. Actividades previas al reciclado de EPS. ....	31
Figura 8. Sustancias orgánicas sin poder de disolución de EPS.....	31
Figura 9. Producto de la disolución de Thinner Estándar COMEX/EPS al por ciento máximo. ....	32
Figura 10. Producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS.....	33
Figura 11. Películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos.....	34

Figura 12. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos expuestos a intemperie.....	34
Figura 13. Películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino.....	35
Figura 14. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino expuestos a intemperie.....	35
Figura 15. Películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de polietileno.....	36
Figura 16. Pastilla polimerizada producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS. ....	37
Figura 17. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos.. ....	37
Figura 18. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos expuestos a intemperie.....	38
Figura 19. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino. ...	39
Figura 20. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino expuestos a intemperie.....	39
Figura 21. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de polietileno.. ....	40
Figura 22. Producto de la disolución de Tolueno/EPS. ....	40
Figura 23. Películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos.. ....	41
Figura 24. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos expuestos a intemperie.....	42

Figura 25. Películas del producto de la disolución de Tolueno /EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino..	42
Figura 26. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino expuestos a intemperie.....	43
Figura 27. Películas del producto de la disolución de Tolueno /EPS adición de nanosílice sobre sustratos de polietileno. ....	43
Figura 28. Producto de disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice y marmolina.....	45
Figura 29. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos cerámicos.....	45
Figura 30. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos de triplay de pino..	46
Figura 31. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos de polietileno..	46
Figura 32. Producto de disolución de EPS/Tolueno adición de cargas de nanosílice y marmolina.....	47
Figura 33. Películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos cerámicos.....	48
Figura 34. Películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos de triplay de pino.....	48
Figura 35. Películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos de polietileno..	49
Figura 36. Especificaciones para probetas sujetas a flexión según la Norma Mexicana NMX-C-191-ONNCCE-2004.....	51
Figura 37. Probetas del bloque A sujetas a flexión estática..	52
Figura 38. Probetas del bloque B sujetas a flexión estática. ....	53
Figura 39. Probetas del bloque C sujetas a flexión estática.....	54

Figura 40. Probetas del bloque D sujetas a flexión estática.....	55
Figura 41. Probetas del bloque E sujetas a flexión estática.....	56
Figura 42. Esfuerzo de Flexión vs Deformación.....	57
Figura 43. Adhesivo en estado fresco en probetas de monitoreo.....	57
Figura 44. Estucos en variedad de colores sobre triplay de pino.....	59
Figura 45. Defectos del estuco con el 10% de pigmento sobre matriz de triplay de pino.....	59
Figura 46. Pinturas en variedad de colores sobre triplay de pino.....	60
Figura 47. Defectos de la pintura blanca con el 10% de pigmento.....	61
Figura 48. Muros tipo sándwich.....	62
Figura 49. Defectos de los muros tipo sándwich.....	63

# 1. INTRODUCCIÓN.

## 1.1 Situación global.

A nivel mundial la población tiene un crecimiento en orden exponencial. Para el año 1999 se estimaba que la población era de 6000 millones, para 2015 aumentaba a 7300 millones y para 2030 se espera llegar a los 8,300 millones (Naciones Unidas, 2015).

El crecimiento poblacional se ve acompañado de un aumento en la demanda de servicios y productos de consumo, por ende los residuos tanto líquidos como sólidos presentan un comportamiento similar en muchos países del mundo.

A lo largo del tiempo, el suelo ha sido utilizado para depositar los residuos. La mayor parte de los esfuerzos en la protección ambiental se han abocado a limpiar el aire y el agua así como a evitar que se sigan contaminando, esto porque su relación con los problemas a la salud de la población es más directa. Sin embargo, no se deben descuidar los aspectos de contaminación del suelo, porque estos amenazan no solo a los usos futuros del suelo mismo, sino a la calidad de aire circundante, al agua superficial y al agua subterránea, ya que los contaminantes en la superficie de la tierra se transportan hacia el aire, como las bacterias o virus que se propagan en el aire en los tiraderos a cielo abierto. Si un relleno sanitario no cumple con las características idóneas de diseño puede provocar que los lixiviados se transfieran hacia el agua subterránea” (Henry & Heinke, 1999).

## 1.2 Situación en México.

En México para el año de 1950 se estimaban 25 791 017 habitantes, para 1990 aumento a 81 249 645, en el 2000 era de 97 483 412, en 2010 con 112 336 538 y para 2015 se estimaban 119 938 473 habitantes (INEGI, 2015).

Para el año 2017 en nuestro país se generaron 102 895 t d<sup>-1</sup> de residuos sólidos urbanos (RSU)<sup>1</sup>, de los cuales se recolecta el 83.9%, el 74.3% se lleva a sitios de

---

<sup>1</sup> Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), los residuos sólidos urbanos son los residuos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación

disposición final, reciclando únicamente el 9.6% de los residuos generados. Mientras que en el país se tiene un manejo básico de recolección, disposición final y bajo reciclaje de los residuos sólidos urbanos, en otros países como Suiza, Países Bajos, Alemania, Bélgica, Austria y Dinamarca que solo llevan a sus rellenos sanitarios el 5% de los residuos (SEMARNAT, 2017).

Aunque no se cuenta con información actualizada y específica sobre cifras de los grupos y productos que integran a los residuos sólidos urbanos en nuestro país, a continuación se presentan datos relacionados con tal rubro.

En base al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el año 2013 la composición de los residuos sólidos urbanos son: residuos orgánicos 52.4%, papel y cartón 13.8%, plástico 10.9%, vidrio 5.9%, metales 3.4%, textiles 1.4% y otros materiales 12.1%. Mientras que la disposición final de los residuos sólidos urbanos recolectados en el mismo año se distribuyen: rellenos sanitarios 66.4%, tiraderos a cielo abierto 20.3%, rellenos de tierra controlados 8.1% y reciclaje 5.2% (INEGI, 2017).

El manejo integral y disposición final de los residuos sólidos urbanos aún presenta un panorama complejo para llegar a un punto mínimo o nulo de contaminación sobre los medios naturales. La contaminación de un medio natural está íntimamente relacionada con otros medios y por tanto, se pone en riesgo la salud de los seres vivos.

Si bien es cierto que la mayoría de los rellenos sanitarios y los rellenos de tierra controlados funcionan a tiempo actual con deficiencias, los tiraderos a cielo abierto son aún más un problema en potencia para la salud pública y de los demás seres vivos por no contar con ningún tipo de regulación. Estos tres esquemas de disposición de los RSU contribuyen a la contaminación de los diversos medios naturales.

---

de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole.

La máxima autoridad en materia de residuos es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), sustentada por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Esta ley clasifica a los residuos sólidos en tres grupos: residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial<sup>2</sup> y residuos peligrosos<sup>3</sup> (Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, 2018).

La generación de los residuos tiene una responsabilidad compartida y según la LGPGIR tenemos que:

*“Los residuos generados tienen responsabilidad compartida tanto de los productores, importadores, exportadores, comercializadores, consumidores, empresas de servicios de manejo de residuos y de las autoridades de los tres órdenes de gobierno, según sea el tipo de residuo. El gobierno en conjunto con los demás actores son fundamentales para lograr que el manejo integral de los residuos sea ambientalmente eficiente, tecnológicamente viable y económicamente factible”.*

Comúnmente los RSU son residuos considerados como de manejo especial y peligroso. La importancia de contar con un sistema de manejo integral y disposición adecuada de los residuos cobra un sentido, ya que la diversidad de estos residuos genera otros residuos de carácter peligroso como lo muestra el Cuadro 1 (Arellano Díaz & Guzmán Pantoja, 2011).

---

<sup>2</sup> Los residuos de manejo especial son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

<sup>3</sup> Los residuos peligrosos son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley.

Cuadro 1. Productos de uso común y residuos peligrosos generados (John Wiley and Sons 2011 citado en Javier Arellano Díaz & Jaime Eduardo Guzmán Pantoja).

Producto	Residuo peligroso generado
Plásticos	Compuestos órgano-clorado, solventes orgánicos
Plaguicidas	Compuestos órgano-clorado, compuesto órgano-fosforado
Medicinas	Solventes orgánicos, metales pesados (zinc y mercurio)
Pinturas	Metales pesados, pigmentos, solventes, residuos orgánicos
Productos del petróleo	Aceite, fenoles, metales pesados, amoníaco, sales ácidas y cáusticas
Metales	Metales pesados, fluoruros, cianuros, solventes, pigmentos, abrasivos, sales de plata, aceites, fenoles
Artículos de cuero o piel natural	Metales pesados, solventes orgánicos

Los residuos sólidos de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo están integrados por toda la gama de los residuos incluyendo aquellos de manejo especial como los productos de la demolición, como se muestra en la Figura 1. En los depósitos generales se destaca la presencia de residuos poco valorados en el mercado del reciclaje, tal es el caso de EPS, bolsas de polietileno y materia orgánica, entre los más abundantes.



Figura 1. Depósito parcial de residuos sólidos generados en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

### 1.3 Residuos plásticos.

Los materiales plásticos representan un gran porcentaje en volumen de los RSU y forman parte de los polímeros<sup>4</sup>. Este grupo está integrado por una variedad de resinas, las cuales en cada producto se debe contener como la codificación de reciclaje. Esta codificación consta de un triángulo de flechas indicativo de reciclaje, dentro se encuentra la numeración correspondiente a la resina en cuestión y fuera del triángulo aparecen las siglas de la resina, tal como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Simbología y significado de los plásticos. Reciclaje Rahue.

<https://www.reciclaerahue.com/2016/11/14/los-pl%C3%A1sticos-y-su-simbolog%C3%ADa/>

Todos los residuos plásticos tienen la capacidad de ser reciclados, por lo menos hasta cierto número de ciclos sin perder sus propiedades físico-mecánicas. Existen limitantes para reciclar los plásticos y entre las más comunes son el no tener un lugar en el mercado y por ende no se cuenta con una valoración económica, siendo no atractivo para nuestra sociedad, terminando éstos en el mejor de los casos en

<sup>4</sup> Los polímeros son materiales sólidos o líquidos basados principalmente en carbono formando moléculas gigantes o macromoléculas en cadena de monómeros unidas por enlaces químicos covalentes.

rellenos sanitarios. Las ventajas del precio y calidad que ofrecen las resinas vírgenes contra las resinas recicladas son obstáculos. Mientras que la mezcla de todos los residuos complican aún más la estrategia de reutilización y reciclar.

La mejor manera de disminuir la generación de residuos es reduciendo el consumo de materias primas vírgenes utilizadas para la elaboración de productos de consumo e incrementado la reutilización y recuperación de material residual. Aunque el concepto es simple, para llevar a cabo este cambio en la sociedad moderna resulta extremadamente difícil (Henry & Heinke, 1999).

En la actualidad los residuos de Tereftalato de Polietileno (PET) se reciclan poco pero en mayor número a los residuos de Polipropileno (PP). Mientras que los residuos de Polietileno de Alta Densidad (HDPE), Cloruro de Polivinilo (PVC), Polietileno de Baja Densidad (LDPE), Poliestireno (PS) y otras resinas se reciclan poco o nulamente.

Promover el programa de las 3R's (reducir, reutilizar y reciclar) es una acción en pro del medio ambiente, incluyendo los recursos naturales y los seres vivos. Estas medidas no solucionan el problema existente, pero si ayuda a su minimización.

Para nuestro caso, abordaremos los residuos de Poliestrieno Expandido (EPS), conocido también como espumas de UNICEL<sup>R</sup> o simplemente UNICEL<sup>R</sup>, resaltando sus propiedades para obtener productos de alto valor agregado a partir del reciclaje.

## **2. MARCO TEÓRICO.**

### **2.1 Clasificación de los polímeros.**

En general, los polímeros se pueden clasificar en tres formas: primero según la forma en que sus moléculas son sintetizadas; segundo, en función de su estructura molecular; tercero, por su familia química. El método más usado para clasificar a los polímeros es en función a su comportamiento mecánico y térmico; termoplástico, termoestable y elastómero. Se sabe que los productos de plástico abarcan las clases de termoplástico, termoestable (Askeland & Phulé, 2004).

#### **2.1.1 Polímeros termoplásticos.**

Como lo menciona Askeland & Phulé (2004) los polímeros termoplásticos están formados de cadenas largas al unir monómeros mediante enlaces covalentes, con estructura cristalina o amorfa. Estos materiales se procesan en caliente y de la misma manera se pueden ablandar y fundir, de tal forma que se pueden reciclar por varios ciclos de manera fácil y sin perder propiedades físico-mecánicas. Estos materiales tienen un comportamiento plástico y dúctil. Este grupo está integrado por residuos a base de resinas de Poliestireno (PS), Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policloruro de Vinilo (PVC), Tereftalato de Polietileno (PET), el Polimetilmetacrilato (PMMA), el Teflón (Politetrafluoroetileno PTFE) y el Nailon (tipo de poliamida).

#### **2.1.2 Polímeros termoestables.**

Mientras que los polímeros termoestables o también llamados termofijos considerados así por Askeland & Phulé (2004), están constituidos de cadenas largas cruzadas formando estructuras tridimensionales por medio de enlaces covalentes. Estos materiales no son fáciles de reprocesar una vez que las reacciones de enlace cruzada han tenido lugar, de tal manera que al calentarlos se comienza con su desintegración, por ende su reciclaje es complejo. Estos materiales son más resistentes pero más frágiles. Algunos materiales que integran a este rubro son: poliuretanos, siliconas, resina epoxi, poliéster, melanina, caucho natural vulcanizado, baquelita, entre otros.

### 2.1.3 Polímeros elastómeros.

Los elastómeros también se les conocen como hule. Estos materiales pueden ser termoplásticos o termoestables, con cadenas poliméricas en forma de espiral, por tal razón se pueden estirar de manera reversible al aplicarles una fuerza alcanzando hasta un 200% de deformación. Los elastómeros termoplásticos tienen las características de procesamiento de los termoplásticos y el comportamiento elástico de los elastómeros. Algunos productos que componen a este grupo son: bandas elásticas, neumáticos de automóviles sellos O, mangueras y los aislamientos de los conductores eléctricos (Askeland & Phulé, 2004).

### 2.2 Estructura del Poliestireno.

Si bien la resina pura de poliestireno consta de una cadena lineal hidrocarbonada de monómeros de estireno como la unidad  $(C_8H_8)_n$ , el monómero de estireno consta de un anillo de benceno repetitivo a cada dos átomos de carbono, como se ilustra en la Figura 3 (Smith & Hashemi, 2006).

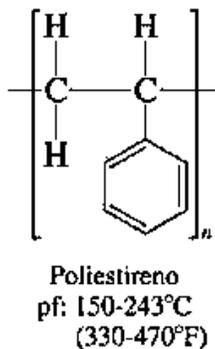


Figura 3. Enlace estructural del poliestireno puro (William F. Smith & Javad Hashemi, 2006)

### 2.3 Aspectos históricos del Poliestireno.

El estireno conocido como styrao fue aislado por primera vez en 1831 por Bonastre a partir de la resina del árbol ámbar. En 1839 Eduard Simon, quien también describió por primera vez el polímero, le dio el nombre de monómero. Observó que el estireno se convertía lentamente en una solución viscosa. Alrededor de 1925 comenzó el

desarrollo de un proceso de producción industrial para poliestireno; este trabajo alcanzó el éxito en las plantas de IG Farbenindustrie en Alemania en 1930. En los Estados Unidos, el poliestireno se produjo por primera vez a escala comercial en 1938 por Dow Chemical Company (Maul *et al.*, 2012).

#### **2.4 Clasificación de los polímeros de Poliestireno.**

Como lo ha escrito Maul *et al.*, (2012) los polímeros de poliestireno se pueden clasificar de acuerdo a su composición en poliestireno normal sin adiciones de refuerzo (GPPS o PS) y poliestireno de alto impacto (HIPS) con adiciones de refuerzo como el caucho. Los copolímeros son otra variante de los polímeros de estireno, siendo básicamente la unión de poliestireno con algún otro compuesto, tal es el caso de las resinas de Estireno - Acrilonitrilo (SAN) y acrilonitrilo - butadieno - estireno (ABS), entre otros.

#### **2.5 Producción industrial de resinas de Poliestireno y Poliestireno de alto impacto.**

La polimerización industrial está en constante desarrollo pero se pueden considerar que los métodos usados son: polimerización en masa, en solución, en suspensión y en emulsión (Smith & Hashemi, 2006).

El poliestireno normal (PS) y el poliestireno de alto impacto (HIPS) siguen mecanismos similares de producción industrial, tomando como rutas la polimerización en masa y polimerización en suspensión (Maul *et al.*, 2012).

Maul *et al.*, (2012) ha escrito que la materia prima es el estireno de pureza superior al 99.6%. La polimerización se da mediante un mecanismo de radicales libres, promoviendo el desarrollo en cadena o se puede usar monómero para tal efecto. El crecimiento de cadena se da en segundos y las masas moleculares se controlan principalmente por la temperatura de reacción, los agentes de transferencia de cadena, incluidos los disolventes, y por los iniciadores. De esta manera se pasa de estireno a poliestireno.

### **2.5.1 La polimerización en masa.**

Esta ruta consta de una serie de reactores donde la temperatura de operación está en el rango de 100-170 °C. En este proceso se agregan los aditivos necesarios para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas (color o estabilizadores). El último paso utiliza medios de extrusión y corte para obtener los pellets de resina. En este proceso la temperatura de reacción es un factor importante que determina las características del producto (Maul *et al.*, 2012).

### **2.5.2 Polimerización en suspensión.**

Según Maul *et al.*, (2012) este método es de uso principalmente para el desarrollo de partículas de espuma de poliestireno. Esta ruta comienza con la dispersión del estireno en agua en forma de pequeñas gotas mediante agitación. La adición de agentes de suspensión tales como polivinilpirrolidona, poli alcohol vinílico, fosfatos alcalinotérreos o celulosas es necesaria para estabilizar la fase orgánica. La polimerización debe iniciarse con formadores de radicales debido a que las temperaturas del proceso son considerablemente más bajas que las de la polimerización en masa continua (80-110 °C). Las perlas deben ser repeletadas después de la separación del agua y el secado.

## **2.6 Propiedades químicas y físicas de las resinas de Poliestireno.**

### **2.6.1 Propiedades químicas.**

Las propiedades químicas de los materiales de PS y HIPS son similares. Estos materiales son resistentes a soluciones ácidas, alcalinas y sal diluidas. La exposición a la radiación UV en presencia de oxígeno causa amarillamiento y fragilidad, particularmente en HIPS modificado con polibutadieno. Las reacciones en los dobles enlaces restantes provocan una pérdida gradual en las propiedades elásticas de los componentes blandos. Por lo tanto, el poliestireno no se usa generalmente en áreas de aplicación donde se requiere resistencia a la intemperie. Los aceites y las grasas producen agrietamiento por tensión. La temperatura de autoignición de PS y HIPS es de 490 °C. Los artículos de poliestireno generalmente se clasifican como moderadamente inflamables y como de combustión lenta (Maul *et al.*, 2012).

Un estudio reveló que el poliestireno es sensible cuando se le expone a rayos UV, de manera que las propiedades de producto son cambiantes según el tiempo sometido. Esta demostración consistió en diluir poliestireno y dispersar en su matriz un fotocatalizador de óxido de zinc de 0.1-0.5% y colorante. Los resultados fueron que el fotocatalizador absorbe energía UV, transmitiéndola a los enlaces de la matriz para conducir a la degradación. La adición de colorante produce un efecto sinérgico, ya que también puede actuar como un absorbente de UV y aporta con la escisión de la cadena principal del PS, siendo compatible con la matriz de polímero orgánico para proporcionar una mejor dispersión. La pérdida de masa del poliestireno modificado fue de 16 a 18%, dando la modificación de superficie dando mayor rugosidad después de la degradación. La pérdida de materiales en forma de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O precede a la rotura de la cadena principal de PS. Existe evidencia directa de la escisión de la cadena principal de PS y de que las propiedades mecánicas bajan, así como la elongación del material (Bandyopadhyay & Basak, 2007).

El termoplástico PS carece de cualquier tipo de grupos cromóforos y, por lo tanto, son sustancialmente estables en el medio ambiente (Bandyopadhyay & Basak, 2007).

### **2.6.2 Propiedades físicas y de procesamiento.**

El poliestireno puro es un material incoloro e insípido con tendencia a la fragilidad, facilidad de asociación con otro tipo de materiales y de procesado. En general tiene buena estabilidad dimensional y poco encogimiento en el molde (Smith & Hashemi, 2006).

El comportamiento mecánico y reológico de poliestireno se determina predominantemente por su masa molecular promedio (normalmente 150 000 -400 000). La orientación de las moléculas del polímero también determinan las propiedades mecánicas. Mientras que el poliestireno se disuelve en hidrocarburos aromáticos (tolueno, etilbenceno), hidrocarburos halogenados, éteres alifáticos (tetrahidrofurano), ésteres (acetato de etilo) y cetonas (butanona), pero no en hidrocarburos alifáticos (hexano) y alcoholes (metanol) (Maul *et al.*, 2012).

Las propiedades físicas de las resinas de poliestireno (PS) y poliestireno de alto impacto (HIPS) se pueden consultar en Anexos Cuadro 7.

### **2.7 Productores en el mundo de resinas de Poliestireno y Poliestireno de alto impacto.**

Los materiales de PS y HIPS son producidos por más de 100 fabricantes de materias primas en todo el mundo que ofrecen una amplia gama de productos clasificados según la resistencia, el comportamiento de procesamiento y la estabilidad dimensional cuando se los somete al calor. Para el año 2006 la capacidad instalada total para la producción de poliestireno es de aproximadamente  $15 \times 10^6$  t, de los cuales las resinas HIPS se producen en una cantidad de  $0.5 \times 10^6$  t (2006). Los productores más importantes en el mundo se ilustran en Anexos Cuadro 8 (Maul *et al.*, 2012).

### **2.8. Proceso de fabricación y producción de productos de Poliestireno Expandido (EPS).**

En la fabricación de espumas se pueden usar diversos agentes de soplado (agentes espumantes) para producir espumas. La selección del agente de soplado depende principalmente del material básico y del proceso de formación de espuma. Los agentes de expansión se pueden dividir en dos grupos principales, físicos y químicos. Los agentes de soplado físicos son generalmente gases comprimidos y líquidos volátiles tales como nitrógeno, dióxido de carbono, hidrocarburos, cetonas y alcoholes. Los agentes de soplado químicos comúnmente son materiales sólidos orgánicos o inorgánicos, que desarrollan gas por una reacción química o descomposición dentro de un rango de temperatura. El uso de agentes físicos es más recomendable para la elaboración de espumas (Doroudiani & Kortschot, 2003).

Los métodos para elaborar el poliestireno expandido (EPS) son diversos, aunque el más común es el de preparar resinas de Poliestireno (PS) por suspensión, a las que se ha incorporado un disolvente orgánico volátil, generalmente pentano. Durante la fase previa las perlas se calientan, lo que ocasiona un pre expansión de tres a cuatro veces el volumen, dando una perla de EPS de baja densidad. Por la acción de calor

inducido en moldes deseados las perlas expandidas se unen conjuntamente y se adopta la forma del molde (Ramírez, 2015).

Según Ramírez (2015) los productos de EPS en general están constituidos por 95% aire y 5% masa, por eso es que son tan voluminosos con poco peso y un precio bajo de adquisición, razón por la cual son abundantes en los residuos sólidos urbanos.

El consumo mundial de EPS supera los 3 millones de toneladas, con un aumento de aproximadamente 6% al año (Sekharan *et al.*, 2012a).

En México se estima que el 0.1% de los residuos urbanos son de EPS (Ramírez, 2015).

## **2.9. Propiedades del EPS.**

Los materiales de EPS poseen características particulares como peso ligero, flotabilidad, aislamiento térmico, estabilidad dimensional, resistencia química, propiedades eléctricas, higiene, bajo costo, persistente al medio ambiente y sensible a los rayos UV, flexibilidad moderada y algunos con buena resistencia al impacto (Sekharan *et al.*, 2012a).

## **2.10 Impacto ambiental en el proceso de fabricación del Poliestireno.**

La industria de fabricación de los productos a base de poliestireno es una fuente importante de emisiones de estireno a la atmosfera, quedando expuestos tanto sus trabajadores como la población circundante, situación alarmante por los posibles efectos sobre la salud pública.

Para el año de 1997 el inventario de emisiones tóxicas de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., indica que aproximadamente 24 000 t de estireno se liberan anualmente de fuentes locales y externas. Algunos autores han escrito sobre los efectos producidos en los humanos por exposiciones severas al estireno (más de 100 ppm en el aire), equivalente a la exposición de los trabajadores de la industria, concluyendo que no es un agente carcinogénico, no mutagénico, pero sí de poca toxicidad, aunque reversible. Algunos efectos sobre los humanos son depresión del

sistema nervioso central con síntomas que incluyen somnolencia, dolores de cabeza y alteración del equilibrio y por otro lado, visión del color comprometido (Cohen *et al.*, 2002).

El estireno y sus derivados tienen efectos tóxicos para el ser humano, ingresando por la vía respiratoria, la cutánea y la digestiva. Las personas expuestas a una concentración de 100 mg/kg presentan irritación en los ojos y fosas nasales y a 200 mg/kg se torna en conjuntivitis. La exposición crónica puede causar dermatitis en la piel. También se ha observado casos de cáncer en trabajadores relacionados con exposiciones prolongadas al estireno. Mientras que los hidrocarburos más importantes por su toxicidad son el benceno, el tolueno, xileno y los hidrocarburos polinucleares (Albert, 2008).

Como escribió Albert (2008) el benceno tiene efectos como depresión del sistema nervioso central, irritación cutánea y daño hematológico (acción cancerígena). El tolueno y el xileno tienen una acción similar al benceno. Los hidrocarburos polinucleares son de particular importancia porque muchos de ellos producen cáncer y mutaciones. Los derivados del antraceno (1,2-Benzantraceno) son poderos cancerígenos y si se le agregan moléculas de metilo, el efecto es aún más fuerte (7,12-Dimetilbenzantraceno, 3-metilcolantreno). El benzopireno y los derivados antes mencionados son una amenaza para el humano desarrollando cáncer de pulmón y de piel y algunos relacionados con cáncer en el estómago. La preocupación es que algunos de estos compuestos pueden estar presentes en alimentos y muchos otros en el aire por medio de evaporación de solventes y de la combustión incompleta de los materiales que los contienen.

En el año de 1984 ya se tenían identificados los compuestos emitidos a la atmosfera producto de la incineración controlada del poliestireno, en un rango de temperatura de 850 a 950 °C. La combustión es una fuente importante de emisión de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como se muestra en Anexos Cuadro 9. El hollín es otro residuo identificado de gran cantidad (Hawley-Fedder *et al.*, 1984).

Algunos medios de comunicación circulantes en EE. UU., como es el caso del periódico “New York Times”, en junio del año 2011 publicó información emitida por el gobierno sobre el uso de materiales comunes que presentan riesgo de cáncer. La sociedad en contacto con materiales a base de estireno tiene un bajo riesgo, pero las exposiciones a este compuesto en dosis altas como el caso de los trabajadores en la industria del estireno es preocupante. Los estudios de trabajadores expuestos a altos niveles de estireno han encontrado un mayor riesgo de leucemia y linfoma y daño genético a los glóbulos blancos. También hay cierta evidencia de que el estireno aumenta los riesgos de cáncer de páncreas y esófago entre los trabajadores de estireno, según el informe (Harris, 2011).

## **2.11 Reciclaje del Poliestireno.**

En general se pueden distinguir dos rutas para el reciclaje de materiales de PS, como el químico y el térmico.

### **2.11.1 Reciclaje químico.**

Dos procesos se encuentran en la etapa de desarrollo: pirolisis y escisión por hidrogenación. La pirolisis implica la escisión de moléculas de cadena larga a altas temperaturas (500-900 °C) con la exclusión de oxígeno. En la escisión por hidrogenación, las cadenas de polímero se rompen a mayor presión a aprox. 400 °C. Ambos procesos producen un espectro no específico de productos (60 - 80% de estireno y etilbenceno, respectivamente), que pueden usarse como materia prima para otros procesos petroquímicos (Maul *et al.*, 2012).

### **2.11.2 Reciclaje térmico.**

Esta ruta se da en presencia de suficiente oxígeno, el poliestireno se quema casi por completo para dar dióxido de carbono, agua y una pequeña cantidad de residuos de cenizas no tóxicas (Maul *et al.*, 2012).

### **3. ANTECEDENTES.**

#### **3.1 Investigaciones de Poliestireno.**

##### **3.1.1 Uso de Poliestireno sin cargas minerales.**

Para el año 2006 se demostró que los materiales de poliestireno pueden ser aprovechados y que son biodegradables usando dos etapas: medios térmicos y biológicos. Un ciclo de pirólisis (520° C) transforma al poliestireno en aceite de estireno, luego se da la conversión bacteriana del aceite de estireno a polihidroxialcanoato (PHA) por bacterias *Pseudomonas putida* CA-3 en cuatro ciclos. De 64 g de poliestireno reciclado se obtienen 6.4 g de PHA. Los PHA de longitud de cadena media tienen potencial para usar en producción de fármacos anti-VIH, fármacos contra el cáncer, antibióticos y vitaminas. Cada año se producen 14 millones de toneladas métricas de poliestireno en todo el mundo (Ward *et al.*, 2006).

En el año 2012 se utilizan los residuos se desarrollan copolímeros de residuos de poliestireno expandido y caucho reforzado con sílice (NR). Los residuos de EPS sustituyen el 5% del caucho reforzado, obteniendo las mismas y en algunos casos propiedades mecánicas superiores a las obtenidas con caucho reforzado. La elongación aumento al 300% y la resistencia a la compresión fue superior. La resistencia al desgarre aumento 25%. La resistencia a la tensión se mantuvo igual. Las propiedades térmicas se mantienen con la adición de PS. La dispersión de PS es buena. El desarrollo de estos copolímeros es más económico que los materiales vírgenes de NR (Sekharan *et al.*, 2012b).

Por otra parte el uso de residuos de poliestireno expandido también se da en el sector de la construcción. El uso de este residuo para la fabricación de ladrillos de concreto celular es viable. Los residuos de EPS son utilizados como sustitutos de arena y con el uso de cemento portland, se mejoran ciertas propiedades de los ladrillos convencionales. Estos ladrillos cumplen con las normas de calidad aplicables en México en cuanto al uso en mampostería. Otros resultados encontrados comparados con un producto convencional son: más ligero, menos permeable, más resistente, más flexible y más económico (Hernández-Zaragoza *et al.*, 2013).

Para el mismo año se experimenta con morteros a base de cemento portland convencionales y morteros con adición de EPS comercial y residuos de EPS. El estudio ha determinado que el uso de EPS mejora la durabilidad de los morteros expuestos a condiciones de ciclos de calor, a ciclos de congelación y deshielo, menor absorción de agua y son más ligeros. El uso de aditivos permite contenidos altos de EPS sin comprometer su desempeño. Estos morteros son viables para un uso más sostenible en morteros de mampostería, estuco y yeso (Ferrándiz-Mas & García-Alcocel, 2013).

En el mismo año 2016 se evalúa la utilización de poliestireno expandido de residuos (EPS) en una mezcla de cemento y resina para producir un nuevo material de concreto. Se concluyó que, cuando las proporciones de EPS y las proporciones de resina de las muestras aumentaron, la densidad, la conductividad térmica, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción disminuyeron y la porosidad aumentó (Kaya & Kar, 2016).

### **3.1.2 Uso del Poliestireno con cargas minerales.**

La incorporación de cargas en matrices poliméricas ha sido investigada durante varias décadas. En 1950, Carter et al., sintetizaron arcillas orgánicas recubiertas con bases orgánicas para reforzar los elastómeros. En 1963, Nahin y Backlund de la Union Oil Co. incorporaron arcillas orgánicas en una matriz de poliolefina termoplástica. En 1976, Fujiwara y Sakomoto de la Compañía Unichika informaron el primer nanocompuesto de poliamida híbrida de arcilla orgánica. Después de una década, un equipo de investigación de Toyota formuló mejores métodos para la síntesis de nanocompuestos de nylon-6/arcilla usando la polimerización in situ que era similar al proceso de Unitika. Durante las últimas tres décadas, se ha llevado a cabo mucho trabajo de investigación sobre nanocompuestos poliméricos con diferentes combinaciones de polímeros y cargas (Philip *et al.*, 2012).

Los nanocompuestos poliméricos son una nueva clase de compuestos que presentan una gran mejora en propiedades mecánicas y térmicas en comparación con polímeros y materiales compuestos convencionales, aunque no todas las cargas nanométricas son favorables para cualquier material. El poliestireno es uno de los materiales con exploración en diversas nanocargas ( Vaziri *et al.*, 2011).

En el año 2004 se investigan los efectos de las cargas minerales en el procesamiento por masa fundida del poliestireno. Teóricamente, con cargas minerales muy bajas, el material se comporta como una suspensión de partículas diluida. Cuando la interacción polímero-relleno es fuerte, entonces las interacciones inducirán una tensión mucho mayor en la matriz del compuesto. Las propiedades de los materiales compuestos dependen de la concentración volumétrica, las formas y el campo de tensiones modificado por partículas entre las partículas adyacentes. El polímero se acompaña comúnmente de inestabilidades denomina fractura de fusión, limitándola por la adición de minerales, disminuyendo la rugosidad, la elasticidad y el hinchamiento de la matriz (Lou & Harinath, 2004).

En el año 2006 Smith & Hashemi escribí sobre la fractura de los materiales polimericos. Si la fractura de un termoplástico ocurre por debajo de su temperatura de transición vítrea, entonces es del tipo frágil. La velocidad de deformación es un factor importante en el comportamiento de la fractura. El poliestireno forma regiones distorsionadas localizadas llamadas grietas, antes de que ocurra el resquebrajamiento, como se muestra en la Figura 4. La grieta que se forma en una región de alto esfuerzo del material y que consiste en una alineación de cadenas moleculares combinadas con alta densidad de huecos dispersos, como se muestra en la Figura 5. Las energías de fractura se encuentra entre 300 y 1700 J/m<sup>2</sup>, en vez de 0.1 J/m<sup>2</sup> equivalente a la energía necesaria para romper los enlaces covalentes durante el proceso de fractura.

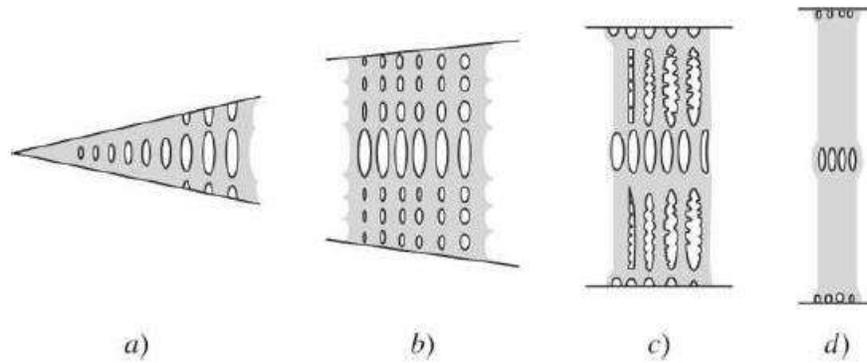


Figura 4. Diagrama de cambio en la microestructura de una grieta a medida que esta crece. Caso de un material de poliestireno (Beahan *et al.*, 1972 citado en William F. Smith & Javad Hashemi).

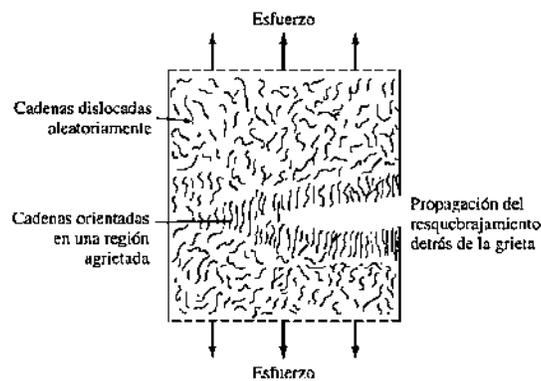


Figura 5. Estructura de un agrietamiento cercano al extremo de una fisura de un material de poliestireno (William F. Smith & Javad Hashemi 2006).

En el año 2006 se estudió las nanofibras de poliestireno expandido reciclado y la adición de fibras de vidrio, con la finalidad de usarlo como un medio filtrante de agua de tamaño menos a 100  $\mu\text{m}$ , contenida en volúmenes grandes de aceite. Este método de remoción de agua es eficaz y económico. Estos medios son usados en la industria petroquímica (Shin, 2006).

En el año 2011 se desarrollan películas compuestas de poliestireno y cargas de nanosílice (7 nm) en los porcentos de 2, 5, 10, 15 y 30% en peso, con la finalidad de determinar las propiedades térmicas y de procesamiento. La presencia de un gran número de aglomerados en material de poliestireno relleno con un 30% en peso de sílice condujo al deterioro de la estabilidad térmica del nanocompuesto. La degradación del poliestireno comienza con la escisión de la cadena, se sigue la

despolimerización y la formación de los principales productos evolucionados (monómero de estireno, dímero y trímero). La mayor estabilidad térmica del poliestireno pertenece a la muestra con un contenido de sílice al 18% en peso (Bera *et al.*, 2011).

En el mismo año se investiga sobre el mecanismo de fractura y las propiedades mecánicas del compuesto poliestireno/nanosílice (16 nm) a diferentes cargas. La exploración se da con cargas de nanosílice con 0, 0.1, 0.2, 0.75, 2, 5 y 10% en peso. Estas partículas afectan las propiedades mecánicas del poliestireno y el mecanismo de desunión es por endurecimiento del compuesto. Una mejora en las propiedades mecánicas del nanocompuesto tiene lugar en un contenido óptimo (2%) de nanopartículas y más que este óptimo, la aglomeración de las partículas disminuye la tenacidad e incluso se convierte en menos que el polímero puro. El módulo de tracción aumentó con el aumento del contenido de nanopartículas de sílice (Vaziri *et al.*, 2011).

En el año 2012 se investiga la síntesis de nanocompuestos de poliestireno con adición de cargas minerales de nanopartículas de alúmina (200 nm) en el rango de 0.2-1% en peso, por medio de ultrasonido. Este estudio determina la variación de la resistencia al impacto y del módulo de tracción en función a las cargas de relleno. A cargas bajas de nanoalúmina mejoran las propiedades mecánicas del material con buena dispersión en la matriz, pero a cargas altas se encuentran aglomeraciones de partículas, por lo tanto las propiedades disminuyen. Un comportamiento similar es para la determinación de erosión, a cargas altas se determina mayor erosión (Philip *et al.*, 2012).

Un año más tarde se desarrolla un material compuesto de poliestireno poroso cargado con nanofosfato de Circonio para la remoción del exceso de flúor en las aguas, evitando problemas dentales en las poblaciones. Este material enriquecido con grupos de amonio cuaternario  $[(\text{CH}_2\text{N}^+(\text{CH}_3)_3)]$  potencializan las características de sorción y absorción del flúor. Este material tiene excelente estabilidad química, no es soluble en agua y no es tóxico para los organismos. El uso de columnas de lecho fijo con el material desarrollado, han dado como resultado menor concentración de iones

de flúor en el agua. El agotamiento de este material es susceptible de ser regenerado por medio solución alcalina (Zhang *et al.*, 2013).

### **3.2 Instituciones educativas enfocadas al reciclaje del EPS.**

Quizá la investigación más fuerte se dio en el año 2016 en el handbook titulado La investigación en la Universidad Politécnica de Aguascalientes, se plasma un artículo llamado “14 aplicaciones del reciclaje del unigel”. A partir del uso de solventes orgánicos e inorgánicos, se formulan nuevos productos aplicables a diferentes áreas; área de la medicina con masas de rehabilitación, plantillas ortopédicas; área de la construcción con paneles de luz, revestimientos para muros y piso y rodillo para pintura con acabado de madera; otras aplicaciones como de repostería con utensilios y masa limpiadora (Díaz, 2016).

En el año 2018 el Instituto Tecnológico de Morelia presenta un producto denominado PROTEJ, básicamente es una teja de apariencia rustica formada de residuos de EPS y textiles. El producto es innovador y rentable con motivo de patente en trámite (Carreño, 2018).

### **3.3 Empresas mexicanas dedicadas al reciclaje del EPS.**

Para el año 2008 se funda la empresa A3P Imperllanta, dedicada al acopio y reciclaje de PET, llantas y EPS. Esta empresa fabrica impermeabilizantes, pinturas y selladores (a3p, 2008).

A finales del 2016 las empresas Marcos y Marcos de México y Dart de México se alían para instalar centros de acopio de unigel para su reciclaje. La empresa Marcos y Marcos fabrican marcos a base de unigel reciclado y poliestireno de impacto. Desarrolla sus actividades en el Estado de México (Marcos y Marcos, 2016).

Rennueva es una empresa joven que inicia actividades a inicios del año 2017 y fue impulsada por la Universidad de Autónoma de México (UNAM). Esta empresa desarrolla la primera máquina capas de reciclar el unigel a bajo costo y de manera sustentable, utilizando calor y presión. Algunos desarrollos de productos con los que cuenta son reglas y lapiceros escolares. Otro de sus giros son como centro de

acopio y reciclaje de unicef. Sus aliados son Marcos y Marcos de México y Dart de México. Ubicada en la ciudad de México (Rennueva, 2017).

#### 4. JUSTIFICACIÓN.

El crecimiento de la población lleva consigo el aumento de los residuos urbanos. En el año 2017 en nuestro país se generaron 102 895 t d<sup>-1</sup> de residuos sólidos urbanos (RSU) de los cuales se recolecta el 83.9%, el 74.3% se lleva a sitios de disposición final, reciclando únicamente el 9.6% de los residuos generados. (SEMARNAT, 2017)

La alta cantidad de RSU generados y el poco reciclaje de los mismos ha sido un problema serio, abarcando aspectos políticos, sociales, culturales, económicos y técnicos. La mayoría de estos residuos son depositados en sitios controlados y no controlados, siendo un problema en potencia que compromete la salud de todos los seres vivos, incluido el humano.

El poliestireno Expandido (EPS) es un residuo de gran volumen presente en los RSU, de particular importancia por las bajas cantidades recicladas debido a la complejidad de aprovechamiento, su peligrosidad por compuestos liberados a la atmosfera en la combustión y por su bajo o nulo valor en el mercado del reciclaje de los residuos.

En trabajos anteriores Hawley-Fedder *et al.* (1984) había informado de los compuestos emitidos a la atmosfera producto de la combustión de poliestireno. La combustión es una fuente importante de emisión de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).

Albert (2008) informa sobre la peligrosidad de los hidrocarburos polinucleares sobre las personas, pudiendo estos desarrollar cáncer y mutaciones. La preocupación es que algunos de estos compuestos pueden estar presentes en alimentos y muchos otros en el aire por medio de evaporación de solventes y de la combustión incompleta de los materiales que los contienen, como el caso del poliestireno.

Por lo tanto, el aprovechamiento de los residuos de EPS a través del reciclaje para desarrollar productos de alto valor es una medida que contribuye directamente con la protección al medio ambiente, a minimizar la problemática del manejo integral y disposición adecuada de los residuos, a mejorar la salud de los seres vivos eliminando la emisión de compuestos cancerígenos y mutagénicos producto de la quema de este tipo de residuo y a valorar e incorporar este residuo al mercado del reciclaje.

## **5. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.**

### **5.1 Hipótesis.**

Los residuos de Poliestireno Expandido (EPS) poseen características con alto potencial para incluirse en el círculo de reciclaje y desarrollar productos de alto valor agregado.

### **5.2. Objetivos.**

#### **5.2.1 Objetivo general.**

Desarrollar productos de alto valor agregado mediante el reciclaje del Poliestireno Expandido (EPS) aplicable a sustratos de madera.

#### **5.2.2 Objetivo particular.**

- Desarrollar un adhesivo, pinturas, estucos y paneles tipo sándwich.

## 6. DISEÑO EXPERIMENTAL.

### 6.1 Diagrama de flujo.

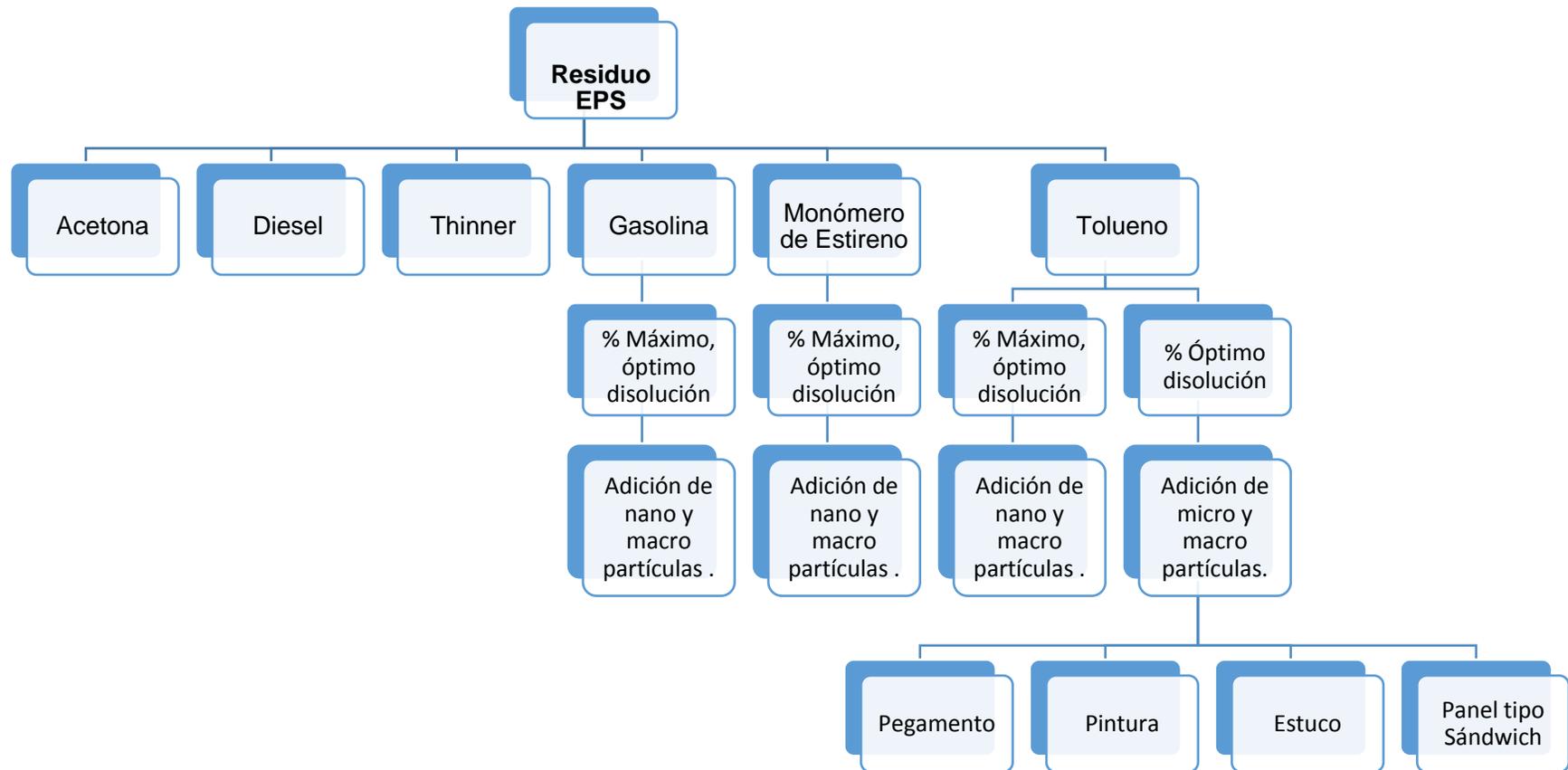


Figura 6. Diagrama de flujo diseño experimental.

## 6.2 Metodología.

-Separación de Poliestireno Expandido (EPS) del resto de los residuos sólidos urbanos.

-Limpieza, disminución de tamaño y homogenización.

-Identificación y disponibilidad de solventes orgánicos comerciales de EPS.

-Exploración de los solventes y EPS. Determinación de porcentaje máximo y óptimo de disolución de EPS

-Aplicación de las mezclas solvente/PS en forma de película en sustratos dobles de madera de pino, concreto y polietileno de baja densidad.

-Evaluación cualitativa de las películas de cada solvente expuestas a sombra (condiciones de laboratorio) y a la intemperie (luz solar, lluvia, vientos).

-Adición de nano carga mineral (sílice) a la disolución máxima y óptima de solvente/PS en los porcentajes de 0%, 1%, 2% y 3%.

-Aplicación de las mezclas solvente/PS en forma de película en sustratos dobles de madera de pino, concreto y polietileno de baja densidad.

-Evaluación cualitativa de las películas de cada solvente expuestas a sombra (condiciones de laboratorio) y a la intemperie (luz solar, lluvia, vientos).

-Selección de los solventes orgánicos con mejores características conferidas al producto.

-Adición de cargas minerales a la disolución máxima y óptima de solvente/PS. Nano sílice en los porcentajes de 0%, 1%, 2% y 3% y marmolina al 200% para cada caso de adición de nanosílice.

-Aplicación de las mezclas solvente/PS/cargas minerales en forma de película en sustratos dobles de madera de pino, concreto y polietileno de baja densidad.

-Evaluación cualitativa de las películas de cada solvente expuestas a sombra (condiciones de laboratorio) y a la intemperie (luz solar, lluvia, vientos).

-Selección del solvente y proporciones de las cargas minerales con mejores características conferidas al producto.

-Desarrollo de pegamento aplicable a sustratos de madera.

-Desarrollo de pinturas aplicables en sustratos de madera.

-Desarrollo de estucos aplicables en sustratos de madera.

- Desarrollo de muros tipo sándwich aplicables en sustratos de madera.

### **6.3 Desarrollo Experimental.**

#### **6.3.1 Materiales y equipo.**

a) Datos de reactivos.

Diésel PEMEX. Color amarillo.

Acetona. Grado comercial, incolora.

Gasolina Magna PEMEX. Octanaje: 87, color rojo

Monómero de estireno. Sinónimos: Cinameno, Feniletileno, Benceno Etenilo, Benceno de Vinilo. Formula química:  $C_6H_5CH=CH_2$

Tolueno. Marca: GOLDEN BELL REACTIVOS. Sinónimos: Toluol, metil benceno, metil benzol, fenilmetano. Fórmula química:  $C_6H_5CH_3$

Peróxido de Metil Etil Cetona (K-2000). Proveedor: PLASTIFORMAS DE MÉXICO S.A. de C.V.

b) Material.

Residuos de Poliestireno Expandido (EPS)

Probetas de triplay de segunda calidad. Dimensiones variables.

Probetas de concreto de 7 x 14 x 2 cm.

Probetas cerámicas de 10 x 20.5 x 1.2 cm

Bolsas de polietileno de baja densidad de 7.5 x 13.5 cm

Recipientes de polipropileno (PP) con tapa hermética, volumen variable.

Marmolina con tamaño de partícula de #1.

Nanosílice con tamaño de partícula entre 10-20 nm

Colorantes para cemento.

c) Equipo.

Campaña de extracción de gases.

Balanza digital con precisión de centésimo de gramo.

Equipo de seguridad industrial para trabajo con sustancias químicas.

Espátula de acero inoxidable.

Perillas de polipropileno (PP) de extracción de líquidos.

Brochas.

Cámara fotográfica.

### **6.3.2 Aspectos importantes.**

La materia prima de EPS fue obtenida de los residuos sólidos de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, se sometieron a limpieza, a un proceso físico de reducción de dimensiones y a homogenización.

Los solventes orgánicos, los materiales de consumo, el equipo de trabajo y seguridad son de adquisición económica y totalmente comercial.

La experimentación aquí presentada se desarrolla en las instalaciones de laboratorio, con ventilación y luz solar adecuada.

El desarrollo de los materiales de alto valor agregado como el pegamento, las pinturas, los estucos y los muros tipo sándwich se reproducen en condiciones ambientales y no usan ninguna energía adicional.

Las sustancias químicas orgánicas usadas fueron: Acetona Comercial, Diésel PEMEX, Gasolina Magna PEMEX, Monómero de Estireno y Tolueno.

Todas las cantidades son representadas como por ciento en base al peso de la sustancia orgánica usada.

Durante la experimentación se ha otorgado clave o número de corrida a cada contacto entre producto químico y EPS, independientemente si la sustancia química disuelva o no, esto con el objeto de identificar y controlar la experimentación y los datos obtenidos.

### **6.3.3 Preliminares al reciclaje del Poliestireno Expandido (EPS).**

Las actividades de recolección, separación, limpieza y reducción de dimensiones del EPS tal como se muestra en la Figura 7, son importantes para el desarrollo de materiales de alto valor agregado.

La presencia de residuos orgánicos e inorgánicos en los materiales de EPS destinados al reciclaje puede modificar o alterar la calidad de los productos de valor agregado.



Figura 7. Actividades previas al reciclado de EPS.

#### 6.3.4. Exploración solventes-EPS. Determinación del porcentaje máximo y óptimo de disolución de EPS y adición de nano partículas de sílice.

Esta etapa tiene la finalidad de explorar a pequeña escala con las sustancias orgánicas comerciales seleccionadas como posibles solventes de residuos de EPS.

Para esta etapa se pueden distinguir dos grupos de sustancias químicas: a) las que no disuelven EPS y b) las que lo disuelven.

a) Sustancias que no disuelven EPS.

La nula disolución de sustancias de Acetona comercial y Diésel PEMEX se muestran en la figura 8. El contacto entre sustancias y EPS es de 24 h con 20 g de cada líquido y 1 g de EPS en cada recipiente.

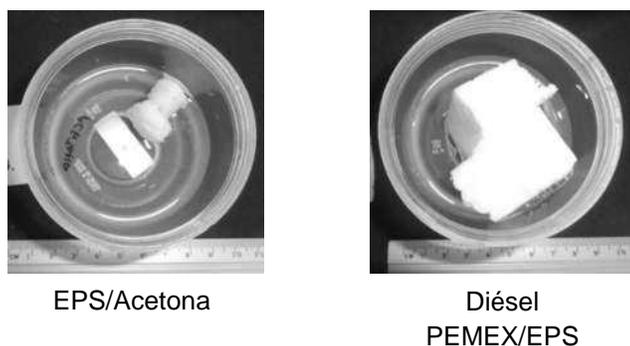


Figura 8. Sustancias orgánicas sin poder de disolución de EPS.

b) *Sustancias químicas con poder de disolución.*

La Gasolina Magna PEMEX, el Monómero de Estireno, el Thinner Estándar COMEX y el Tolueno presentan poder de disolución sobre EPS.

Para determinar el porcentaje máximo de disolución de las sustancias orgánicas con poder de disolución se procede a pesar una muestra de solvente contenida en un recipiente de polipropileno (PP) y adicionar prismas de EPS hasta el punto en que se detiene la acción diluyente.

Para determinar el porcentaje óptimo de disolución de las sustancias orgánicas con poder de disolución se procede a pesar una muestra de solvente contenida en un recipiente de polipropileno (PP) y adicionar prismas de EPS a un punto en el que la disolución pueda soportar la adición de partículas de tamaño nanométrico sin perder la trabajabilidad.

La adición de nano cargas de sílice en las cantidades de 0, 1, 2 y 3% se den en los casos de porcentos máximos y óptimo, excepto el Thinner Estándar COMEX.

Las probetas se reproducen dobles para cada tipo de sustrato, una que será expuesta a sombra en condiciones de laboratorio y su doble expuesta a intemperie. El tiempo de exposición de las probetas correspondientes es de 46 días, tanto para aquellas con porcentaje máximo como para los óptimos.

#### b.1) Thinner Estándar COMEX.

El Thinner Estándar COMEX posee el 77.6% de disolución máxima de EPS y le corresponde a la corrida C1: 241116. El producto de la disolución 100 g de Thinner Estándar COMEX con 77.6 g de EPS se muestra en la Figura 9 en donde se aprecia una tendencia al color blanco. El producto se aplica en forma de película sobre sustratos de concreto simple.

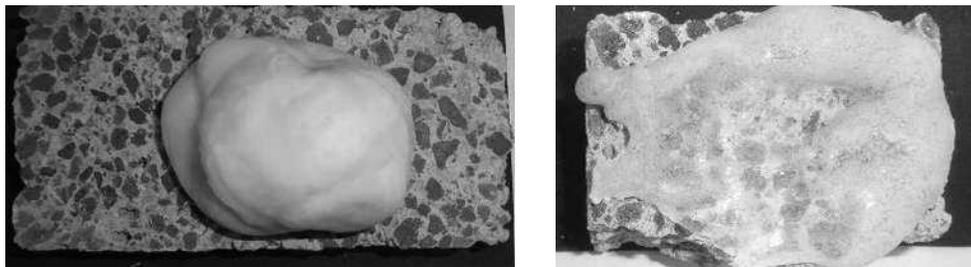


Figura 9. Producto de la disolución de Thinner Estándar COMEX/EPS al porcentaje máximo.

## b.2) Gasolina Magna PEMEX.

La máxima disolución de la Gasolina Magna PEMEX es del 82.5%. Las corridas que integran a este solvente son: C12: 280317 sin contenido de nanosílice, la corrida C16: 290317 contiene el 2% de nanosílice, la corrida C20: 300317 tiene el 1% de nanosílice y la corrida C23: 310317 mantiene el 3%.

El porcentaje óptimo de disolución de la Gasolina Magna PEMEX es del 67.5%. Las corridas que integran este solvente y en la cantidad de nanosílice son: C26: 030417 con el 3%, C27: 030417 con 2%, C28: 030417 con 1%, y C29: 030417 con 0%.

Un producto de la disolución de 100 g de Gasolina Magna PEMEX y 82.5 g de EPS se muestra en la Figura 10 en donde se aprecia una tendencia al color rojo. El producto está contenido en un sustrato de polietileno de baja densidad.



Figura 10. Producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS.

La familia de películas sobre sustratos cerámicos al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 11a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 11b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra. Una ampliación en un área de 2 x 2 cm de las familias de películas expuestas a intemperie se muestra en la Figura 12.

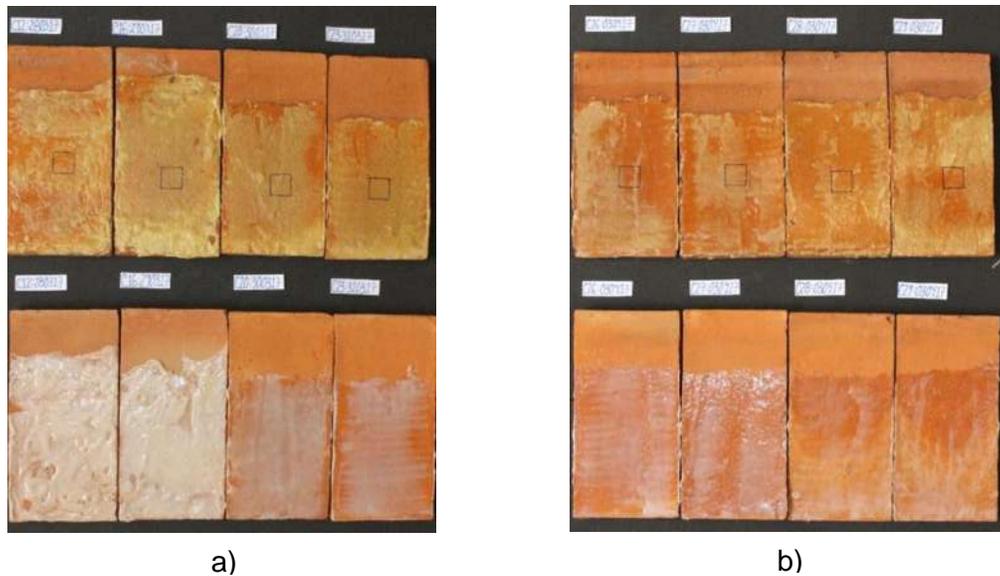


Figura 11. Películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

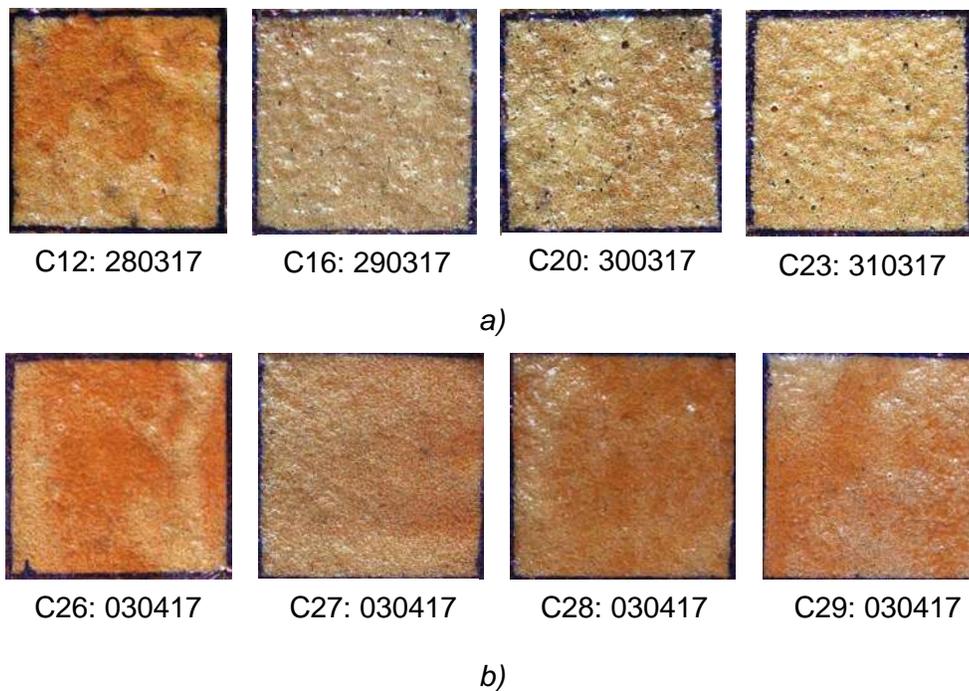


Figura 12. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos expuestos a intemperie. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

La familia de películas sobre sustratos de triplay de pino al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 13a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 13b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas

fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra. Una ampliación en un área de 2 x 2 cm de las familias de películas expuestas a intemperie se muestra en la Figura 14.



Figura 13. Películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

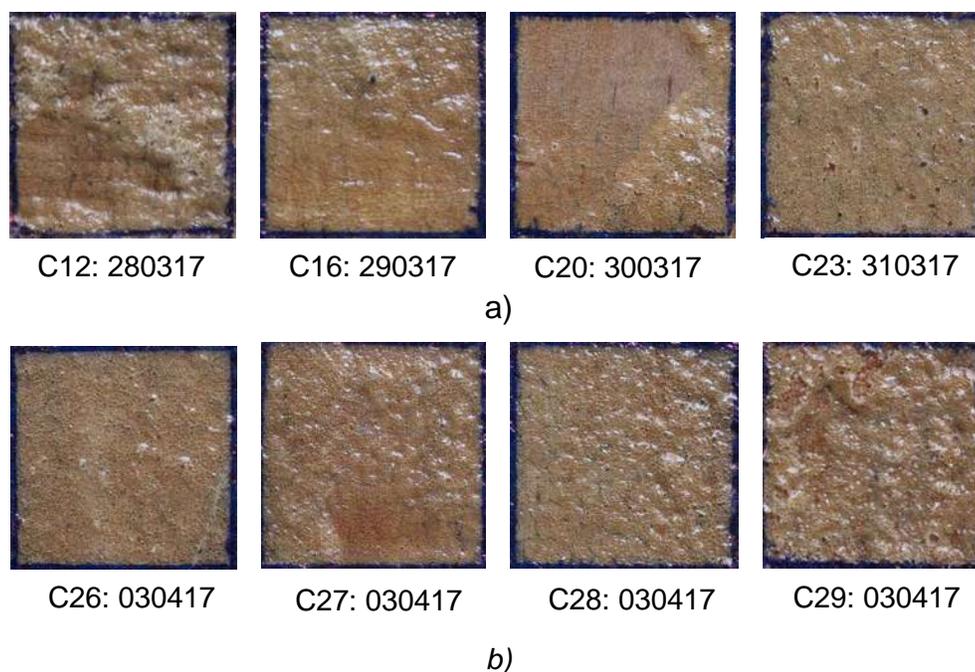


Figura 14. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino expuestos a intemperie. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

La familia de películas sobre sustratos de polietileno al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 15a y la de porcentaje óptimo de disolución en la

Figura 15b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra.



Figura 15. Películas del producto de la disolución de Gasolina Magna PEMEX/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de polietileno. Por ciento máximo (a) y por ciento óptimo (b).

### b.3) *Monómero de Estireno.*

El Monómero de Estireno alcanza un por ciento máximo de disolución sobre EPS del 113.9%. Las corridas que integran a este solvente son C14: 280317 con el 0% de nanosílice, C18: 290317 con el 2% de nanosílice, C21: 300317 con el 1% de nanosílice y la C24: 310317 con el 3% de nanosílice.

El por ciento óptimo de este solventes es del 99%. Las corridas que integran este rubro son: C31: 040417 con el 3% de nanosílice, C32: 040417 con 2% de nanosílice, C33: 040417 1% de nanosílice y C34: 040417 sin nanosílice.

Un producto de la disolución de 100 g de Monómero de Estireno y 113.9 g de EPS se muestra en la Figura 16 en donde se aprecia una tendencia al color gris. El producto muestra polimerización total.



Figura 16. Pastilla polimerizada producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS.

La familia de películas sobre sustratos cerámicos al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 17a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 17b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra. Una ampliación en un área de 2 x 2 cm de las familias de películas expuestas a intemperie se muestra en la Figura 18.

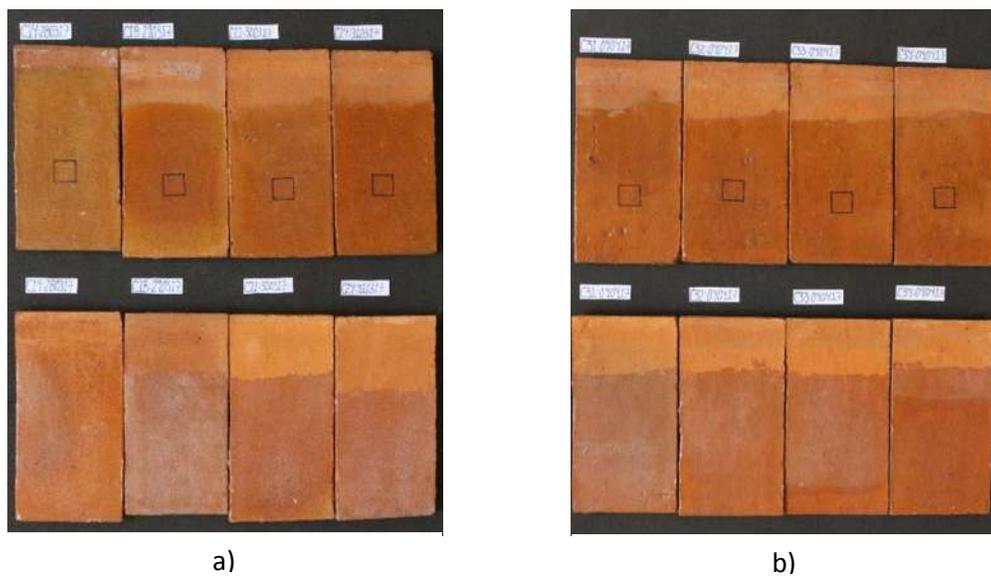


Figura 17. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

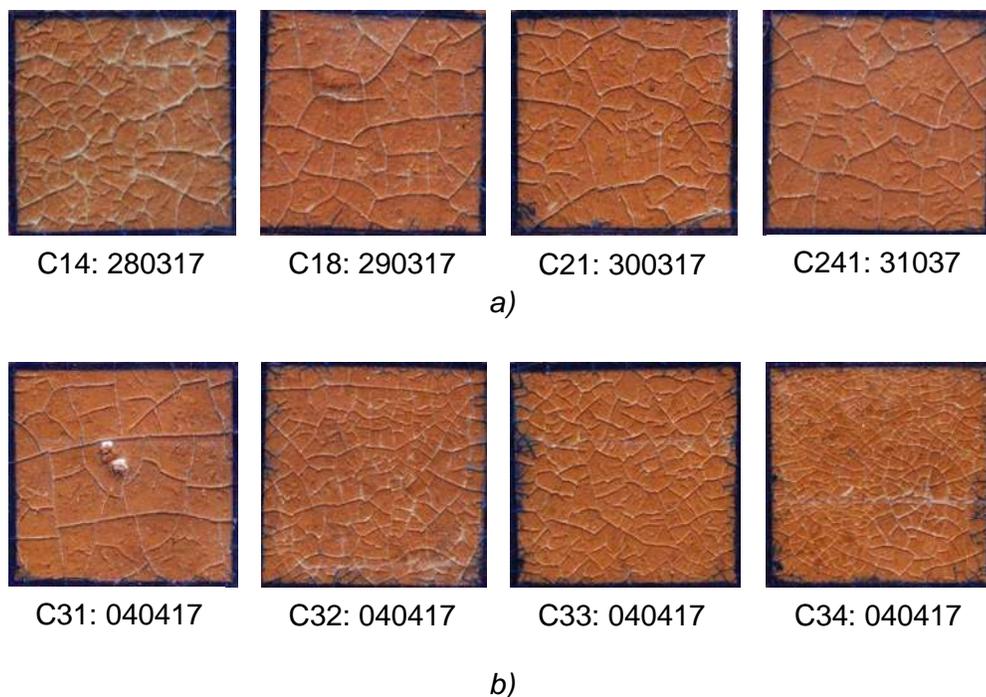


Figura 18. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos expuestos a intemperie. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

La familia de películas sobre sustratos de triplay de pino al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 19a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 19b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra. Una ampliación en un área de 2 x 2 cm de las familias de películas expuestas a intemperie se muestra en la Figura 20.



Figura 19. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

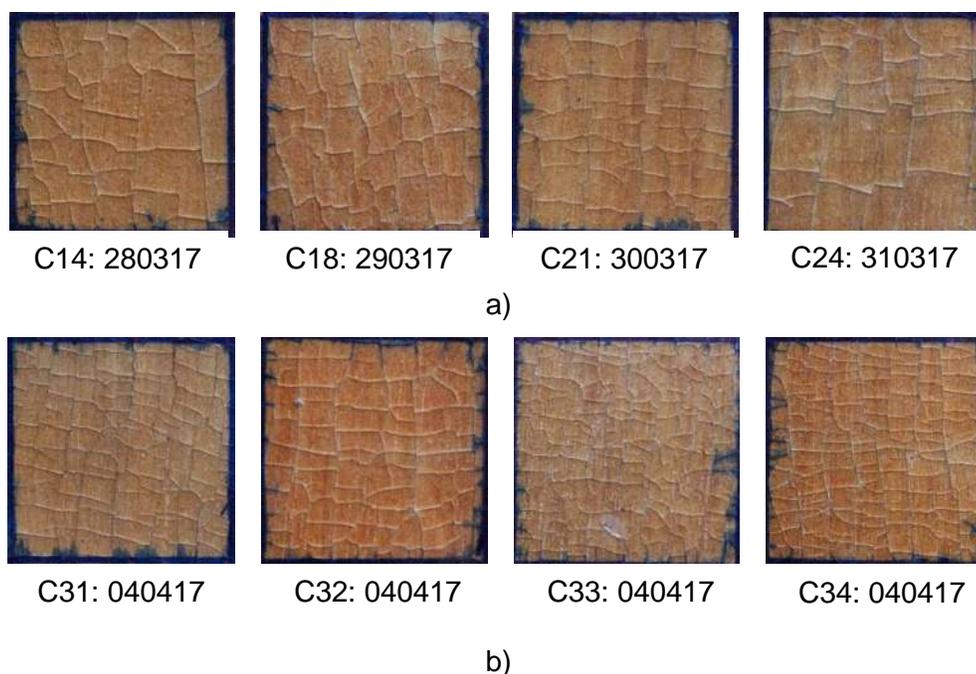


Figura 20. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino expuestos a intemperie. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

La familia de películas sobre sustratos de polietileno al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 21a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 21b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra.



Figura 21. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de polietileno. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

#### b.4) Tolueno.

Para el Tolueno se ha determinado su porcentaje máximo de disolución sobre el EPS de 115.7%. Las corridas que componen a este solvente son: C15: 280317 con el 0%, C19: 290317 con el 2%, C22: 300317 con el 1% y C25: 310317 con el 3%.

El porcentaje óptimo para este solvente es de 100.7% sobre EPS. Las corridas que componen al tolueno son: C35: 050417 con el 3% de nanosílice, C36: 050417 con 2% de nanosílice, C37: 050417 con 1% de nanosílice y C38: 050417 sin nanosílice.

Un producto de la disolución de 100 g de Tolueno y 115.7 g de EPS se muestra en la Figura 22 en donde se aprecia una tendencia al color gris. El producto se muestra en estado fresco.

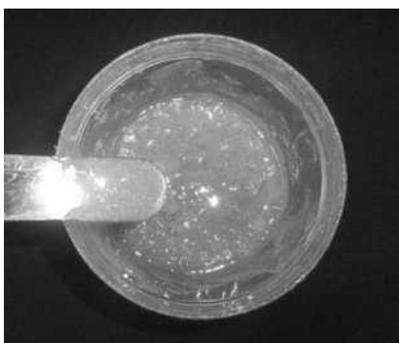


Figura 22. Producto de la disolución de Tolueno/EPS.

La familia de películas sobre sustratos cerámicos al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 23a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 23b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra. Una ampliación en un área de 2 x 2 cm de las familias de películas expuestas a intemperie se muestra en la Figura 24.

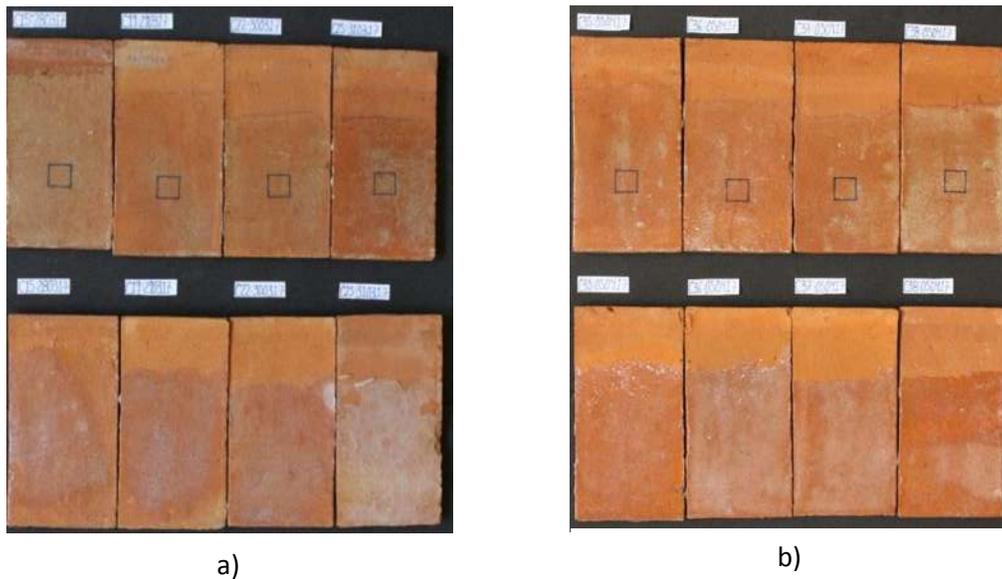


Figura 23. Películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

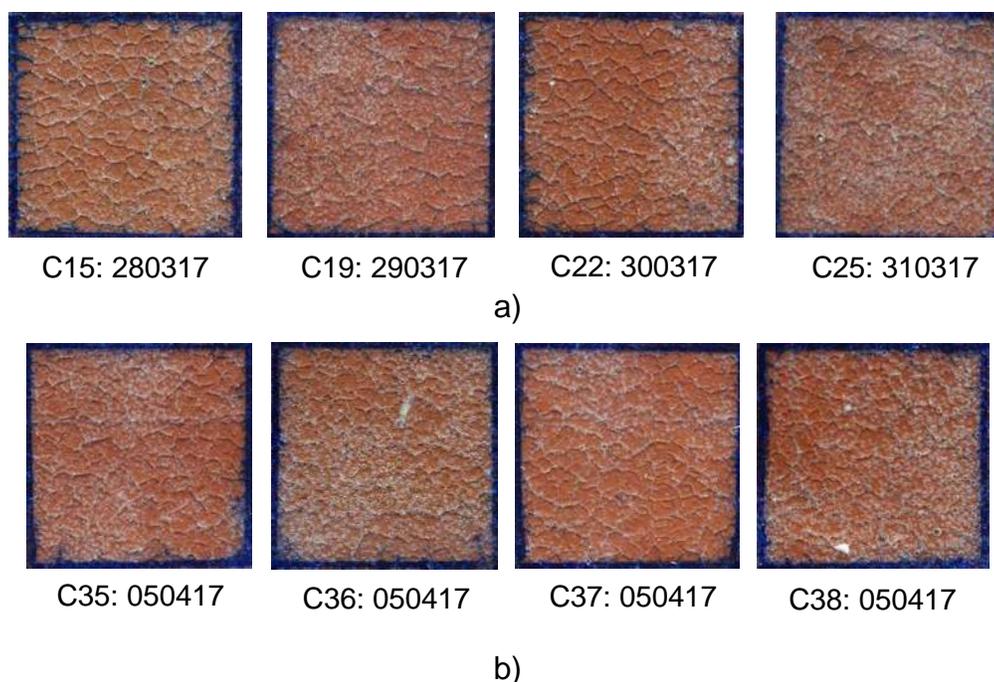


Figura 24. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos cerámicos expuestos a intemperie. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

La familia de películas sobre sustratos de triplay de pino al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 25a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 25b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra. Una ampliación en un área de 2 x 2 cm de las familias de películas expuestas a intemperie se muestra en la Figura 26.



Figura 25. Películas del producto de la disolución de Tolueno /EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

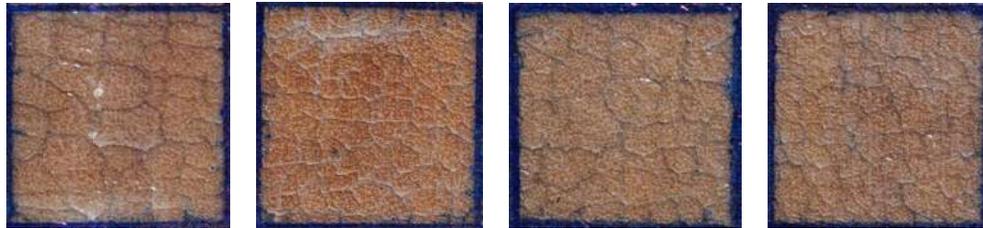


C15: 280317

C19: 290317

C22: 300317

a)



C35: 050417

C36: 050417

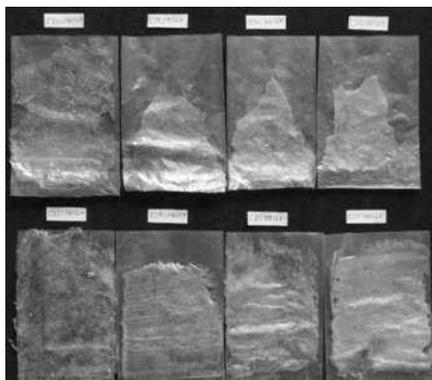
C37: 050417

C38: 050417

b)

Figura 26. Amplificación de imagen de las películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice sobre sustratos de triplay de pino expuestos a intemperie. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

La familia de películas sobre sustratos de polietileno al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 27a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 27b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra.



a)



b)

Figura 27. Películas del producto de la disolución de Tolueno /EPS adición de nanosílice sobre sustratos de polietileno. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

### **6.3.5. Exploración solventes-EPS. Adición de nano sílice y marmolina al porcentaje máximo y óptimo de disolución de EPS.**

El trabajo de esta etapa considera dos solventes: Monómero de Estireno y Tolueno. La adición de nano sílice y marmolina.

Básicamente este rubro consiste en diluir EPS con los dos solventes seleccionados, la adición de nano sílice en los porcentos 0, 1, 2 y 3 y la adición de marmolina al 200% en cada caso respectivamente. La marmolina es fija en cada caso. La experimentación se da a pequeña escala.

Las probetas de ambos solventes consideradas para exposición a intemperie se da por un lapso de 76 días.

a) Monómero de Estireno.

Las corridas que integran al Monómero de estireno en su porcentaje máximo de disolución (113.9) son: C39: 260417 con 3% de nano sílice, C40: 260417 con 2% de nano sílice, C41: 260417 con 1% de nano sílice, y la C42: 260417 0% de nano sílice, todas las corridas con el 200% de marmolina del #1.

Las corridas que integran al El Monómero de Estireno en su porcentaje óptimo de disolución (99) son: C47: 030517 con el 3% de nano sílice, C48: 030517 con el 2% de nano sílice, C49: 030517 con el 1% de nano sílice y la C50: 030517 con 0% de nano sílice.

Un producto de la disolución de 100 g de Monómero de Estireno y 113.9 g de EPS adición de nano sílice al 1% y marmolina al 200% se muestra en la Figura 28 en donde se aprecia una tendencia al color blanco. El producto se muestra en estado fresco.



Figura 28. Producto de disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice y marmolina.

La familia de películas con sus correspondientes adiciones de cargas de nanosílice y marmolina sobre sustratos cerámicos al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 29a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 29b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra.

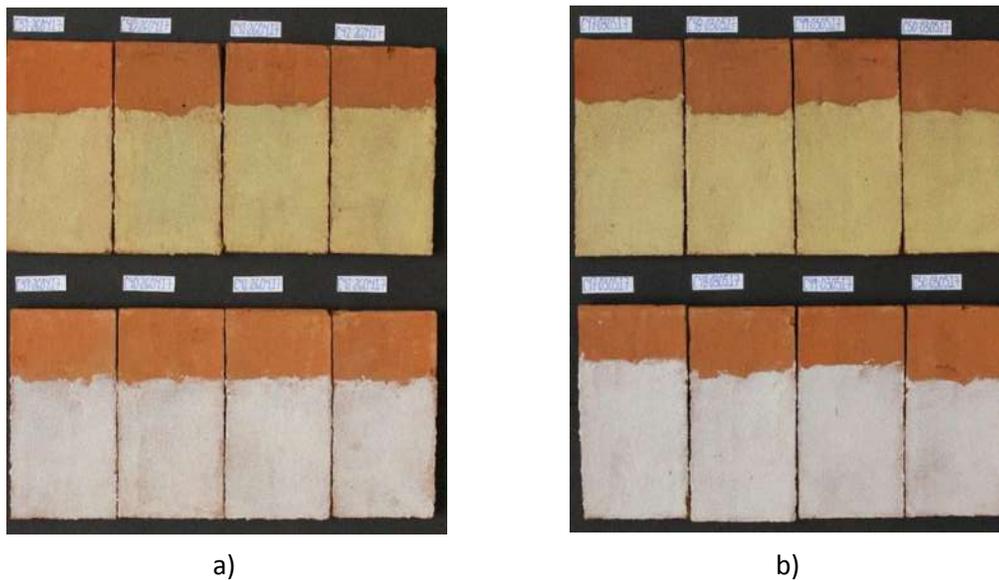


Figura 29. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos cerámicos. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

La familia de películas con sus correspondientes adiciones de cargas de nanosílice y marmolina sobre sustratos de triplay de pino al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 30a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 30b.

Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra.

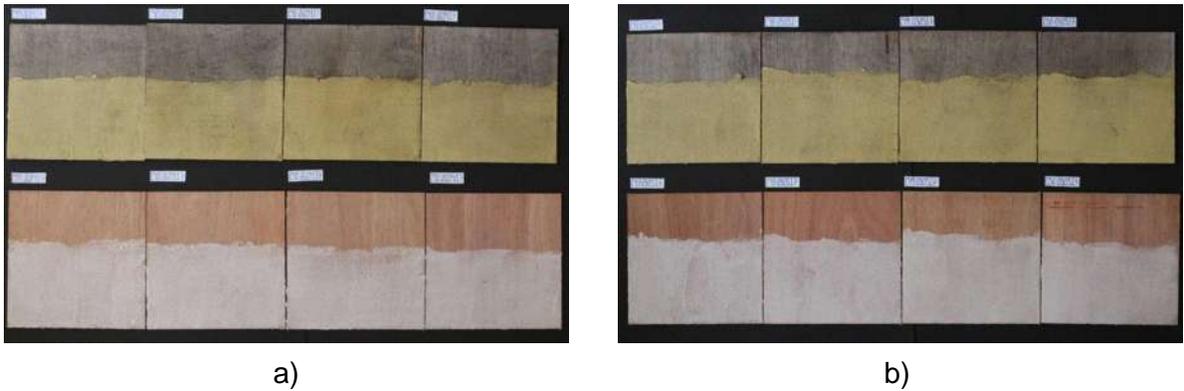


Figura 30. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos de triplay de pino. Por ciento máximo (a) y por ciento óptimo (b).

La familia de películas con sus correspondientes adiciones de cargas de nanosílice y marmolina sobre sustratos de polietileno al por ciento máximo de disolución se presenta en la Figura 31a y la de por ciento óptimo de disolución en la Figura 32b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra.



Figura 31. Películas del producto de la disolución de Monómero de Estireno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos de polietileno. Por ciento máximo (a) y por ciento óptimo (b).

Tolueno.

Las corridas que integran al Tolueno en su porcentaje máximo de disolución (115.7) son: C43: 270417 con el 3% de nano sílice, C44: 270417 con 2% de nano sílice, C45: 270417 con el 1% de nano sílice y la C46: 270417 con 0% de nano sílice, todas las corridas con el 200% de marmolina del #1.

Las corridas que integran al Tolueno en su porcentaje óptimo de disolución (100.7) son: C51: 040517 con el 3% de nano sílice, C52: 040517 con 2% de nano sílice, C53: 040517 con el 1% de nano sílice y la C54: 040517 con 0% de nano sílice, todas las corridas con el 200% de marmolina del #1.

Un producto de la disolución de 100 g de Tolueno y 115.7 g de EPS adición de nanosílice al 1% y marmolina al 200% se muestra en la Figura 32 en donde se aprecia una tendencia al color blanco. El producto se muestra en estado fresco.



Figura 32. Producto de disolución de EPS/Tolueno adición de cargas de nanosílice y marmolina.

La familia de películas con sus correspondientes adiciones de cargas de nanosílice y marmolina sobre sustratos cerámicos al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 33a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 33b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra.

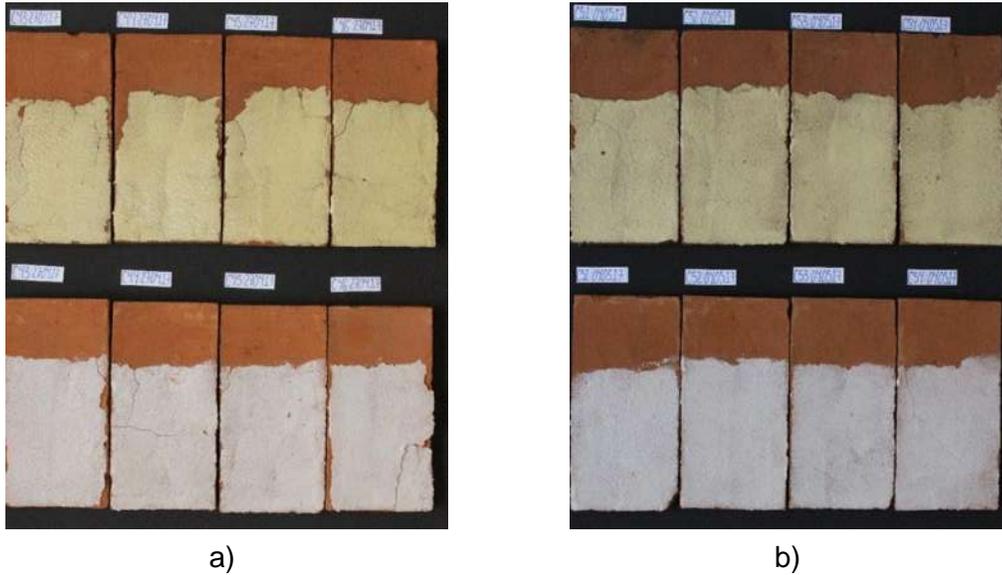


Figura 33. Películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos cerámicos. Por ciento máximo (a) y por ciento óptimo (b).

La familia de películas con sus correspondientes adiciones de cargas de nanosílice y marmolina sobre sustratos de triplay de pino al por ciento máximo de disolución se presenta en la Figura 34a y la de por ciento óptimo de disolución en la Figura 34b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra.



Figura 34. Películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos de triplay de pino. Por ciento máximo (a) y por ciento óptimo (b).

La familia de películas con sus correspondientes adiciones de cargas de nanosílice y marmolina sobre sustratos de polietileno al porcentaje máximo de disolución se presenta en la Figura 35a y la de porcentaje óptimo de disolución en la Figura 35b. Las probetas localizadas en la parte superior de cada familia de películas fueron expuestas a la intemperie, y las de la parte inferior, a la sombra.



*Figura 35.* Películas del producto de la disolución de Tolueno/EPS adición de nanosílice y marmolina sobre sustratos de polietileno. Porcentaje máximo (a) y porcentaje óptimo (b).

### **6.3.6. Desarrollo de materiales de alto valor agregado.**

Las experimentaciones anteriores son con un fin exploratorio y para poder dar paso al desarrollo de materiales de alto valor agregado, como el caso de un adhesivo, pinturas, estucos y panel tipo sándwich. El solvente único seleccionado es el Tolueno por sus características conferidas al producto.

#### **a) Adhesivo.**

El adhesivo desarrollado es evaluado en sustratos de madera de triplay de pino. Para obtener un adhesivo a partir del reciclado del EPS es importante seguir los pasos descritos a continuación.

a.1) procedimiento para obtener adhesivo.

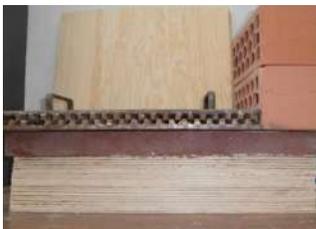
*Procedimiento:*

**Paso 1.** Una vez que se cuenta con EPS limpio y del tamaño adecuado, en un recipiente colocar un gramo de tolueno por cada gramo de EPS.



**Paso 2.** Diluir el EPS con ayuda de una espátula inoxidable hasta llegar a un producto homogéneo. Importante mantener cerrado lo posible el recipiente para disminuir la evaporación del solvente.

**Paso 3.** Aplicar adhesivo en forma de película sobre la superficie limpia de triplay de pino de 3 mm de espesor.



**Paso 4.** Unir la placa de triplay de pino aplicando presión hasta lograr una distribución correcta de adhesivo sobre el material de interés. La cantidad de placas a unir dependerá de las necesidades de cada persona.

**Paso 5.** Mantener presión constante al menos 24 h. El secado del adhesivo será en condiciones ambientales bajo sombra.

a. 2) Evaluación de adherencia mediante prueba de flexión estática con dos puntos de apoyo.

La norma de referencia es la NMX-C-191-ONNCCE-2004 "INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO USANDO UNA VIGA SIMPLE CON CARGA EN LOS

TERCIOS DEL CLARO”, modificándola para el uso de hojas de triplay de 15 x 60 x 0.3 cm. (NMX-C-191-ONNCCE-2004, 2004) (Figura 36).

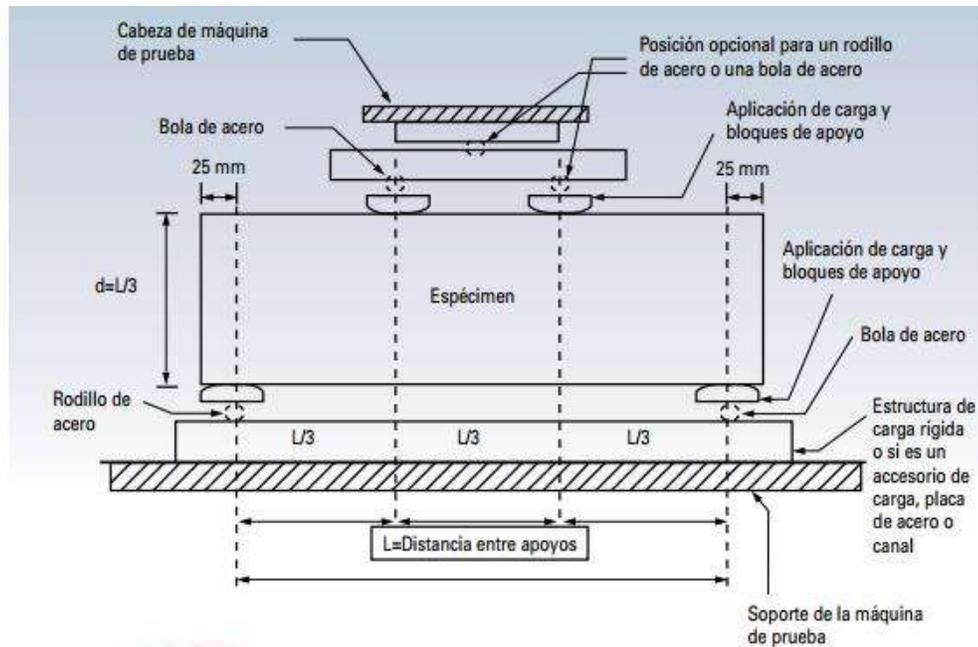


Figura 36. Especificaciones para probetas sujetas a flexión según la Norma Mexicana NMX-C-191-ONNCCE-2004.

El ensaye a flexión estática en madera estará dado por el concepto Módulo de Ruptura, definido de la siguiente manera según la Norma Mexicana NMX-C-191-ONNCCE-2004:

$$R = (PL)/(bd^2)$$

Dónde:

R: es el módulo de ruptura en unidades de  $\text{kgf}/\text{cm}^2$

P: es la carga máxima aplicada en unidades de  $\text{kgf}$ .

L: es la distancia entre apoyos en unidades de  $\text{cm}$  (45).

b: es el ancho promedio del espécimen en unidades de  $\text{cm}$  (15).

d: es el peralte promedio del espécimen en unidades de  $\text{cm}$  (variable).

Esta etapa consiste en unir placas de triplay de pino de dimensiones 15 x 60 x 0.3 cm mediante el uso del adhesivo desarrollado base Tolueno, para obtener probetas en dos, tres y cuatro placas con direcciones de beta variables. Las probetas patrón son triplay de pino de la misma calidad de espesor equivalente a las probetas de dos, tres y cuatro placas.

Las probetas se han agrupado en bloques del A al E, por la orientación de la beta en cada placa. Los cálculos obtenidos de módulo de ruptura y deformación son resultado de promediar cinco muestras bajo las mismas condiciones de elaboración, edad, condiciones ambientales y ensaye. La edad de prueba es a los 30 días.

*Probetas del bloque A.*

Las probetas que integran este bloque son de referencia con beta en dirección longitudinal. El peralte de las probetas y sus correspondientes resultados del ensaye a flexión (MR) y deformación (ε) se muestran en el Cuadro 2. La ejecución de este ensaye se ilustra en la Figura 37.

Cuadro 2. Resultados de las probetas del bloque A.

	<b>Peralte (cm)</b>	<b>MR (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>ε (cm)</b>
Bloque A	0.58	793.7	4.5
	0.89	578.0	3.4
	1.18	793.3	3.8



Figura 37. Probetas del bloque A sujetas a flexión estática. La figura izquierda corresponde a una probeta de dimensiones 15 x 60 x 0.6 cm la figura derecha corresponde a una probeta de dimensiones 15 x 60 x 1.2 cm.

### Probetas del bloque B.

Las probetas de este bloque son desarrolladas con las betas en dirección longitudinal. El peralte de las probetas y sus correspondientes resultados del ensaye a flexión (MR) y deformación ( $\epsilon$ ) se muestran en el Cuadro 3. La ejecución de este ensaye se ilustra en la Figura 38.

Cuadro 3. Resultados de las probetas del bloque B.

	<b>Peralte (cm)</b>	<b>MR (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\epsilon</math> (cm)</b>
Bloque B	0.51	1189.4	5.0
	0.78	829.9	5.2
	1.10	382.3	8.3



Figura 38. Probetas del bloque B sujetas a flexión estática. La figura izquierda corresponde a una probeta a dos placas de dimensiones 15 x 60 x 0.51 cm. La figura derecha corresponde a una probeta a cuatro placas de dimensiones 15 x 60 x 1.1 cm.

### Probetas del bloque C.

Este bloque corresponde a las probetas desarrolladas a partir de unir sus placas con orientación de beta a lo ancho de las mismas. El peralte de las probetas y sus correspondientes resultados del ensaye a flexión (MR) y deformación ( $\epsilon$ ) se muestran en el Cuadro 4. La ejecución de este ensaye se ilustra en la Figura 39.

Cuadro 4. Resultados de las probetas del bloque C.

	<b>Peralte (cm)</b>	<b>MR (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>£ (cm)</b>
Bloque C	0.48	239.1	10.0
	0.74	400.4	4.9
	0.98	333.3	3.7



Figura 39. Probetas del bloque C sujetas a flexión estática. La figura izquierda corresponde a una probeta dos placas de dimensiones 15 x 60 x 0.48 cm. La figura derecha corresponde a una probeta a cuatro placas de dimensiones 15 x 60 x 0.98 cm.

#### Probetas del bloque D.

Las probetas de este bloque están desarrolladas con la orientación de cada placa en dirección alterna. La placa superior es la que recibe la carga al centro de su claro, mientras que la placa inferior está colocada directamente en los apoyos. Por lo tanto, la placa inferior se coloca en dirección de beta a lo ancho de placa y la segunda placa en dirección de beta de manera longitudinal. Para las probetas armadas a tres placas se respeta el arreglo anterior más una tercera placa con orientación de beta en dirección al ancho de probeta. Las probetas a cuatro placas se obtienen respetando los arreglos anteriores más una cuarta placa con dirección de beta de manera longitudinal.

Los resultados del ensaye a flexión (MR) y deformación (£) se muestran en el Cuadro 5. La ejecución de este ensaye se ilustra en la Figura 40.

Cuadro 5. Resultados de las probetas del bloque D.

	<b>Peralte (cm)</b>	<b>MR (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>£ (cm)</b>
Bloque D	0.51	727.9	9.2
	0.78	441.4	5.6
	1.10	179.5	4.7



Figura 40. Probetas del bloque D sujetas a flexión estática. La figura izquierda corresponde a una probeta de dos placas de dimensiones 15 x 60 x 0.51 cm. La figura derecha corresponde a una probeta a cuatro placas de dimensiones 15 x 60 x 1.1 cm.

#### Probetas del bloque E.

Las probetas de este bloque se desarrollan con la orientación de cada placa en dirección alterna. Para obtener probetas a dos placas primero se debe colocar la placa inferior con orientación de beta a manera longitudinal, mientras que la segunda placa se une con su beta en dirección al ancho de la misma. Para las probetas armadas a tres placas se respeta el arreglo anterior más una tercera placa con orientación de beta en dirección longitudinal. Las probetas a cuatro placas se obtienen respetando los arreglos anteriores más una cuarta placa con beta en dirección al ancho de probeta.

Los resultados del ensaye a flexión (MR) y deformación (£) se muestran en el Cuadro 6. La ejecución de este ensaye se ilustra en la Figura 41.

Cuadro 6. Resultados de las probetas del bloque E.

	<b>Peralte (cm)</b>	<b>MR (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>£ (cm)</b>
Bloque E	0.50	557.9	10.0
	0.75	588.8	6.0
	1.00	-	-

Las probetas correspondientes a cuatro placas no se someten al ensaye de flexión estática por fallas en el funcionamiento de la máquina universal de pruebas utilizada.



Figura 41. Probetas del bloque E sujetas a flexión estática. La figura izquierda corresponde a una probeta dos placas de dimensiones 15 x 60 x 0.5 cm. La figura derecha corresponde a una probeta a tres placas de dimensiones 15 x 60 x 0.75 cm.

El resumen de los resultados de los ensayos de flexion estatica (MR) y deformación Los resultados del ensaye a flexión (MR) y deformación (£) de todos los bloques de probetas se muestran en la Figura 42.

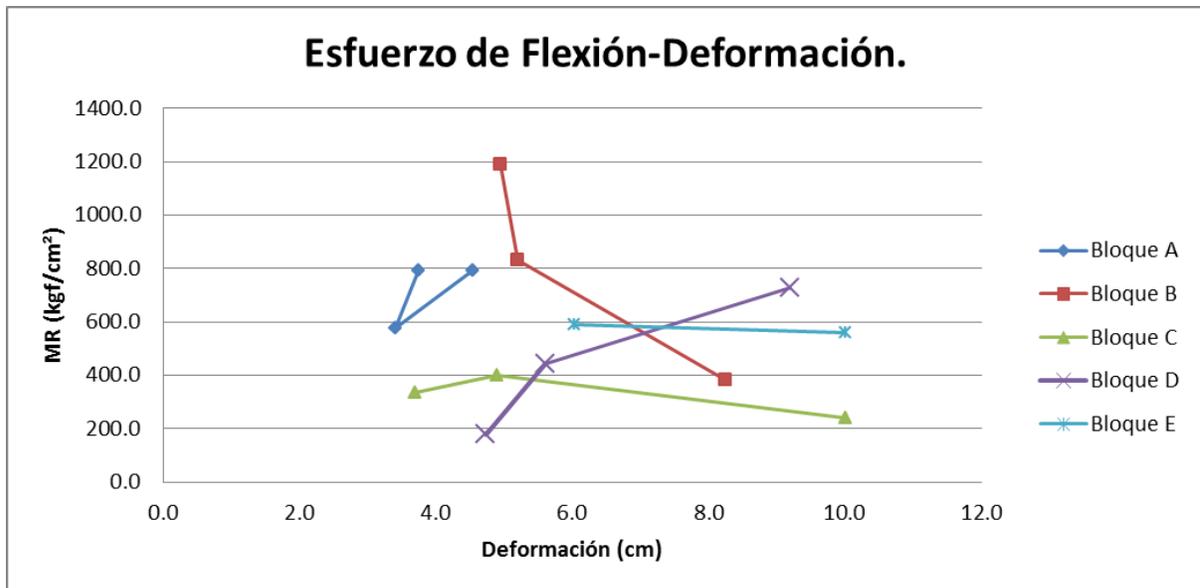


Figura 42. Esfuerzo de Flexión vs Deformación.

#### a.3) Probetas para monitoreo.

Las probetas con fines de monitoreo consta de la unión de dos placas de triplay de pino de dimensiones 60 x 60 x 0.3 cm, unidas mediante el adhesivo en cuestión como se muestra en la Figura 43.



Figura 43. Adhesivo en estado fresco en probetas de monitoreo.

#### b) Estucos.

El estuco es un tipo de recubrimiento aplicable a sustratos de triplay de pino. Se han desarrollado en una variedad de colores. Para obtener estucos se deben seguir los pasos descritos a continuación.

Procedimiento:

**Paso 1.** Una vez que se cuenta con EPS limpio y del tamaño adecuado, en un recipiente colocar un gramo de tolueno por cada gramo de EPS.



**Paso 2.** Diluir el EPS con ayuda de una espátula inoxidable hasta llegar a un producto homogéneo. Importante mantener cerrado lo posible el recipiente para disminuir la evaporación del solvente.

**Paso 3.** Agregar 1.5 g de marmolina de tamaño #1 por cada gramo de tolueno utilizado, mezclar vigorosamente hasta obtener un producto viscoso y homogéneo.



**Paso 4.** Añadir el colorante deseado. Colocar el 5% en peso respecto al Tolueno. Mezclar hasta obtener un producto homogéneo.



**Paso 5.** Aplicar el producto en forma de capa delgada sobre triplay de madera de pino de espesor igual o mayor a 0.6 cm.

**Paso 6.** Dejar que el secado del estuco se de en condiciones ambientales bajo sombra.

La Figura 44 corresponde a los estucos en una variedad de colores aplicados sobre sustratos de triplay de pino de dimensiones 15 x 60 x 0.6 cm al cabo de 48 h de su elaboración.

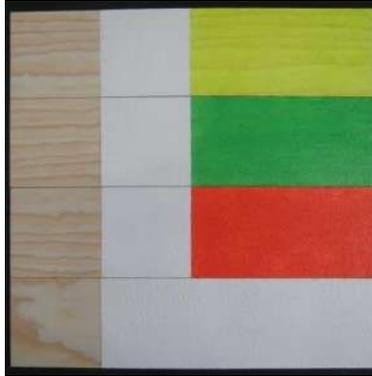


Figura 44. Estucos en variedad de colores sobre triplay de pino.

### **Defectos de producto.**

La aplicación de estuco para monitoreo se dio sobre sobre una placa de triplay de 60 x 60 x 0.3 cm como se ilustra en la Figura 45.

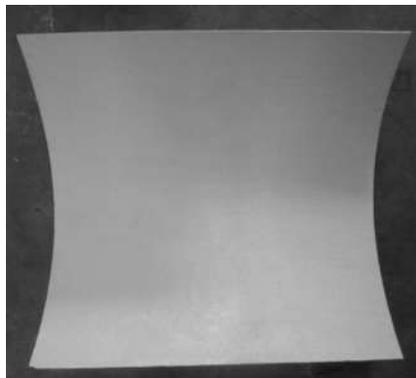


Figura 45. Defectos del estuco con el 10% de pigmento sobre matriz de triplay de pino.

### **c). Pinturas.**

El tercer producto obtenido son pinturas aplicables al triplay de pino. Para obtener pinturas de calidad es necesario cumplir con los siete pasos descritos.

**Paso 1.** Una vez que se cuenta con EPS limpio y del tamaño adecuado, en un recipiente colocar 0.45 g de EPS por cada gramo de Tolueno necesario.



**Paso 2.** Diluir el EPS con ayuda de una espátula inoxidable hasta llegar a un producto homogéneo semilíquido. Importante mantener cerrado en lo posible el recipiente para disminuir la evaporación del solvente.

**Paso 3.** Adicionar colorante al 5% respecto al peso del tolueno y mezclarlo hasta obtener un producto homogéneo.

**Paso 4.** Se recomienda usar triplay de espesor igual o mayor a 0.6 cm. Colocar color blanco de fondo y posterior a su secado colocar el color de interés. El color de interés da mejores resultados si se coloca en dos capas en sentido cruzado.



**Paso 5.** Dejar que el secado del adhesivo se de en condiciones ambientales bajo sombra.

La Figura 46 corresponde a las pinturas en una variedad de colores aplicados sobre sustratos de triplay de pino de dimensiones 15 x 60 x 0.6 cm al cabo de 48 h de su elaboración.



Figura 46. Pinturas en variedad de colores sobre triplay de pino.

### **Defectos de las pinturas.**

La aplicación de pintura para monitoreo se dio sobre un sustrato de triplay de pino de dimensiones 60 x 60 x 0.3 cm como se muestra en la figura 47.

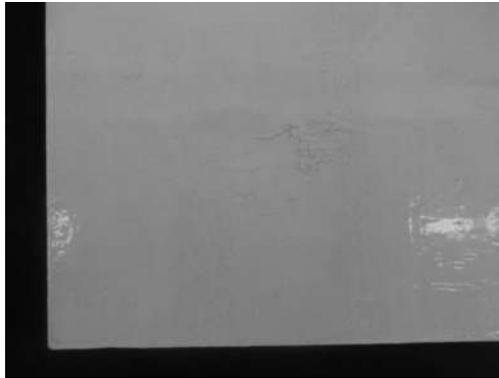


Figura 47. Defectos de la pintura blanca con el 10% de pigmento.

### **d). Muros tipo sándwich.**

El cuarto producto es un muro tipo sándwich que consta de utilizar dos placas de triplay de pino como caras del muro, al interior del mismo presenta una placa de EPS y al exterior de las caras de triplay consta de pintura y por la otra estuco. En otras palabras este tipo de muro es la combinación de los productos anteriores.

Para obtener muros tipo sándwich es necesario seguir los pasos descritos a continuación.

Procedimiento:

**Paso 1.** Limpiar y dimensionar las placas de EPS necesarias para obtener un panel.

**Paso 2.** Obtener dos placas de triplay de pino de espesor igual o mayor a 0.6 cm.



**Paso 3.** Con ayuda de una espátula aplicar adhesivo base Tolueno de forma perimetral en las placas de triplay de pino y dejar 5 min expuesto a condiciones atmosféricas.



**Paso 4.** Colocar la placa o las placas de EPS hasta cubrir toda el área de la hoja de triplay de pino. Aplicar presión constante al menos 12 horas.

**Paso 5.** Repetir el paso 3 y 4 sobre la otra placa de triplay de pino. Se recomienda colocar sujetadores de forma perimetral a los paneles para fijar las placas y no crear paneles de grandes dimensiones.

**Paso 6.** Colocar pinturas o estucos en la combinación de interés.

**Paso 9.** Dejar que los recubrimientos sequen en condiciones ambientales bajo sombra.

La Figura 48 corresponde a muros tipo sándwich compuestos por placas de EPS al interior, adhesivo, placas de triplay y variedad de colores de pinturas y estucos como acabado final.



Figura 48. Muros tipo sándwich.

### **Defectos de los paneles tipo sándwich.**

El monitoreo de los muros tipo sándwich corresponde a probetas de 50 x 122x 4 cm como se ilustra en la figura 49.



Figura 49. Defectos de los muros tipo sándwich.

## **7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

### **7.1. Exploración de solventes-EPS.**

#### **Sustancias sin poder de disolución.**

El Diésel PEMEX y la Acetona comercial no tienen poder de disolución sobre residuos de EPS al cabo de las 24 h de contacto. Por una parte el diésel PEMEX no refleja ningún efecto sobre los prismas de EPS, mientras que la acetona expulsa el aire contenido en los prismas de EPS pero no disuelve, por lo tanto ambas sustancias son descartadas.

#### **Thinner Estándar COMEX.**

El Thinner Estándar COMEX tiene capacidad máxima de disolución del 77.6% sobre EPS. Este solvente es descartado para investigación futura por sus particulares características conferidas a la disolución. El producto de esta disolución en estado fresco no es trabajable, no deformable, poca adherencia, coloración blanca, ausencia de brillo, exceso de burbuja en tamaño y cantidad, temperatura baja y hay exceso líquido sin capacidad de diluir. Por lo tanto, la adición de macropartículas y nanopartículas es compleja, formando solo aglomerados. La polimerización final denota fracturas en toda el área de película, fragilidad, dureza, presencia significativa de vacíos y un crecimiento en excesivo de la burbuja.

#### **Gasolina Magna PEMEX.**

La Gasolina Magna PEMEX alcanza un por ciento máximo de disolución del 82.5 y como óptimo el 67.5 sobre EPS. Aunque la gasolina tiene capacidad para diluir EPS se ha descartado por las particulares características que otorga al producto de una disolución.

El producto de la disolución en estado fresco toma coloración tendiente a un tono rojizo, la cantidad y tamaño de burbuja son apreciables, tiene buena trabajabilidad, adherencia y en forma de película da brillo y cierto grado de transparencia. En estado

endurecido hay crecimiento de vacíos, mantiene la coloración, posee dureza, fragilidad y no se observan fracturas.

Con la adición de la nanosílice los productos de disolución tienen un cambio de ligero a moderado según el contenido de la misma. La coloración que adoptan las disoluciones es tendiente al blanco, siendo este más intenso a medida que se adiciona mayor cantidad de nanosílice. Este cambio de tonalidad es responsabilidad del color blanco que tienen las partículas de nanosílice.

Por otra, parte las disoluciones con mayor contenido de poliestireno y mayor cantidad de nanosílice, se traducen en un complicado proceso de dispersión de las partículas en la matriz de poliestireno, siendo visibles las aglomeraciones de nanosílice. La aplicación en forma de película disminuye y hay pérdida de adherencia en los sustratos usados, pero no esta es adecuada para evitar desprendimientos.

En general, las probetas correspondientes a porcentaje óptimo (67.5) de poliestireno con sus respectivas cargas de nanosílice, son más estables en cuanto a espumación de películas que las probetas que integran al porcentaje máximo (82.5) de poliestireno y sus respectivas cargas. La aparición de espuma de película es independiente si las probetas son expuestas o no a intemperie.

Al polimerizar las películas es cuando aparece la espuma y esto se puede explicar de manera sencilla. La gasolina es un hidrocarburo con volatilidad alta al contacto con el medio ambiente, por lo tanto, la gasolina contenida en el producto de la disolución genera películas espumadas en todos los casos. De tal manera que al tener mayor masa de poliestireno disponible los efectos de espumación son más visibles, sin que la adición de nanosílice puede contrarrestar este fenómeno.

La formación de espuma en la película de poliestireno es un factor determinante en el proceso de degradación de las mismas, tanto expuestas o no a intemperie. Las probetas no expuestas tienen poca resistencia a la fricción, son frágiles y poseen poca dureza, lo que conlleva a la degradación prematura. Las probetas expuestas a pocos días en intemperie muestran cambios de coloración de blanco-rojizo a

amarillo, como resultado de la exposición a los rayos UV y la poca resistencia de los materiales de poliestireno, pero importante destacar que de estos grupos expuestos, las probetas que más resisten a intemperie son por el contenido de partículas de nanosílice que ayudan a reflejar los rayos UV contenidos en la luz solar, denotando menor tono amarillo y menos degradación. A este punto las películas degradadas han perdido dureza y son más frágiles, tras 46 días de exposición.

### **Monómero de Estireno.**

El Monómero de Estireno como solvente de EPS llega a un por ciento máximo del 113.9 y un óptimo de 99. En general, el producto de disolución en estado fresco se torna en una coloración gris, con presencia de burbujas de tamaño pequeño, pero en cantidad considerable, con facilidad de mezclado, sin residuos líquidos, con excelente adherencia sobre diversas superficies, es trabajable y de fácil aplicación en forma de película. La polimerización de este producto es tardía demandando varios días para el secado, una vez endurecido las películas denotan brillo y transparencia, pero aparecen fracturas en las películas, con características de dureza y fragilidad.

La adición de partículas de nanosílice da como resultado el cambio de coloración de tono gris sin adición a tono blanco con mayores contenidos. También se identifica mayor dificultad para dispersar las partículas en la matriz cuando se tiene el caso de trabajar con el máximo contenido de poliestireno y la creciente adición de nanopartículas, con mayor dificultad de aplicación en forma de película, pero no hay pérdida de adherencia para provocar desprendimientos.

La aparición de fracturas se da en los tres sustratos usados. Las películas en sustratos cerámicos y de madera denotan mayor cantidad de fracturas en comparación con el sustrato de polietileno. La forma, la longitud, la profundidad y espesor de la fractura están íntimamente ligados a los sustratos y a la cantidad de nanosílice contenida. Para las películas sin contenido de nanopartículas se presenta mayor cantidad de fracturas por área unitaria, mientras que con la adición de nanosílice estas fracturas disminuyen. Entonces la adición nanosílice da un

mecanismo de desviación de fracturas, modificándolas en su longitud y profundidad, pero no las eliminan.

Las probetas sujetas a intemperie muestran cambio de coloración de blanco al amarillo, siendo más intenso en aquellas sin adición de nanosílice. En estas probetas se hace más notable la fractura, tanto en profundidad como en espesor pero no se dan desprendimientos. Las películas sobre polietileno con cierta degradación disminuyen en cuanto a dureza y son más tendientes a la fragilidad, considerando que aún no tienen su punto máximo de alteración, tras 46 días de exposición.

La adición de marmolina a los productos de disolución correspondientes al porcentaje máximo y óptimo y las correspondientes cargas de nanosílice son otra etapa de exploración.

La adición de marmolina al 200% sobre los productos de disolución correspondientes al porcentaje máximo y óptimo y las respectivas cargas de nanosílice son otra etapa de exploración. El uso de esta macropartícula marmolina otorga características especiales al producto en estado fresco dando mejoría en la dispersión de nanopartículas de sílice, expulsando vacíos y dando coloración blanca, mientras que a mayor contenido de nanopartículas se complica el mezclado, la aplicación en forma de película y se compromete la adherencia sobre sustratos porosos.

El uso de la marmolina ha estabilizado a las películas en los sustratos cerámicos y polietileno, eliminando las fracturas y aumentando la resistencia a los rayos UV, pero en sustrato de triplay se aprecia segregación y tendencia a la formación de fracturas. Tras 76 días de exposición las películas presentan un tono amarillo menor a las probetas que no contienen marmolina y menor degradación a las probetas expuestas 46 días. El uso de la nanosílice magnifica las características de estabilidad y resistencia. El uso de macro y nanopartículas contribuye a la rigidez y fragilidad de las películas y en algunos casos se aprecia pérdida de adherencia sobre sustratos porosos como es el caso de las losetas.

El solvente Monómero de estireno es descartado para futuras experimentaciones principalmente por su tiempo de polimerización. El tiempo de secado de las películas depende de su espesor y de las condiciones ambientales como los factores más importantes. De esta manera el tiempo de secado es variable, tardando varios días hasta semanas para productos de disolución en volumen.

### **Tolueno.**

El Tolueno pesee un porcentaje máximo de disolución de 115.7 y el óptimo de 100.7. El producto de la disolución con sus respectivas cargas de nanosílice en estado fresco y endurecido presenta características muy similares al producto base Monómero de Estireno, solo que para este caso existe mayor cantidad de vacíos de tamaño pequeño en la matriz de poliestireno. La polimerización de las películas base Tolueno se da al cabo de 24 a 48 h dependiendo del espesor de la misma, destacando mayor rigidez.

Las fracturas que se presentan en los sustratos expuestos como no expuestos con o sin adición de nanosílice, son más visibles y abundantes en las películas aplicadas sobre medios cerámicos y de madera de pino, con menos presencia en las películas aplicadas sobre medio de polietileno.

Respecto a las fracturas, las probetas expuestas y no expuestas muestran los mismos patrones, a diferencia que las probetas expuestas tienen mayor profundidad y espesor de fractura. En tanto que las fracturas que presentan las probetas expuestas a intemperie presentan una forma similar a las probetas base Monómero de Estireno, con la discrepancia de que estas fracturas son de menor tamaño y más abundante en un área unitaria.

La adición de nanosílice influye poco en cuanto al tamaño y abundancia de las fracturas. Con las cargas minerales se aprecia un ligero cambio, incrementando el tamaño de la fractura, en ningún caso se elimina y se observa gran cantidad de vacíos. Las probetas con el 3% de nanocarga denotan aglomeraciones.

La adición de marmolina al 200% ha estabilizado las películas en cuanto a la aparición de fracturas en los tres sustratos utilizados. La adición de nanosílice incrementa la dureza y resistencia a la intemperie, sobre todo a los rayos UV, pero también contribuye a mayor rigidez. Las películas sobre probetas de triplay de pino y polietileno no presentan ningún tipo de problema, pero en losas cerámicas se da baja adherencia provocando desprendimiento completo de la película, siendo más visible en aquellas con un contenido máximo de poliestireno.

La pérdida de adherencia sobre medios porosos y absorbentes como el caso de las losas cerámicas utilizadas, es entendible. El producto de disolución base tolueno está compuesto de una gran cantidad de macropartículas como la marmolina al 200% y nanopartículas como la nanosílice en los porcentajes de 1, 2 y 3. Entonces se entiende que a mayores cantidades de partículas de refuerzo, sobre todo las de tamaño nanométrico por su gran área superficial, se compromete la adherencia de la película en soportes porosos.

Las películas base Tolueno y sus correspondientes adiciones de partículas han demostrado menor deterioro producto de la exposición a la intemperie por un lapso de 76 días. Esto se refleja en un cambio de coloración de blanco a tono amarillo, menor al tono que toman las películas base Monómero de Estireno y sus correspondientes cargas.

## **7.2. Desarrollo de materiales de alto valor agregado.**

El tolueno es el solvente con mejores características conferidas a los productos de la disolución de EPS comparado con los explorados en el presente trabajo. Por lo tanto, este solvente es seleccionado para seguir experimentando en la búsqueda de materiales de alto valor agregado a partir de residuos de EPS.

Los materiales desarrollados son aplicados en sustratos de madera de pino y se han trabajado en el siguiente: adhesivo, estuco, pintura y muro tipo sándwich.

### **Adhesivo.**

El adhesivo desarrollado se ha aplicado en probetas de triplay de pino a escala formando materiales compuesto, con la finalidad de someterlas a esfuerzos de flexión y determinar si son viables para el desarrollo de paneles aplicables al aspecto de la construcción. Los bloques de prueba son A, B, C, D y E.

Las probetas a dos placas denotan un secado total del adhesivo, por ende los valores obtenidos son confiables. Las probetas a tres y cuatro placas presentan problemas de secado del adhesivo, siendo mayor el problema en aquellas a cuatro placas. Los problemas de secado del adhesivo impactan en el comportamiento de las probetas ante el esfuerzo inducido, cediendo el adhesivo y ocurriendo deslizamientos verticales y horizontales de las placas, que en muchos casos no llegan a su punto de falla, por lo tanto, los resultados deberán tomarse con las reservas correspondientes.

El espesor del adhesivo, el número de placas, la orientación de la beta y las condiciones ambientales, son los factores determinantes de secado en las probetas. Tal vez un posible camino para el secado óptimo de las probetas sea por medio del uso de fuentes de calor.

Como se muestra en la Figura 42, en cuanto a resistencia a la flexión y deformación, el bloque B supera al bloque A de referencia a una y dos placas. Los bloques C, D Y E se mantienen por debajo del bloque A en cuanto a resistencia a la flexión, pero son superiores a la deformación a dos placas, teniendo un potencial para desarrollo de paneles versátiles o de alta deformación.

Las probetas de monitoreo presentan torceduras significativas y demandan semanas para obtener el secado total. Las torceduras se deben a efectos de polimerización del poliestireno donde ocurren tensiones internas, provocando contracción de película y torceduras en sustratos de madera de pequeño espesor.

### **Estuco.**

Los estucos se han desarrollado en color blanco, amarillo, naranja y verde. Estos materiales están compuestos de Tolueno, marmolina al 150% y 5% de colorante

comercial, a excepción del color blanco que lleva el 10%. Los estucos demandan varios días para el secado total debido al grosor de producto aplicado, determinado principalmente por el tamaño de grano de la marmolina.

Aunque los estucos tienen una buena apariencia, al momento de su secado final se comienzan a formar pequeñas fracturas en la matriz que con el paso de los días va aumentando en longitud, espesor y profundidad. El color amarillo, naranja y verde denotan pocas fracturas que apenas son visibles, pero el color blanco presenta abundantes fracturas. Ninguna probeta muestra desprendimientos de producto.

La aparición y propagación de las fracturas en esta matriz, es un síntoma de que el material no es estable y no contrarresta el total de los esfuerzos de tensión internos que experimenta el poliestireno en su polimerización. Tal vez un camino puede ser el de usar nanosilice, cambiar los por ciento de adición tanto de marmolina como de colorante.

Las probetas de monitoreo de dimensiones 60 x 60 x 0.3 cm presentan serias torceduras y deformaciones por contracción.

### **Pinturas.**

Las pinturas desarrolladas son en colores iguales a los estucos con la misma carga de colorante pero en este caso no haya carga de marmolina. Se han aplicado sobre sustratos de triplay de pino y se les ha colocado como fondo el color blanco.

Al momento que ocurre el secado total de estos productos aparecen fracturas que siguen el mismo comportamiento que los estucos, con la diferencia de que para estos materiales las fracturas son más abundantes, de mayor espesor y de mayor longitud, llegando al desprendimiento de este recubrimiento, caso del color blanco con el 10% de tinte.

El hecho de que las pinturas no contengan ninguna carga mineral adicional al colorante hace más notorias las fracturas, los desprendimientos y las torceduras en sustratos de triplay de espesor de 0.3 cm.

### **Panel tipo sándwich.**

El panel desarrollado está compuesto de los productos anteriormente desarrollados, adhesivo, pintura, estuco y un alma de EPS. Por lo tanto, este producto presenta todas las deficiencias anteriormente mencionadas en cada producto.

Los resultados encontrados en este trabajo concuerdan con los resultados encontrados por varios investigadores en el campo de materiales compuestos a base de poliestireno y de cargas de partículas minerales.

Lou *et al.* (2004) publica que propiedades del poliestireno compuesto de cargas minerales generan ciertas interacciones matriz-carga y estas dependen de concentración volumétrica, las formas y el campo de tensiones modificado por partículas y sus similares adyacentes. El polímero se acompaña comúnmente de inestabilidades llamadas fracturas. El uso de cargas minerales limita la fractura, disminuyendo la rugosidad, la elasticidad y el hinchamiento de la matriz.

Smith *et al.* (2006) escribió que las fracturas que ocurren en el poliestireno es de tipo frágil cuando esta se da por debajo de su temperatura de transición vítrea. El endurecimiento del poliestireno genera grietas en regiones de altos esfuerzos de tensión concentrados y porosidades, alineando las cadenas cercanas.

Bandyopadhyay *et al.* (2007) menciona que el poliestireno es sensible a la exposición de los rayos UV, mediante un mecanismo de absorción de esta energía transmitiéndola a los enlaces de la matriz para conducir a la degradación. Las propiedades cambian en función al tiempo de exposición. La adición de colorantes produce un efecto sinérgico en cuanto a la absorción de los rayos UV y aporta con la separación de la cadena principal de la matriz.

Maul *et al.* (2012) escribió sobre el cambio de coloración del poliestireno expuesto a la radiación UV en presencia de oxígeno tornándose amarillo y aumentando la fragilidad de la matriz.

Salehi *et al.* (2011) investiga sobre el mecanismo de fractura de un polímero quebradizo como el poliestireno con adición de nanosílice. Determinando que la adición de nanosílice ayuda a mitigar el efecto de desunión del material compuesto por el efecto de endurecimiento. La alta adición de rellenos de tamaño de micras aumenta el módulo de elasticidad y la resistencia de la matriz polimérica, pero por otro lado hay una reducción sustancial en la ductilidad, y a veces en la resistencia al impacto, debido a las concentraciones de tensiones causadas por las cargas. Las cargas de tamaño nanométrico bien dispersas no crean grandes concentraciones de tensión y por lo tanto, pueden mejorar el módulo y la resistencia y mantener o incluso mejorar la ductilidad.

## **8. CONCLUSIÓN.**

Los productos desarrollados de adhesivo, el estuco, la pintura y el panel tipo sándwich no satisfacen las características de calidad necesarias para ser considerados como materiales de alto valor agregado, por lo menos no con las cantidades de cargas minerales usadas.

El producto compuesto a base de Tolueno, poliestireno, marmolina al 200% y el uso de nanosílice en el rango de 1 a 3% aplicado sobre sustratos de triplay de pino, muestra tener estabilidad de fracturas, dureza y mayor resistencia a la intemperie. Este compuesto puede ser la clave y punto de partida para el desarrollo de estucos cumplan con las características de calidad adecuadas.

El secado del adhesivo por medio de exposición al medio ambiente en sombra presenta problemas por esta vía. La inducción de calor y presión por otra vía puede ser una opción para tener probetas secas independientemente del número de placas.

El uso de colorante considerado como una carga mineral en la matriz de poliestireno no tiene efectos de estabilidad de fracturas, más bien imprime un efecto sinérgico al mecanismo de endurecimiento de la matriz, como en el caso de la pintura.

Los productos presentados no son resistentes a los rayos UV, por lo tanto son de uso en interiores para alargar su tiempo de vida útil. Aunque la idea de desarrollar copolímeros de poliestireno con algún otro residuo podría incrementar ciertas propiedades deficientes que hagan más llamativos los productos.

## 9. REFERENCIAS.

- a3p. (2008). Recuperado el 06 de 10 de 2010, de a3p: <https://www.a3p.mx/>
- Albert, L. A. (2008). *Curso Básico de Toxicología Ambiental* (Segunda ed.). México: LIMUSA.
- Arellano, D., J., & Guzmán P., J. E. (2011). *Ingeniería Ambiental* (Primera ed.). México: Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V.
- Askeland, D. R., & Phulé, P. P. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Cuarta ed.). México: International Thomson Editores S.A. de C.V.
- Bandyopadhyay, A., & Basak, C. G. (2007). Studies on photocatalytic degradation of polystyrene. *Materials Science and Technology*, 23(3), 307–314. <https://doi.org/10.1179/174328407X158640>
- Bera, O., Pilić, B., Pavličević, J., Jovičić, M., Holló, B., Szécsényi, K. M., & Špirkova, M. (2011). Preparation and thermal properties of polystyrene/silica nanocomposites. *Thermochimica Acta*, 515(1–2), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.12.006>
- Carreño, A., P. (04 de 05 de 2018). *Protej, tejas sustentables hechas a base de unicelel y residuos textiles* . Recuperado el 28 de 08 de 2018, de CONACYT: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/21072-protej-tejas-sustentables-unicelel-residuos-textiles>
- Cohen, J. T., Carlson, G., Charnley, G., Coggon, D., Delzell, E., Graham, J. D., y otros. (2002). A comprehensive evaluation of the potential health risks associated with occupational and environmental exposure to styrene. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B: Critical Reviews.*, 263.
- Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos. (19 de 01 de 2018). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. (D. O. Federación, Ed.) Recuperado el 22 de 02 de 2018, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/mex50516.pdf>

Díaz R., D. (2016). 14 Aplicaciones del Reciclaje de Unicel. En A. Córdova Rangel , C. A. de Luna Ortega, S. P. Flores Esquivel , & J. L. Gallegos Ramírez, *La investigación en la Universidad Politécnica de Aguascalientes* (pág. 157). Aguascalientes: EUMED.NET.

Doroudiani, S., & Kortschot, M. T. (2003). Polystyrene foams. I. Processing-structure relationships. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(5), 1412–1420. <https://doi.org/10.1002/app.12804>

Ferrándiz-Mas, V., & García-Alcocel, E. (2013). Durability of expanded polystyrene mortars. *Construction and Building Materials*, 46, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.029>

Harris, G. (11 de 06 de 2011). Government Says 2 Common Materials Pose Risk of Cancer. *New York Times*.

Hawley-Fedder, R., Parsons, M., & Karasek, F. (13 de 08 de 1984). Products obtained during combustion of polymers under simulated incinerator conditions. II Polystyrene. *Journal of Chromatography*, 10.

Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). Ingeniería ambiental.

Hernández-Zaragoza, J. B., López-Lara, T., Horta-Rangel, J., López-Cajún, C., Rojas-González, E., García-Rodríguez, F. J., & Adué, J. (2013). Cellular concrete bricks with recycled expanded polystyrene aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/160162>

INEGI. (2015). *Población*. Recuperado el 27 de 04 de 2018, de INEGI: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/estructura/>

INEGI. (25 de 10 de 2017). *Instituto Nacional de estadística y Geografía*. Recuperado el 22 de 02 de 2018, de Instituto Nacional de estadística y Geografía: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb311&s=est&c=33223>

Kaya, A., & Kar, F. (2016). Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and Building Materials*, 105, 572–578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.177>

Lou, J., & Harinath, V. (2004). Effects of mineral fillers on polystyrene melt processing. *Journal of Materials Processing Technology*, 152(2), 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.018>

*Marcos y Marcos*. (2016). Recuperado el 06 de 10 de 2010, de Marcos y Marcos: [http://www.marcosymarcos.com.mx/mym/index.php?option=com\\_virtuemart&page=shop.browse&category\\_id=3&Itemid=10011](http://www.marcosymarcos.com.mx/mym/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=3&Itemid=10011)

Maul, J., Frushour, B. G., Kontoff, J. R., Eichenauer, H., & Schade, C. (2012). Polystyrene and Styrene Copolymers. *ULLMANN'S ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY*, 48.

Naciones Unidas. (2015). *Población*. Recuperado el 27 de 04 de 2018, de Naciones Unidas: <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>

NMX-C-191-ONNCCE-2004. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO USANDO UNA VIGA SIMPLE CON CARGA EN LOS TERCIOS DEL CLARO.

Philip, M. A., Natarajan, U., & Nagarajan, R. (2012). Sono-synthesis of polystyrene/alumina nanocomposites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 226(4), 157–164. <https://doi.org/10.1177/1740349912456497>

Ramírez, R. M. (2015). *Preparación de Emulsión a partir de Poliestireno con Aplicación en Mezclas de Cemento*. Tesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Morelia.

*Rennueva*. (2017). Recuperado el 06 de 10 de 2010, de Rennueva: <http://www.rennueva.com/acercade.html>

Sekharan, R. V., Abraham, B. T., & Thachil, E. T. (2012a). Utilization of waste expanded polystyrene: Blends with silica-filled natural rubber. *Materials and Design*, 40, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.03.042>

Sekharan, R. V., Abraham, B. T., & Thachil, E. T. (2012b). Utilization of waste expanded polystyrene: Blends with silica-filled natural rubber. *Materials and Design*, 40, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.03.042>

Shin, C. (2006). Filtration application from recycled expanded polystyrene. *Journal of Colloid and Interface Science*, 302(1), 267–271. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.05.058>

SEMARNAT. (10 de 01 de 2017). *Normatividad aplicable al tema de los residuos*. Recuperado el 22 de 02 de 2018, de Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>

SEMARNAT. (10 de 01 de 2017). *Residuos Sólidos Urbanos (RSU)*. Recuperado el 22 de 02 de 2018, de Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-sólidos-urbanos-rsu>

Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (Cuarta ed.). México: McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Vaziri, H.S., Abadyan, M., Nouri, M., Omaraei, I. A., Sadredini, Z., & Ebrahimnia, M. (2011). Investigation of the fracture mechanism and mechanical properties of polystyrene/silica nanocomposite in various silica contents. *Journal of Materials Science*, 46(17), 5628–5638. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5513-9>

Ward, P. G., Goff, M., Donner, M., Kaminsky, W., & O'Connor, K. E. (2006). A two step chemo-biotechnological conversion of polystyrene to a biodegradable thermoplastic. *Environmental Science and Technology*, 40(7), 2433–2437. <https://doi.org/10.1021/es0517668>

Zhang, Q., Du, Q., Jiao, T., Zhang, Z., Wang, S., Sun, Q., & Gao, F. (2013). Rationally designed porous polystyrene encapsulated zirconium phosphate nanocomposite for highly efficient fluoride uptake in waters. *Scientific Reports*, 3, 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep02551>

## 10. ANEXOS.

### Anexo 1.

Cuadro 7. Propiedades físicas de resinas de Poliestireno (PS) y Poliestireno de Alto Impacto (HIPS) (Maul *et al.*, 2012).

Property	Test method	Typical values	
		PS resins	HIPS resins
Density, g/cm <sup>3</sup>	DIN 53 479 ASTM D 792	1.05	1.03-1.05
Melt flow index (200 °C/5 Kg), g/10 min	DIN53 735 ASTM D 1238/G	1-30	2-20
Tensile modulus, Mpa	DIN 53 457 ASTM D 638	3000-3400	1600-2800
Yield tensile strength, Mpa	DIN 53 455 ASTM D 638	35-60	20-45
Tensile elongation at break, %	DIN 53 455 ASTM D 638	1.5-3	25-70
Ball indentation hardness, Mpa	DIN 53 456 ISO 2039	150-160	75-140
Flexural strength, Mpa	DIN 53 452 ASTM D 790/1	60-120	35-80
Charpy impact strength, KJ/m <sup>2</sup>	ISO179	10-25	35-no break
Notched Charpy impact strength, KJ/m <sup>2</sup>	DIN 53 453	1-2	5-17
Izod impact strength, KJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1 A	10-25	35-no break
Notched Izod impact strength, J/m	ASTM D 256/A	15-30	50-150
Vicat softening temperature °C			
VST/B (50°/h, 5 Kg)	DIN 53 460	78-102	75-97
VST/B (120°/h, 1 Kg)	ASTM D 1525/B	85-110	80-100
Thermal conductivity, WK <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	DIN 52 612	0.16	0.16
Dielectric constant (1 MHz)	DIN 53 483 ASTM D 150	2.5	2.5-2.7
Dissipation factor (1 MHz)	DIN 53 483 ASTM D 150	(1-4)X10 <sup>-4</sup>	(2-8)X10 <sup>-4</sup>
Thermal coefficient of linear expansión, K <sup>-1</sup>	DIN 53 752	(6-8)X10 <sup>-5</sup>	(8-10)X10 <sup>-5</sup>
Refractive index	DIN 53 491	1.59	

Cuadro 8. Resinas de Poliestireno (Maul *et al.*, 2012).

Nombre común	Fabricante
Polystyrol	BASF Aktiengesellschaft, Germany
Starex	Cheil Industries, Korea
Polyrex	Chi Mei, Taiwan
-	Chevron-Phillips Chemical Comp.
Styron	Dow Chemical, USA
Edi stir	Enichem Polimeri, Italy
-	Estizulia, Venezuela
-	Innova, Brazil
-	Ineos, Great Britain
-	Kumho, Korea
LG	LG Chemicals, Korea
-	Japan Polystyrene
-	Nizhnekamskneftekhim, Russia
-	Nova Chemicals, Canada
-	Resirene, Mexico
-	PS Japan
SC	Supreme Petrochem. Ltd., India
PS	Sabic, Saudi Arabia
-	Secco, China
-	Shantou, China
Lacqrene	Total, France
-	Videolar, Brazil
-	Wuxi Wei Da. China

Cuadro 9. Cantidades totales de PAHs identificados en la combustión del Poliestireno (Hawley-Fedder *et al.*, 1984).

<b>Compound</b>	<b>800 °C</b>	<b>850 °C</b>	<b>900 °C</b>	<b>950 °C</b>
Indene	15.83	13.58	11.34	3.715
Naphthalene	20.91	21.66	26.94	17.49
2-Methylnaphthalene	1.166	0.839	1.134	0.44
1-Methylnaphthalene	1.2	1.163	1.075	0.408
Biphenyl	4.115	5.009	7.456	7.158
Acenaphthylene	1.734	1.405	0.714	1.264
4-Methylfluorene	0	0.847	0.587	0.409
Fluorene	2.735	3.434	3.199	1.726
9-Methylfluorene	0.746	2.696	2.102	0.756
Dihydroanthracene	2.554	0	1.419	0
p-Methylphenylphenylacetylene	2.492	2.453	1.513	0.298
Phenanthrene	12.58	16.14	15.38	9.145
1-Phenylnaphthalene	5.548	4.188	4.354	1.27
o-Terphenyl	0.805	0.704	0.622	0
2-Phenylnaphthalene	10.08	10.26	8.19	2.243
Fluoranthene	0.693	0.84	0.938	0.911
Pyrene	0.873	0.579	0.649	0.5
m-Terphenyl	1.265	0.907	0.773	0
Benzo[a]fluorene	1.281	1.196	1.089	0.444
Benzo[c]phenanthrene	0.567	0.409	0.421	0
Chrysene	0.71	0.796	0.978	0.532
1-Phenylphenanthrene	0.137	0	0	0
<b>Total amount</b>	<b>87.961</b>	<b>89.187</b>	<b>90.873</b>	<b>48.709</b>
<b>Total PAHs (approx.)</b>	<b>706</b>	<b>476</b>	<b>344</b>	<b>83.2</b>

Nota: Las cantidades están dadas en mg.