



**UNIVERSIDAD MICHUACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

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

**Preparación de Emulsión a partir de
Poliestireno con Aplicación en Mezclas de
Cemento**

TESIS

Para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta

ROSA MARÍA ARREDONDO RAMÍREZ
Ingeniera Química

Directora de Tesis:

Doctora en Ciencias Químicas María Ilya Espitia Cabrera

Co-Directora de Tesis:

***Doctora en Ciencias en Ingeniería en Materiales María Eugenia
de la Salud Contreras***

Morelia, Michoacán, Septiembre de 2015



AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que con su soporte científico y humano han colaborado en la realización de este trabajo de investigación.

Quiero agradecer en primer lugar a las instituciones que han hecho posible este trabajo presentado en esta memoria de tesis por la ayuda económica brindada, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), a la Facultad de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Civil y al Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales de mi querida alma Mater, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Especial mención merece mi hermana Karla por haber sido el apoyo incondicional que siempre ha estado a mi lado compartiendo mis alegrías, caídas y logros. Agradezco infinitamente su consejo y sabiduría que han podido inspirarme para salir siempre adelante y ser un mejor ser humano día a día.

A mis queridos padres Rosa María y Salvador, quienes, siempre a mi lado, me han dado enseñanzas y ejemplo de fortaleza, honradez y persistencia ante la vida.

Agradezco a mi directora de tesis, la Dra. Ilya que ha sabido guiarme acertadamente y de la mejor manera en este trabajo no solo brindándome apoyo con su vasto conocimiento, sino también como una gran amiga y ejemplo de mujer a seguir.

Un agradecimiento muy especial a la Dra. Elia, a quien tuve el privilegio de conocer y considero una excelente persona, de la cual he aprendido muchas lecciones que me han contagiado de entusiasmo y optimismo; a la Dra. Maricela que siempre ha estado presente durante todo el periodo de la maestría, agradezco la amistad y comprensión en todo momento. Agradezco por el soporte y orientación de mi co-directora de tesis María Eugenia quien me ha transmitido su experiencia y sabiduría.



A mis amigos incondicionales, Javier, Diana, Pepe, Miguel Ángel, Tsitsi, Ana y Mayra por su cariño, apoyo, confianza y por estar siempre presentes; a Germán, quien ha sido pieza fundamental en mi vida en la última etapa de este proyecto.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. José María por su ayuda, cuyas aportaciones en esta tesis ha sido de inestimable importancia; así también a la Dra. Carmen a quien agradezco su paciencia y cooperación para fortalecer mi trabajo.

Al equipo de trabajo del laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, en especial a Eli, Arturo, Naim y al Maestro Wilfrido; así como también a Apolinar que formó parte del desarrollo de la emulsión y a mi amiga Abigail del Instituto de Investigaciones en Materiales y Metalurgia por todo su apoyo.



ÍNDICE

Contenido

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | 8 |
| ABSTRACT | 9 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 10 |
| 1.2 Poliestireno Expandido | 12 |
| 1.2.1 Transformación industrial de polímeros | 12 |
| 1.2.2 Estireno y Poliestireno | 16 |
| 1.2.2.2 <i>Poliestireno</i> | 18 |
| 1.2.3 Plásticos..... | 20 |
| 1.2.4 Clasificación de Plásticos..... | 22 |
| 1.2.5 Reciclaje..... | 24 |
| 1.2.6 Técnicas de Reciclado..... | 25 |
| 1.2.7 Tendencias de desechos plásticos..... | 25 |
| 1.3 Emulsiones | 28 |
| 1.4 Emulsificante. Lecitina | 29 |
| 1.5 Solventes Orgánicos..... | 32 |
| 1.5.1 Acetato de Etilo..... | 32 |
| 1.5.2 Composición y usos de solventes..... | 34 |
| 1.5.3 Acetato de Etilo..... | 35 |
| 1.5.4 Síntesis..... | 35 |
| 1.5.5 Aplicaciones | 36 |
| 1.6 Cemento..... | 37 |
| 1.6.1 Composición química del cemento..... | 37 |
| 1.6.2 Hidratación de los cementos (fraguado, endurecimiento, resistencias) | 39 |
| 1.7 Concreto..... | 42 |



| | | |
|-------------|---|-----------|
| 1.7.1 | Definición de concreto | 43 |
| 1.7.2 | Composición y definición de términos..... | 43 |
| 1.7.3 | Características y funciones de los componentes | 44 |
| 1.7.4 | Conceptos básicos | 46 |
| 1.7.5 | Concreto Reciclado | 47 |
| 1.8 | Eco-Indicador | 47 |
| 1.8.1 | Eco-Indicador 99..... | 49 |
| 1.9 | JUSTIFICACIÓN | 50 |
| 1.10 | HIPÓTESIS | 50 |
| 1.11 | OBJETIVO | 50 |
| 2. | ANTECEDENTES | 52 |
| 3. | METODOLOGÍA | 56 |
| 3.1 | Pruebas de solubilidad para elección del solvente..... | 56 |
| 3.2 | Materiales y reactivos | 56 |
| 3.2.1 | Recolección, fragmentación y lavado del poliestireno expandido post-consumo | 57 |
| 3.3 | Formulación de Diseño de Experimentos | 57 |
| 3.4 | Elaboración de la emulsión | 59 |
| 3.5 | Pruebas realizadas con las muestras de emulsión | 60 |
| 3.5.1 | Espectroscopia de Infrarrojo | 60 |
| 3.5.2 | Densidad | 60 |
| 3.5.3 | Viscosidad | 60 |
| 3.5.4 | Tensión Superficial. Método de capilar..... | 61 |
| 3.6 | Preparación de mezclas de cemento | 62 |
| 3.7 | Elaboración de especímenes de concreto..... | 62 |



| | |
|--|-----------|
| 3.8 Pruebas a realizadas con las muestras y especímenes de mortero/concreto modificado con emulsión..... | 64 |
| 3.8.1 Determinación del tiempo de Fraguado..... | 64 |
| 3.8.2 Ensayo de resistencia a la compresión..... | 64 |
| 3.9 Caracterización de las muestras de mortero mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) | 65 |
| 3.10 Evaluación de Ciclo de Vida | 66 |
| 3.10.1 Objetivo | 66 |
| 3.10.2 Alcance | 66 |
| 3.10.3 Análisis del Inventario..... | 67 |
| 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 69 |
| 4.1 Prueba de solubilidad y elección del mejor solvente | 69 |
| 4.2 Análisis de Varianza (ANOVA). Composición de la emulsión. | 70 |
| 4.3 Elección de la mejor composición de la emulsión | 71 |
| 4.4 Caracterización de materia prima y emulsión. Espectroscopía de Infrarrojo..... | 72 |
| 4.4.1 Espectroscopía IR de materia prima | 72 |
| 4.4.2 Espectroscopía IR de emulsión..... | 73 |
| 4.5 Viscosidad de la emulsión | 74 |
| 4.6 Tensión Superficial | 74 |
| 4.7 Tiempo de Fraguado | 75 |
| 4.8 Resistencia a la compresión | 77 |
| 4.9 Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido de muestras de mortero | 84 |
| 4.10 Propuesta de modelo del composito de concreto modificado con la emulsión | 88 |
| 4.11 Evaluación del Ciclo de Vida | 89 |
| 4.11.1 Análisis del inventario | 89 |
| 4.12.2 Evaluación de Impacto a través del ECO-INDICADOR-99 | 91 |



| | |
|-----------------------------|-----------|
| 5. CONCLUSIONES..... | 92 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 93 |



RESUMEN

La acumulación actual de residuos sólidos en basureros municipales y la contaminación urbana es una creciente problemática que trae consecuencias ambientales. La importancia del desarrollo de procesos sustentables donde se reutilicen materiales poliméricos como el poliestireno no solo provee de beneficios ecológicos, sino también de carácter social en la generación de nuevas industrias asociados a la obtención de utilidades y generación de empleos. La aplicación propuesta por este trabajo de éste material de reuso se da en una de las áreas de desarrollo más importantes en nuestro país: el de la construcción.

Con el cemento se pueden obtener concretos, utilizados principalmente para cubrir con funciones estructurales; los morteros, son mezclas plásticas aglomerantes, que resultan de la combinación de arena y agua con un cementante que puede ser cemento, cal, yeso, o una mezcla de estos materiales. En el área de la construcción existen varios aditivos que se agregan a las mezclas de mortero y concreto que cambian las propiedades mecánicas del material. Es por ésta razón que se fabricó una emulsión a partir de poliestireno expandido post-consumo, con la finalidad de pasivar un contaminante ambiental que se analizó fisicoquímicamente y posteriormente fue adicionado a mezclas como morteros y cementos. Se realizó la medición de pruebas mecánicas de resistencia a la compresión y de tiempo de fraguado, logrando un desempeño que queda dentro de las normas de construcción para ciertos elementos. Finalmente fue realizado un análisis de ciclo de vida para medir el impacto ambiental del uso de la emulsión.

Palabras Clave: plástico, contaminante, emulsión, concreto, mortero.



ABSTRACT

The current augmentation of solid wastes in landfills an urban pollution is a crowing issue that brings environmental consequences. The importance of developing sustainable processes where polymeric wasted materials, as polystyrene, will bring environmental benefits as well as generation of new industries associated to obtain profits and created new employees. The purpose of this work, is to use this wasted material in one of the most important areas in Mexico: the construction.

With cement it is possible to obtain concretes that are mostly use to cover structural functions; the mortars are plastic binder mixtures that results of the combination and mix of sand and water with lime, plaster or a mixture of this materials. In the construction fill, there are several additives to add in mortar and concrete mixtures, those change the mechanical properties of the material. For that reason an emulsion was obtained with wasted expanded polystyrene, thus we can passivate an environmental polluting agent and, after of have been obtained, the emulsion was characterized physicochemically and finally added to a mortar and concrete mixtures. A compressive strength probe was made to the modified concrete samples, and also a setting time probe for modified mortars. A good performance was obtained remaining in the range that marks the construction regulation. A live cycle analysis of the emulsion was obtained in order to know the environmental impact of their use and confinement in construction materials.

Key Words: plastic, polluting agent, emulsion, concrete, mortar.



PREPARACIÓN DE EMULSIÓN A PARTIR DE POLIESTIRENO CON APLICACIÓN EN MEZCLAS DE CEMENTO

1. INTRODUCCIÓN

El gran uso de los productos desechables de plástico que se ha dado en las últimas décadas ha generado una problemática en la acumulación de residuos sólidos, lo cual, ha traído como consecuencia daños ambientales. De acuerdo a información internacional es posible encontrar tres kilogramos de plástico por cada medio kilo de plancton en el mar. Se estima que 18 000 piezas de basura plástica se encuentran flotando en cada kilómetro cuadrado del océano cobrando la vida de miles de animales marinos cada año [1].

En décadas pasadas los motivos principales de reciclar eran con fines económicos, sin embargo, hoy en día la principal importancia del reciclaje es por motivos ambientales [2]. Uno de estos residuos plásticos es el poliestireno expandido comercialmente conocido como Unicel, que es producido a partir del estireno, el cual es un subproducto de las refinerías de crudo.

En el pasado el precio del petróleo fue relativamente bajo durante los productos elaborados a partir de plásticos fueron y aún son de bajo costo; de ahí que no se considere su reciclaje o re-uso. Los desechos de plástico se han convertido en un peligro para el medio ambiente, por su incapacidad de degradarse y descomponerse de manera natural.

En varios países, el 50% del poliestireno expandido es utilizado como material de construcción, como recubrimiento térmico de los edificios, sin embargo un gran porcentaje de éste material es utilizado como empaque y envase, formando parte el 0.1% del total de residuos sólidos urbanos [2].

En México se conoce como desecho plástico post-consumo al material generado por un negocio o un consumidor, que ya le ha dado su uso final y que ha sido separado o dividido de la basura sólida con el propósito de recolectarlo, reciclarlo y hacerlo disponible [2]. Las formas de recuperación del poliestireno expandido dependen de la naturaleza del residuo generado; residuos industriales, residuos del



comercio, distribución y residuos domésticos, desafortunadamente éstos últimos se acumulan en vertederos de basureros municipales y no son debidamente separados. Según la base de datos de INEGI las cantidades de residuos sólidos producidos en el 2011 y su disposición final se presenta en la Figura 1.1.

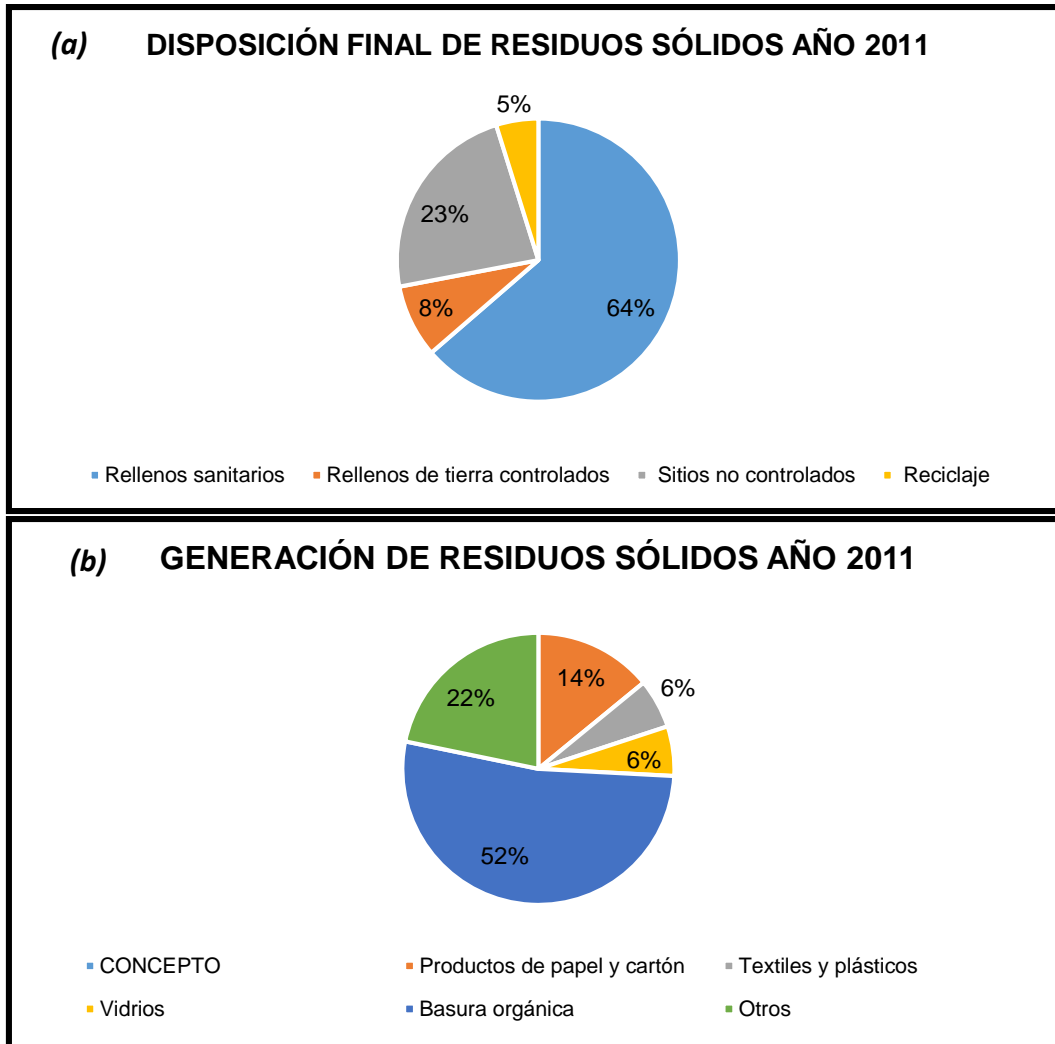


Figura 1.1 (a) Disposición y (b) Generación de residuos sólidos en 2011

INEGI [3] muestra también, que ha habido una creciente producción de residuos sólidos con respecto al tiempo, y en particular en los residuos correspondientes al rubro de textiles y plásticos se observa un aumento de más del doble de cantidad producida en 1995 estos datos se presentan en la Figura 1.2.

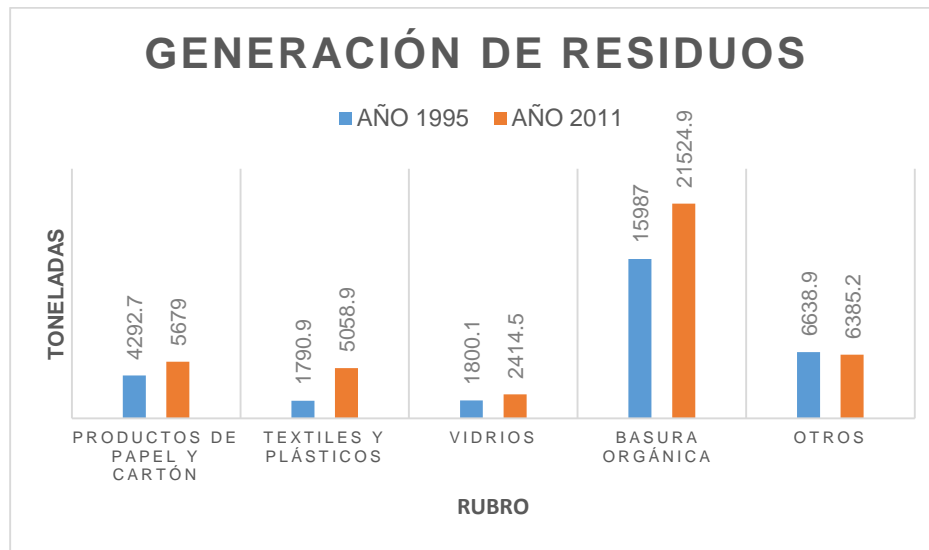


Figura 1.2 Histograma comparativo de la generación de residuos de los años 1995 y 2011

EMULSIONES COMO ADITIVOS EN EL MORTERO

Las emulsiones poliméricas han sido empleadas como aditivos en los morteros de reparación de edificaciones de concreto, puentes de concreto, como materiales de recubrimiento en carreteras y como materiales a prueba de agua que tienen una mayor durabilidad y han sido empleados en los Estados Unidos por más de 35 años [30].

1.2 Poliestireno Expandido

1.2.1 Transformación industrial de polímeros

La obtención de objetos útiles, fabricados con materiales poliméricos como materia prima, se engloba dentro del término general de Procesado o Transformación de Polímeros [4]. En la transformación de polímeros en objetos útiles, entendemos por termoplásticos a aquellos polímeros susceptibles de ser fundidos tras sobrepasar la más alta de sus transiciones térmicas para, posteriormente, ser enfriados y solidificar en algún molde o dispositivo adecuado que les de la forma que interese. Sin embargo, esta transformación no supone ningún cambio en la estructura del



polímero (a no ser algún proceso degradativo si empleamos temperaturas o cizallas demasiado elevadas) y el objeto así fabricado puede ser fundido de nuevo y transformado en otro objeto distinto con ayuda de un molde diferente. Los termoplásticos suponen prácticamente el 90% de todos los materiales poliméricos producidos en el mundo [4].

Los polímeros termoestables, que vienen a suponer el 10% restante, son irrecuperables para estos procesos subsecuentes de transformación. La base de los polímeros termoestables es una reacción de reticulación de las cadenas originales del polímero, gracias a reacciones químicas adecuadas o gracias a la propia reactividad remanente del polímero en cuestión. Puede por ejemplo, que le queden dobles enlaces residuales en cada unidad monomérica y gracias a ellos, en condiciones adecuadas, las cadenas se entrecruzan. El resultado es que, durante la transformación de estos polímeros en productos útiles, alguna reacción de reticulación ocurre y el producto acabado está constituido por cadenas diferentes a las originalmente introducidas en la maquinaria de transformación. El material ya no puede volver a su forma original mediante el suministro del calor y el objeto fabricado sólo puede desintegrarse por degradación.

Resumiendo las diferencias en el procesado de estas dos clases de materiales poliméricos, podríamos decir que mientras que la estabilización de una cierta forma del material a fabricar se logra con un termoplástico mediante una disminución de temperatura y posterior cristalización o vitrificación, en el caso de los termoestables, el progreso de una reacción de reticulación proporciona la estabilidad dimensional que todo objeto de base polimérica necesita [4].

1.2.1.1 Aditivado

Cuando se procesa un termoplástico, la materia prima está, en la mayoría de los casos, en forma de polvo o en forma de granza. En el primero de los dos casos, se trata del producto directo de métodos de polimerización, que se mencionó anteriormente.

La granza es un concentrado de mayor tamaño, usualmente en forma de pequeños cilindros o cubos de unos pocos milímetros, fabricados mediante extrusión. Esta



materia prima polimérica, pulverulenta o grancelada, es la que se funde y se transforma en el objeto útil. Sin embargo, ni la granza ni el polvo contienen, en la mayoría de los casos, un polímero en estado puro. De cara a su transformación en objetos útiles, la materia prima polimérica suele estar convenientemente aditivada. Esto quiere decir que un análisis químico convencional de granza o polvo polimérico revela que existen una serie de aditivos que acompañan al polímero con el objeto de cumplir una serie de objetivos que el propio polímero no cumple en estado puro[4] .

Y así se suelen adicionar al polímero sustancias, poliméricas o no, conocidas como plastificantes, cuyo principal papel es disminuir la temperatura de transición vítrea de polímeros básicamente amorfos de la forma que puedan emplearse en aplicaciones donde el polímero puro no podría emplearse. Un ejemplo clásico es el empleo de plastificantes como el dioctil ftalato (DOP) acompañando al PVC, consiguiendo materiales flexibles que se pueden usar como revestimientos de suelos, en la fabricación de juguetes, salpicaderas de coches, etc. La mayor parte de los objetos fabricados, por razones de estética, requieren tener un color, por lo que se suelen emplear pigmentos que confieren al material el color deseado y evitan el posterior pintado de la pieza fabricada, proceso que suele resultar complicado en el caso de los polímeros por la propia incompatibilidad entre el polímero y recubrimiento (otro polímero en muchos casos).

Se adicionan sustancias de relleno, como sales inorgánicas para rebajar el precio del material u otros rellenos que mejoran las propiedades mecánicas del polímero base, como son las fibras de vidrio en composites de matriz polimérica o el negro de humo en cauchos. Se adicionan también estabilizantes dedicados a preservar al polímero de los procesos degradantes que ejercen la luz, el calor y el oxígeno. Relacionados con aspectos degradativos están otros aditivos que retardan la inflamabilidad intrínseca de muchos polímeros como materiales orgánicos. Entre ellos podemos citar los hidróxidos de aluminio y los derivados del fósforo [4].



Para el procesado es importante añadir agentes lubricantes como los estearatos, que al no disolverse por completo en el polímero fundido, forman una especie de recubrimiento resbaladizo que impide la formación de grumos durante el procesado.

En casos muy importantes, tecnológicamente hablando, se aditiva el polímero con agentes de espumado. Polímeros tan importantes como el poliestireno o los poliuretanos se fabrican en forma de materiales espumados, de baja densidad y alto valor aislante. Para ello, el polímero se mezcla con un aditivo que en adecuadas condiciones de temperatura, se descompone para dar lugar a algún gas que, al tratar de abandonar el polímero lo espuma.

Es también importante el papel de nucleantes que facilitan la extensión de la cristalinidad de los polímeros al actuar como puntos a partir de los que la cristalización progresa, o los agentes antiestáticos que eliminan las cargas electrostáticas que pueden producirse en la formación de fibras y filmes [4].

1.2.1.2 *Procesado (Formación de espumas)*

Las espumas se pueden fabricar a partir de materiales elastómeros reticulables (como caucho o los poliuretanos) o a partir de polímeros vítreos como el poliestireno. La idea básica es que el espumado se produzca por la acción de un gas que se desprende durante el proceso. Este gas puede estar causado por la propia reticulación del material, como es el caso de algunos espumados de poliuretanos, donde se produce CO_2 en la reticulación del poliuretano que se aprovecha para la espumación. En otros casos se adicionan sustancias como bicarbonato amónico o azodicarbonamida que se descomponen dando CO_2 en las condiciones de procesado. Finalmente, algunos agentes espumantes no necesitan de reacción química alguna. Son sustancias de bajo punto de ebullición como el pentano, que pueden procesarse con el polímero gracias a la acción de la presión. Cuando ésta desaparece al abandonar el polímero la boquilla, el disolvente se vaporiza y como el polímero se enfría al mismo tiempo bajo su temperatura de transición, la espuma se produce y se estabiliza dimensionalmente[4].



1.2.1.3 Polímeros Termoplásticos

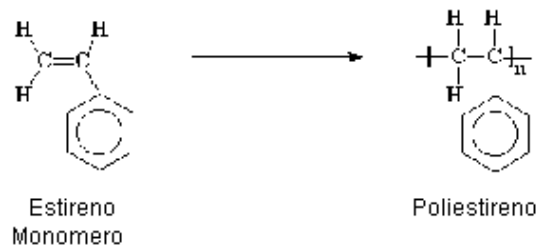
A los polímeros termoplásticos se les puede aplicar con propiedad el término de plásticos, son el conjunto de materiales de mayor producción y consumo. Los termoplásticos más fabricados son el polietileno en sus diversas variantes (alta y baja densidad, copolímeros, etc.), el polipropileno, cloruro de polivinilo y materiales relacionados, el poliestireno con sus diversos copolímeros, los derivados acrílicos (fundamentalmente polimetilmetacrilato), los cauchos y las poliamidas y poliésteres. Es posible identificar materiales poliméricos empleados comúnmente gracias al marcaje de las piezas con ellos fabricados. Dicho marcaje trata de facilitar los procesos de reciclado de los polímeros más empleados en los usos convencionales. Esta clasificación se mencionará más ampliamente en la siguiente sección [4].

1.2.2 Estireno y Poliestireno

1.2.2.1 Polimerización

El monómero del estireno es uno de los derivados vinílicos conocidos, la comercialización de poliestireno no comenzó, tanto en Estados Unidos como en Alemania, hasta después de 1925. La historia del desarrollo de los derivados de estireno está indisolublemente ligada a la segunda guerra mundial, cuando debido a la imposibilidad de usar caucho, se desarrolló un caucho puramente sintético a base de estireno y butadieno que, rápidamente, se transformó en un material muy demandado.

El estireno junto con el etileno, propileno y cloruro de vinilo, es uno de los grandes “cuatro grandes” elementos de construcción de la industria de los plásticos. El monómero del estireno es un líquido transparente de baja viscosidad que tiene la siguiente estructura química:





La polimerización ocurre a través del enlace $-\text{CH}=\text{CH}_2$ formando moléculas no cristalinas, con cientos o miles de unidades estructurales y pesos moleculares de varios cientos de miles hasta millones de daltones.

El monómero del estireno se prepara al hacer reaccionar benceno con etileno para obtener etilbenceno (ethylbenzene, EB), seguido por la deshidrogenación catalítica con lo que se transforma en estireno, o bien, por la oxidación del EB para obtener etilbencil peróxido, que luego reacciona con propileno. Los productos alcohol metil bencílico y óxido de propileno se deshidratan para obtener al estireno. Para evitar que el poliestireno se polimerice durante el transporte y el almacenamiento, se le añaden pequeñas cantidades de inhibidor y se mantiene a baja temperatura.

El estireno se puede polimerizar simplemente calentándolo. Sin embargo, esta polimerización térmica en masa produce un material demasiado viscoso que solamente se puede bombear a temperaturas tan altas que pueden llegar a despolimerizarlo. La reacción de polimerización es muy exotérmica y, en cantidades grandes, difícil de controlar. Diluyendo el estireno con etilbenceno, se vuelve más lenta la reacción y se facilita el bombeo. El EB se emplea comúnmente como diluyente en la polimerización del estireno iniciada con peróxidos. (El estireno mismo disuelve al poliestireno, pero como se polimeriza se consume). El calor de polimerización debe eliminarse para que la temperatura no pase de 350°F (177°C). En el proceso de polimerización en solución, el poliestireno permanece disuelto en el EB y éste, junto con el estireno residual, se recuperan por vaporización instantánea [4].

El control estricto de la reacción asegura que las moléculas del polímero tengan el tamaño y la distribución de tamaños adecuada para que el material tenga las propiedades deseadas de flujo durante la extrusión o el moldeo, así como la resistencia mecánica que se necesite en la aplicación particular. Mientras está caliente todavía, el polímero fundido se somete a extrusión para formar hebras, las cuales se enfrían y se cortan para obtener gránulos (*pellets*) que se envían bajo presión de aire a las bolsas, pacas, carros de ferrocarril o camiones. Cuando se almacenan en el sitio del proceso general se colocan en silos.



Los gránulos producidos después de la polimerización del estireno en solución generalmente son cilindros de 0.10 pulgadas (2.5 mm) de diámetro y 0.10 pulgadas o más de longitud, en cambio los obtenidos por polimerización en suspensión son gránulos esféricos lisos, de tamaño ligeramente menor que las gotitas de monómero del cual provienen.

Densidades aparentes de los gránulos o perlas se muestran en la **Tabla 1.1.2** y, en el caso de productos moldeados, se refieren a la densidad del material.

| Formas y densidades de los plásticos del PS en el mercado | Tamaños comunes | | Densidades comunes | |
|---|-----------------|------|-------------------------|-------------------|
| | pulg | cm | libras/pie ³ | g/cm ³ |
| Gránulos M & E, GPPS Y HIPS | 0.1 | 0.25 | 40 | 0.61 |
| Perlas expandibles (EPS) | 0.1 | 0.25 | 40 | 0.61 |
| Piezas moldeadas y obtenidas por extrusión, sólidas | | | 66 | 1.05 |
| Piezas estructurales espumadas por moldeado | | | 50 | 0.8 |
| Hojas espumadas y piezas moldeadas espumadas | | | 1-6 | 0.015-0.09 |

Reducción de 30% con respecto a la densidad de los plásticos del PS que es 71.7 libras/pie³ (1.15 g/cm³) y tamaño.

Tabla 1.1.2 Formas y densidades de poliestireno [4]

1.2.2.2 Poliestireno

Propiedades y aplicaciones

La polimerización del estireno produce un termoplástico transparente, incoloro, duro y rígido llamado poliestireno para uso general (*general-purpose polystyrene*, GPPS). Para ciertas aplicaciones, se le añaden cauchos (diénicos y de otras clases), con el objeto de impartir extensibilidad, tenacidad y resistencia al impacto



[5]. Estos materiales se denominan “poliestirenos resistentes al impacto” (*high-impact polystyrene*, HIPS), aunque sería más apropiado el nombre “poliestirenos de medio impacto” o, también poliestirenos modificados con cauchos para aquellas variedades que tienen incrementos moderados de tenacidad sobre el homopolímero sin modificar.

Algunos de los usos corrientes de las piezas transformadas son losetas para paredes, dispositivos para embalajes tipo blister, lentes, tapones de botellas, contenedores de todas las clases, juguetes, etc. Se pueden producir hojas firmes de poliestireno, utilizables en el mundo del envase y embalaje. Parte de estas hojas o láminas, transformadas mediante termoconformado, se transportan en platos de desechables. También son de PS los utensilios que acompañan a esos platos (como vasos, cubiertos, tazas, etc.) o los vasitos en los que se comercializan helados, yogures y otros alimentos. Así como espumas y aislantes térmicos.

El poliestireno se puede extruir en filamentos que se pueden estirar deliberadamente para orientar las cadenas poliméricas, añadiendo resistencia tensil al filamento así obtenido. De esos filamentos se fabrican, por ejemplo, las cerdas de cepillos dentales [5].

Aunque el EPS se prepara por diferentes métodos, el más convencional supone el preparar perlas de PS por suspensión, a las que se ha incorporado un disolvente orgánico volátil (pentano, etc.). Durante la fase previa o durante el moldeo las perlas se calientan, lo que ocasiona una expansión tres o cuatro veces, produciendo unas bolitas de muy baja densidad que, por acción del calor, funden conjuntamente y se adaptan al molde. Las piezas así generadas pueden cortarse adecuadamente, ensamblarse, etc. Se trata por tanto de un material celular de baja conductividad térmica que ha ganado adeptos en diversos ámbitos del aislamiento térmico de edificios, refrigeradores, etc. Las propiedades del poliestireno (sobre todo aquellas que no le favorecen en sus usos cotidianos) han sido modificadas “a medida” gracias a la obtención de copolímeros diversos y a la preparación de mezclas miscibles e inmiscibles con otros materiales.



Dentro de esas variedades se ofrecen a menudo modificaciones para tener, por ejemplo, superficie brillante o mate; facilidad de flujo, o retiro de molde mediante superficies de partículas lubricadas. Cada fabricante produce resinas diseñadas específicamente para procesos de transformación y aplicaciones particulares, por lo que conviene consultarlos para recibir sus recomendaciones.

Resistencia Química

El PS resiste el ataque químico de varias sustancias y no reacciona ni absorbe de manera significativa esas sustancias ni el agua [5].

Estas sustancias son:

- Ácidos inorgánicos (con excepción de los ácidos oxidantes fuertes), ácidos orgánicos, aminas alifáticas, bases, sales inorgánicas.
- Alimentos, condimentos, aceites vegetales, bebidas.
- Productos farmacéuticos, jabones, detergentes.

El PS es atacado por algunos materiales, dicho ataque puede manifestarse en forma de corrosión en la superficie o de fisuración cuando hay tensiones internas o solvatación o combinación de esos efectos. Estos materiales son:

- Hidrocarburos, aminas aromáticas, aldehídos, ésteres y cetonas.
- Aceites esenciales e insecticidas.

1.2.3 Plásticos

Las resinas que dan origen a los plásticos son polímeros constituidos por moléculas de distintos monómeros obtenidos a partir de combustibles fósiles que, de acuerdo con el tipo, determinan su punto de fusión y densidad y, dependiendo de que formen cadenas lineales o cruzadas, afectan su viscosidad [6].

Los plásticos son ligeros y fáciles de procesar, lo cual resulta en ahorros de costos tanto de manufactura como de transporte, protegen a los productos que los contienen en contra de los efectos del ambiente sin modificar sus cualidades.

Las propiedades de los distintos tipos de plásticos les confieren ventajas o desventajas en sus diferentes usos y aplicaciones e influyen en su reciclabilidad y



poder calorífico para ser empleados como combustible alternativo al desecharse. Cuando se queman generan pocas cenizas, pero para reducir la emisión potencial de dioxinas y furanos se requieren incinerar a muy altas temperaturas. Los plásticos termofijos no son reciclables. Continuamente están ocurriendo avances tecnológicos para generar nuevos productos plásticos y métodos para reciclarlos [6].

En buena medida, la cantidad de plásticos en el mercado depende de los costos y disponibilidad de los combustibles fósiles; el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), estimó que en general, el 4% de la producción de petróleo bruto es destinada a la fabricación de plástico, calculándose que se requieren 18.7 toneladas de petróleo para fabricar 3.74 toneladas de plástico [2].

De acuerdo con la Normas Mexicanas: NMX-E.000-SCFI-1999 y NMX-E-332-SCFI-1999, que establecen la terminología de reciclado de plásticos y la simbología para la identificación del material constitutivo de artículos de plásticos-nomenclatura, respectivamente, se distinguen los siguientes materiales:

1. **PET:** Tereftalato de polietileno, utilizado en la fabricación de envases para bebidas suaves y refrescos (es el material plástico que más se recicla en México).
2. **HDPE:** Polietileno de alta densidad, usado en la fabricación de productos de consumo comunes, incluyendo envases para leche, agua, champús, detergentes y blanqueadores (es el segundo material en términos de reciclado).
3. **PVC:** Cloruro de polivinilo, utilizado en la fabricación de envases para pulidor de pisos, champús, aceites comestibles, enjuagadores bucales y licores, así como de mangueras de jardín, cortinas de baño, tarjetas de crédito y otros productos (es el plástico con mayor potencial de emisión de dioxinas y furanos y cuya presencia puede obstaculizar el reciclaje del PET).
4. **LDPE:** Polietileno de baja densidad, que entra en la composición de envases para cosméticos y ciertos productos de aseo personal, así como de las películas de plástico empleadas en bolsas usadas en mercados y tintorerías.



5. **PP** Polipropileno, con el cual se fabrican las tapas plásticas para botellas, sombreros, cuerdas, alfombras y otros productos.
6. **PS:** Poliestireno con el cual se produce hule espuma y recipientes para contener bebidas calientes.
7. Otros plásticos, algunos de los cuales constituyen mezclas de los anteriores [8].

De acuerdo con el Instituto Mexicano del Plástico Industrial S.C., en 1997 en México se utilizaron las cantidades de los distintos plásticos referidas en el cuadro 1, destinándose en un 53% a la elaboración de flejes, monofilamento, película y rafia; 32.7% a la elaboración de botellas y contenedores; 11.8% para la fabricación de cajas, tapas, cubetas, vasos y estuches y 2.0% en la fabricación de láminas, productos desechables y recubrimientos. Las cantidades en miles de toneladas de producción para los plásticos más comúnmente utilizados se muestran en la TABLA 1.2.3.

Tabla 1.2.3 Abreviaturas y cantidades de plásticos comúnmente utilizados [7]

| PLÁSTICO | ABREVIATURA | MILES DE TONELADAS |
|------------------------------|-------------|--------------------|
| Polietileno de baja densidad | LDPE | 216 |
| Polietileno de alta densidad | HDPE | 186 |
| Polietilentereftalato | PET | 170 |
| Polipropileno | PP | 159.5 |
| Poliestireno | PS | 52 |
| Cloruro de polivinilo | PVC | 39 |
| Policarbonato | PC | 3 |
| Termofijos | ABS | 1.4 |
| Poliacrilamida | PA | 0.1 |

1.2.4 Clasificación de Plásticos

La Norma Mexicana NMX-E-232-CNCP-2005 establece y describe los símbolos de identificación que deben portar los productos fabricados de plástico, en lo que al material se refiere, con la finalidad de facilitar su recolección, selección, separación,

acopio, reciclado y/o reaprovechamiento. El símbolo está constituido por un triángulo formado por tres flechas, un número en el centro que indica el tipo de plástico y por debajo del triángulo la abreviatura que identifica a dicho plástico. En la Figura 1.2.4 se muestran los símbolos, seguida de la Tabla 1.2.4 [8] que indica cómo se realiza la identificación del tipo de plástico de los productos.

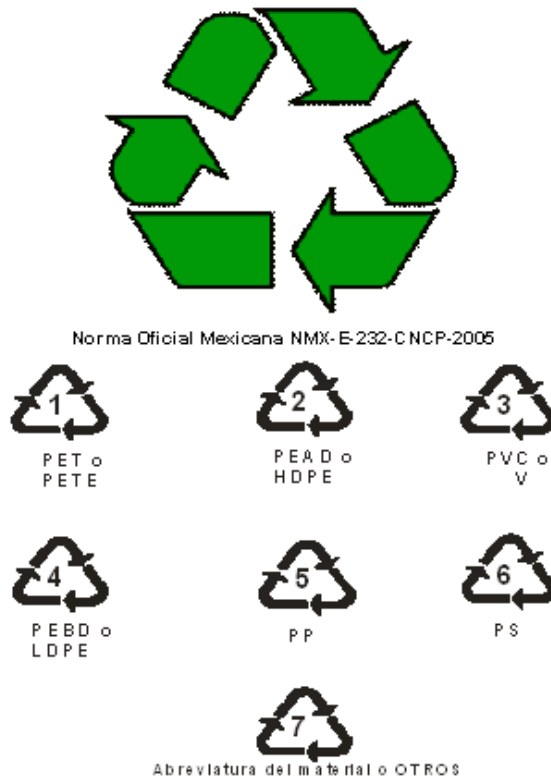


Figura 1.2.4 2 Indicativos empleados en piezas acabadas para denotar a diferentes polímeros



Tabla 1.2.4 Clasificación de tipos de plásticos [8]

| Número de identificación | Abreviatura | Nombre |
|--------------------------|--|------------------------------|
| 1 | PET o PETE | Poli(etilen tereftalato) |
| 2 | PEAD o HDPE | Polietileno de alta densidad |
| 3 | PVC o V | Poli(cloruro de vinilo) |
| 4 | PEBD o LDPE | Polietileno de baja densidad |
| 5 | PP | Polipropileno |
| 6 | PS | Poliestireno |
| 7 | Cuando se encuentren identificados el o los materiales que constituyen el producto, se debe indicar la o las abreviaturas de éstos de acuerdo a la NMX-E-057-CNCP (Véase 2 Referencias), en caso contrario se deberá indicar la leyenda "OTROS". | |

1.2.5 Reciclaje

Se entiende por reciclaje a *"la circulación de materiales dentro de un sistema cerrado con el propósito de optimizar recursos, disminuir generación de basura, propiciar la separación de desperdicios e introducir los mismos al sistema productivo para generar nuevos artículos"* [9].

Los desechos plásticos no son susceptibles de asimilarse de nuevo en la naturaleza, porque su material tarda aproximadamente unos 500 años en biodegradarse. Además tienen un poder calorífico muy elevado, por lo que sus desechos pueden convertirse en combustibles de alta calidad, pudiendo ocasionar graves riesgos ambientales debido a la síntesis de dioxinas y otras sustancias peligrosas que pueden emitirse a la atmósfera durante su combustión.



1.2.6 Técnicas de Reciclado

Con el objeto de encontrar soluciones para manejar desechos plásticos, se desarrollaron algunas técnicas de reciclado; sin embargo, para llevar a cabo esta tarea es importante considerar algunos factores:

- *Factor Ecológico:* Ayuda a resolver el problema de desperdicios plásticos, se ahorra hasta el 88% de la energía que se requiere para producirlos a partir de petroquímicos y conservar los recursos naturales al reutilizar los petroquímicos.
- *Factor Económico:* El precio del material reciclado debe ser menor que el virgen, con lo que el costo del producto se reduce y puede competir en el mercado. Existe un gran ahorro de energía cuando se reciclan plásticos por que se consume menos energía que la empleada para transformar los plásticos a partir de petroquímicos.
- *Factor de Escasez:* La transformación de plástico ha crecido y, además ha atravesado por varias crisis de materiales. Estos dos factores propician la escasez y desabasto de materias primas que originan buscar otras fuentes de abasto como los plásticos reciclados [9].

1.2.7 Tendencias de desechos plásticos

Para reciclar plástico, primero hay que clasificarlo de acuerdo con la resina. Es decir, siete clases distintas: PET, PEAD, PVC, PEBD, PP, PS, y una séptima categoría denominada "otros". Esto es importante, ya que si no se sabe de qué tipo de plástico se trata, dificulta e incluso imposibilita el reciclaje, por ello será necesario que la propaganda reciclable tenga una leyenda que indique de qué tipo de material se trata, para que quien se dé a la tarea de recolectar este material note que éste es reciclable y pueda separarlo y así posteriormente se clasifique para darle el tratamiento adecuado. La secuencia de acciones para disminuir el problema que generan los materiales de vida útil corta se describe a través de la pirámide de la Figura 1.2.7.



Figura 1.2.7 Secuencia de acciones para realizar el reciclado [6]

REDUCIR

Significa utilizar la menor cantidad posible de materiales que se vayan a desechar. Con este propósito se han desarrollado plásticos más resistentes, aditivos y procesos que permiten fabricar productos más ligeros, de menor espesor y diseño ergonómico.

REUTILIZAR

Es aprovechar al máximo la vida útil de los productos a través de sistemas de retornabilidad, como el caso de botellas para bebidas gaseosas y cajas donde se transportan.

RECICLAR

Es la tercera opción, ésta se aplica una vez que los productos ya no pueden ser utilizados para su objetivo original. Sirve para obtener materia prima que será utilizada para fabricar artículos útiles para una segunda aplicación.

RECUPERAR

Es la utilización de métodos químicos para obtener materias primas o energía a partir de desechos plásticos.

Todos los plásticos se pueden reciclar y para ello se clasifican por tipo de plástico y por la técnica de reciclado.



Reciclaje físico

Existen diversas tecnologías para reciclado físico de plástico, que se realiza de acuerdo al tipo de producto que se procesa; pueden ser materiales limpios y materiales sucios, y mezclados, tomando en cuenta estas características se aplica el tratamiento siguiendo el siguiente proceso:

- Pre-lavado
- Compactado
- Molienda
- Cribado
- Granulado o pelletizado
 - Frío
 - Caliente
- Envasado

Reciclaje químico

Durante el proceso de descomposición, las materias orgánicas se convierten en líquidos, gases y residuos que representan la mitad del volumen inicial. La ventaja de esta técnica es que controla los gases emitidos y la recuperación de subproductos [6].

La pirólisis se emplea para producir carbón sintético, recuperación de metanol y ácido acético. El proceso requiere reactores especiales para tratar los residuos.

Algunos procesos son poco utilizados y prácticamente exclusivos de las empresas con gran soporte económico y tecnológico, que no han salido de los laboratorios de pruebas.

- Pirólisis "mayor uso"
- Hidrogenación
- Gasificación
- Depolimerización
 - Hidrólisis
 - Alcohólisis



- Glicólisis

Reciclaje térmico

Consiste en eliminar la mayor parte del volumen de los residuos mediante su combustión, transformando los desechos en gases, cenizas y escorias con el fin de aprovechar la energía producida.

Para realizar esta técnica de recuperación es necesario tener un estricto control con la emisión de gases contaminantes, dependiendo del tipo de plástico que será quemado [6].

Las ventajas principales en el tratamiento térmico son:

- Favorece el control sanitario
- Elimina infecciones
- Reducción de volumen
- Recuperación de energía

Limitaciones mostradas por mal control del proceso:

- Emisión de gases a la atmósfera
- Áreas próximas al centro de incineración
- Tecnología sofisticada
- Costo elevado
- Pérdida de productos útiles

1.3 Emulsiones

Se define normalmente una emulsión como un sistema de dos líquidos inmiscibles, uno de los cuales se dispersa en el otro en forma de pequeñas gotitas. Todos los productos tenso-activos que son eficaces como agentes emulsionantes, reducen marcadamente la tensión superficial entre las dos fases líquidas. Las emulsiones constan de una fase continua y una fase dispersa; en la fase dispersa las partículas toman forma esférica, debido a las fuerzas de tensión superficial. La disminución de la tensión superficial favorece, tanto la formación de emulsiones, como su estabilización [10].



Una emulsión de dos líquidos A y B, puede consistir de una emulsión de A en B o de B en A. A primera vista, podría parecer que la relación entre los volúmenes de los dos líquidos determinaría el tipo de emulsión, es decir, que el líquido presente en menor cantidad formaría la fase dispersa; sin embargo esto no es necesariamente el caso. En ocasiones, se presenta una tendencia a romperse o invertirse la emulsión, cuando se intenta aumentar el volumen relativo de la fase dispersa, más allá de cierto límite. Es así como la cuestión de cuál será el líquido disperso, se determina por consideraciones de tensión superficial, que se relaciona con la naturaleza del agente emulsionante.

La teoría más comúnmente aceptada, en relación con el tipo de emulsión es la de que la película de moléculas tenso-activas orientadas entre las dos fases de la emulsión se encuentra, ésta se considera como una tercera fase, que presenta distintas tensiones superficiales con cada uno de los líquidos que forman la emulsión. En el caso de las emulsiones agua-aceite, si la película tienen una mayor afinidad por el agua que por el aceite, su tensión superficial será más baja del lado del agua, que del lado del aceite. La película tenderá entonces a curvarse de forma tal que reduzca la tensión superficial total; es decir, formará una curva con la cara de baja tensión superficial en el exterior y la de alta tensión superficial en el interior, o lo que es lo mismo, se formarán glóbulos de aceite en el agua. Si la película tiene mayor afinidad por el aceite que por el agua, el efecto será inverso y tendremos una emulsión de agua en aceite [10].

En general los agentes tenso-activos fácilmente solubles en agua y escasamente solubles en los aceites, forman emulsiones del tipo aceite en agua, mientras que los más solubles en los aceites, forman emulsiones del tipo agua en aceite.

1.4 Emulsificante. Lecitina

Los fosfátidos se clasifican adecuadamente como agentes tenso-activos derivados de las grasas, aunque más bien son productos naturales, no manufacturados. Estructuralmente, consisten en glicéridos en los que un radical ácido graso ha sido reemplazado por ácido fosfórico. La lecitina es muy abundante en la yema de huevo y la soya; la palabra lecitina viene del griego *lekitos*, que significa yema de huevo.



La lecitina se utiliza como emulsificante en los helados y las mayonesas. (Los agentes emulsificantes son sustancias que ayudan a suspender las grasas en agua) [10].

La molécula de la lecitina tiene dos partes: la cabeza y la cola. En la cabeza se encuentran los grupos fosfato y colina, y en la cola las dos cadenas no polares de los ésteres de ácidos grasos. Esta estructura, que se muestra en la Figura 1.4.1, junto con su diagrama, es similar a la de un jabón, ya que en ella se puede observar una parte no polar, constituida por las cadenas carbonatadas, y una parte polar iónica, constituida por el grupo fosfato unido a la colina [11].

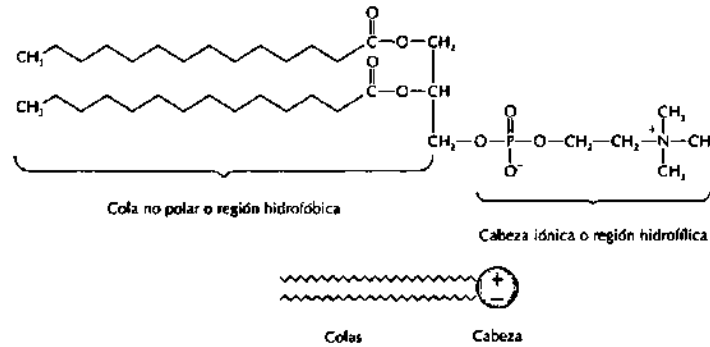


Figura 1.4.1 Estructura y diagrama de la fosfatidicolina o lecitina [11]

Contiene mayoritariamente ácido palmítico o ácido esteárico en la posición 1 (R1) y principalmente los ácidos grasos insaturados de 18 carbonos, oleico, linoleico o linolénico en la posición 2 (R2). En la Figura 1.4.2 se observa la posición de los ácidos grasos en la estructura de la lecitina.

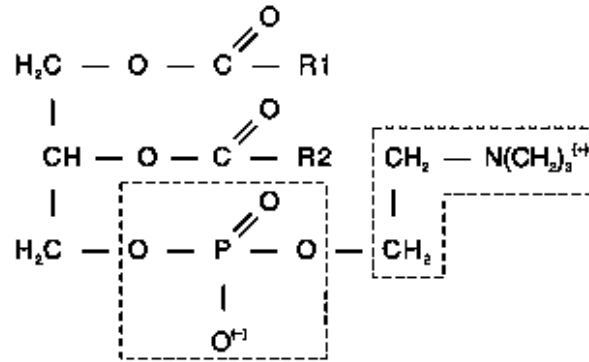


Figura 1.4.2 Posición de los ácidos grasos en la estructura de la fosfatildicolina o *lecitina* [12]

El grupo fosfato y la base nitrogenada interactúan con la fase acuosa, mientras que las cadenas hidrocarbonadas lo hacen con la lípida, con lo cual se logra el contacto físico más estrecho entre las fases inmiscibles [12].

La mayor parte de los fosfátidos comerciales son derivados del aceite de soja y se envasan como lecitina de soja, aunque también hay una pequeña producción de fosfátidos del aceite de maíz. En su forma usual, la lecitina de soja es un sólido, consistente, céreo, de color amarillo oscuro o pardo anaranjado, que contiene del 30 al 35% de aceite de soja libre. El resto está constituido en su mayor parte por fosfátidos, aunque también están presentes pequeñas porciones de esteroides, hidratos de carbono, glucósidos, etc.; puesto que la mezcla se separa por hidratación del aceite “crudo” y el único proceso posterior es el de separación del agua de hidratación y posiblemente un blanqueo, sin un fraccionamiento de la mezcla. Se dice que la lecitina de soja contiene además de la lecitina, fosfátidos del inositol. La lecitina comercial tiene un sabor característico y un olor que recuerda el del aceite “crudo” del que procede. Sin embargo, este olor y sabor no se detectan a las concentraciones a las que se usa la lecitina en los productos comestibles (normalmente inferior al 0.5%).

Las lecitinas comerciales son eficaces agentes emulsionantes y dispersantes oleo-solubles. Son comestibles y su uso más importante se da para la fabricación de confituras y como auxiliar en la preparación de chocolate. Funcionan como agentes



humectantes, que se añaden con frecuencia a los adhesivos, para evitar que éstos se adhieran insuficientemente a una u otra de las superficies. También se usan como agentes humedecedores para conseguir la adherencia entre los sólidos y las sustancias líquidas, en el momento en que éstas se aplican sobre un sólido. Un ejemplo de estos sistemas [sólido-líquido-solidificado] es el de las películas secas de pintura, los tejidos engrasados, los artículos de caucho, etc.

Se usa una cantidad considerable de lecitina en la industria del petróleo, como aditivo de los aceites lubricantes, para inhibir la formación de gomas. Es muy larga la lista de los distintos productos a los que se recomienda añadir lecitina e incluye diferentes cosméticos, preparados farmacéuticos, preparados para el tratamiento de los tejidos, compuestos para el tratamiento de los cueros, jabones y otros detergentes, adhesivos e insecticidas. El consumo actual de este subproducto en los Estados Unidos es aproximadamente de 3.9 millones de kg [12].

1.5 Solventes Orgánicos

1.5.1 Acetato de Etilo

Son compuestos orgánicos volátiles basados en el elemento químico carbono. Se utilizan solos o en combinación con otros agentes para disolver materias primas, productos o materiales residuales, utilizándose para la limpieza, para modificar la viscosidad, como agente tensoactivo, como plastificante, como conservante o como portador de otras sustancias que una vez depositadas, quedan fijadas evaporándose el disolvente. En general, los disolventes orgánicos son de uso corriente en las industrias para pegar, desengrasar, limpiar, plastificar y flexibilizar, pintar y lubricar.

Clasificación química de los Solventes Orgánicos:

La clasificación química de los disolventes se da por su grupo químico, en la Tabla 1.5.1 donde el acetato de etilo se encuentra dentro de la clasificación de los ésteres.

**Tabla 1.5.1 Clasificación Química de los Solventes Orgánicos [11]**

| Grupo Químico | Nombre de los Solventes |
|--------------------------|--|
| Aromáticos | Benceno, Tolueno, Xileno, Etilbenceno, Estireno |
| Hidrocarburos Clorinados | Tricloroetileno, Tetracloroetileno, Metilcloroformo (1,1,1-Tricloroetano) |
| Alcoholes | Alcohol Metílico, Alcohol Isopropílico, Alcohol Butílico |
| Éteres | Dietil Eter, 1, 4-Dioxano |
| Esteres | Acetato de metilo, Acetato de etilo, Acetato de butilo |
| Derivados del Glicol | Etilenglicol (Monoetil, Monometil, Monobutil Eter) |
| Clorofluorocarbonos | Fluorotriclometano (CFC-11), 1, 1, 2- Tr 1 Cloro 1,2,2- Trifluoroetano (CFC-113) |
| Misceláneas | n-Hexano, Disulfuro de Carbono, Dimetilformamida |

Los solventes industriales de mayor uso son los solventes de tricloroetileno, tetracloroetileno, los solventes de (tolueno, acetato de etilo y varias acetonas, el thíner destilados de petróleo, benceno, acetona, tricloroetileno, tetracloroetileno y los removedores de barniz o pintura (acetona, tolueno, benceno, cloruro de metileno).



1.5.2 Composición y usos de solventes

Los solventes constituyen un grupo heterogéneo de hidrocarburos volátiles derivados del petróleo y del gas cuyo punto de ebullición es bajo por lo que se evaporan al entrar en contacto con el aire. Su importancia y patrón de uso determinan su clasificación en: *solventes activos*, *cosolventes*, *solventes latentes*, y *diluyentes*.

Los *solventes activos* tienen como función disolver sustancias no hidrosolubles y para ello se requiere en primer lugar determinada viscosidad, contenido de sólidos en la solución y la velocidad a la que el solvente se evapora al aplicarse en el producto que interviene (acetona, acetato de etilo, acetato de butilo, thinner etc.)

Los *cosolventes* y los *solventes latentes* sirven para realzar la capacidad de las resinas, aunque al combinarse con los solventes activos, actúan como catalizadores del secado (metanol, n-butanol, etc.)

Los *diluyentes* son elementos químicos que se utilizan únicamente porque bajan los costos del producto que se esté aplicando, ya que en la mayoría de los casos no desarrollan ningún efecto solvente por sí mismos (heptano, benceno, tolueno, xileno, etc.). La Tabla 1.5.2 muestra una lista de la composición de algunos productos comunes elaborados con solventes.

**Tabla 1.5.2 Solventes de uso común [11]**

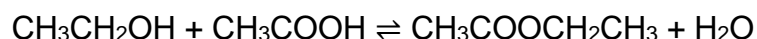
| PRODUCTOS | COMPOSICIÓN |
|--|---|
| Pegamentos y colas : Spray, aerosol, pinturas : | Tolueno y acetona Tolueno |
| Insecticidas, odorizantes: Desodorantes extintores Lacas para cabello Medicamentos | Diversos fluorocarbonos |
| Carburantes : Gasolina : Gas para encendedores : | Hidrocarburos alifático Tetraetilo de plomo Butano |
| Quitamanchas : Corrector tipográfico : Disolventes de pintura : Disolventes limpiadores : | 1,2 diclororopano Tricloroetano Hidrocarburos alifáticos Tolueno |

1.5.3 Acetato de Etilo

Es un éster de fórmula $\text{CH}_3\text{-COO-CH}_2\text{-CH}_3$. Su nombre antiguo es éter de vinagre, en alemán Essig-Äther, de donde proviene el término "esther" o éster. El acetato de etilo es un líquido incoloro, característico de los ésteres, no residual. Es miscible con hidrocarburos, cetonas, alcoholes y éteres y poco soluble en agua. Tiene una densidad de 0.9g/cm^3 y un punto de ebullición a los 77°C ; es un compuesto altamente inflamable ya que tiene un punto de ignición de 7°C .

1.5.4 Síntesis

La principal forma de sintetizar acetato de etilo es mediante la esterificación de Fischer, esterificación directa mediante ácido acético y etanol en presencia de un catalizador.

**Ec. 1**



Otro método de preparar ésteres es emplear no el ácido en sí, sino su cloruro, el etanoato de etilo se puede obtener por la acción del alcohol sobre el cloruro del ácido etanóico. Otro método de obtención, aunque no económicamente viable, consiste en hacer reaccionar las sales de plata de los ácidos con halogenuro de alquilo, el etanoato de etilo se puede preparar en presencia de etanoato de plata y yoduro de etilo. Es insoluble en agua y se disuelve con facilidad en disolventes orgánicos. Reacciona con el agua para formar ácido acético y etanol, una reacción que es catalizada por la presencia de ácidos.

1.5.5 Aplicaciones

- Producción de tintas de impresión para la industria gráfica.
- Producción de thiners y solventes de pinturas en industria de pinturas.
- En la industria de adhesivos y colas derivados de la celulosa.
- En la industria alimenticia, en productos de confitería, bebidas, dulces.
- En esencias artificiales de frutas.
- Remoción de sustancias resinosas en la industria del caucho.
- En la elaboración de cueros artificiales y para revestir y decorar artículos de cuero.
- Disolvente de compuestos utilizados para revestir y decorar objetos de cerámica.
- Solvente para la elaboración de varios compuestos explosivos.
- En la industria fotográfica, como solvente para la fabricación de películas a base de celulosa.
- Ingrediente de preparaciones cosméticas (perfumes, esmaltes, tónicos capilares) y farmacéutica.
- En la industria del papel, para la elaboración de papeles aprestados y para recubrir y decorar objetos de papel.



- En la industria textil, para la preparación de tejidos de lana para teñido, en procesos de limpieza y para la elaboración de textiles aprestados.
- Reactivo para la manufactura de pigmentos.
- En taxidermia entomológica para matar a los insectos para su conservación.[11]

1.6 Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico para mortero y hormigón (concreto), finamente molido, constituido esencialmente por óxidos de calcio con óxidos de silicio, aluminio y hierro, obtenidos por sinterización o fusión [13]. El cemento amasado con agua endurece tanto al aire como bajo agua, en la cual mantiene su resistencia; debe ser estable –mantener constancia de volumen- y alcanzar una resistencia mínima a compresión de 25 N/mm² a 28 días.

El cemento portland se obtiene del clínker de cemento portland (se forma tras calcinar caliza y arcilla a una temperatura que está entre 1350 y 1450 °C), al cual se le añade sulfato cálcico (yeso o anhidrita naturales, proporción de 5 a 10 % en masa). Los cementos con escorias (siderúrgicas de alto horno) contienen “trazas” (puzolana naturales y de origen volcánico) como aditivos [14].

1.6.1 Composición química del cemento

Los principales componentes del cemento son:

ALITA (Silicato tricálcico)

El silicato tricálcico es cuantitativamente el constituyente más importante del cemento portland, pero también lo es desde el punto de vista de las propiedades del cemento y en particular de la más importante de ellas: el desarrollo de las resistencias.



BELITA (Silicato bicálcico)

La belita se encuentra en pequeñas proporciones en los clínkeres con alto standard de cal. El desarrollo de su resistencia es lento, si bien a largo plazo llega a alcanzar resistencias tan grandes por lo menos como las de la alita.

FASE ALUMÍNICA

La fase alumínica posee una capacidad de reacción muy alta, la cual se incrementa aún más por la inclusión de álcalis. A fin de “frenar” la reacción de la fase alumínica al comienzo de la hidratación es preciso añadir algún sulfato (por ejemplo, yeso) para retardar el proceso de fraguado. Junto con la alita y la velita la fase alumínica puede contribuir a aumentar ligeramente la resistencia del cemento a corto plazo (a causa de su elevado calor de hidratación). No obstante sus propiedades hidráulicas intrínsecas son escasas.

FASE FERRÍTICA

La fase ferrítica no posee una composición química constante, sino que constituye un miembro de una serie de disoluciones sólidas (cristales mixtos). La composición de esta fase corresponde más o menos al compuesto ferroaluminato tetracálcico, en el caso del clínker de cemento portland. Ésta es la fase que comunica su color al cemento.

La fase ferrítica reacciona muy lentamente y carece de importancia significativa directa a efectos de las propiedades del cemento [14].

OTRAS FASES DEL CLÍNKER

La mayor parte de los clínkers contienen cal libre de CaO (cal no combinada) en proporción igual o menor de 2% en masa.

Algunos clínkers ricos en MgO pueden contener MgO libre (periclasa). A continuación se muestra la Tabla 1.6.1 con las composiciones químicas de las fases de un clínker de cemento portland.

**Tabla 1.6.1** Composición química de las fases de un clínker de cemento portland

| Compuesto | ALITA | BELITA | FASE ALÚMINICA | FASE FERRÍTICA |
|--------------------------------|-------|--------|----------------|----------------|
| CaO | 69.7 | 63.2 | 59.5 | 51.4 |
| SiO ₂ | 24.9 | 31.5 | 4.21 | 2.28 |
| Al ₂ O ₃ | 1.12 | 1.84 | 27.52 | 19.6 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.64 | 0.96 | 5.76 | 22.52 |
| MgO | 0.89 | 0.48 | 0.85 | 3.18 |
| K ₂ O | 0.19 | 0.75 | 0.66 | — |
| Na ₂ O | 0.06 | 0.19 | 0.25 | — |
| TiO ₂ | 0.16 | 0.24 | 0.48 | 1.6 |
| P ₂ O ₅ | — | 0.28 | — | — |

1.6.2 Hidratación de los cementos (fraguado, endurecimiento, resistencias)

La hidratación es un proceso en el cual el agua se combina con las sustancias que se hidratan. En la hidratación del cemento tiene lugar la consolidación, es decir, el paso de un sistema inicialmente líquido o plástico (en este caso la pasta de cemento) a un estado sólido (la pasta endurecida). En la práctica la consolidación tiene lugar en dos fases o etapas: la de fraguado y la de endurecimiento. Se produce primero el fraguado (rigidización), después de la cual queda un material sólido aunque todavía no resistente, el cual va tomando resistencia progresivamente en la segunda etapa del endurecimiento. El paso del fraguado al endurecimiento transcurre gradualmente [14].

En la hidratación, y por lo tanto en la consolidación de los cementos, tienen lugar simultánea y ó sucesivamente procesos de diversa naturaleza, los más importantes de los cuales son los siguientes:

- reacciones químicas, especialmente de hidratación y de hidrólisis;
- procesos de disolución y cristalización, en los cuales se produce la formación de nuevos compuestos hidratados de naturaleza geliforme o cristalina (las fases hidratadas), a partir de disoluciones sobresaturadas y por procesos topoquímicos;
- procesos interfaciales en los que las fuerzas de atracción entre superficies – adherencia- producen la ligazón de los constituyentes de la pasta de cemento y, en su caso del concreto.



Las reacciones de hidratación son exotérmicas. El desprendimiento de calor en el endurecimiento de un concreto llega a alcanzar, en condiciones adiabáticas, un máximo al cabo de 1 a 3 días, disminuyendo después. La cantidad de calor desprendido, en relación con el tiempo, depende del tipo de cemento, y en particular de las fases existentes en el mismo, de la eventual presencia de adiciones (escorias de alto horno, puzolanas) y de la finura. El resultado final de las reacciones de hidratación es un producto duro, de alta resistencia. La de la pasta endurecida es debida, en primer lugar, a su estructura interna en la cual intervienen decisivamente la configuración (forma y tamaño) de los productos de hidratación (las fases hidratadas), y la ordenación espacial de éstos, así como su grado de compacidad o densidad aparente (porosidad). El agua añadida, necesaria para la hidratación, se combina químicamente como tal con el agua de hidratación, formando hidróxidos. La cantidad de agua que se precisa para ello es aproximadamente de 30 % como máximo, referida a la masa de cemento (correspondiendo a una relación agua: cemento $a/c \leq 3$). Además de esta agua combinada químicamente hay otra agua físicamente unida (absorbida) en las grandísimas superficies de las fases hidratadas, la cual corresponde aproximadamente a una relación $a/c \leq 0.1$. Aún hay otra agua presente como agua capilar en los espacios vacíos de la pasta de cemento. Cuanto mayor es el contenido de esta agua capilar (la cual por evaporación deja libres los poros capilares), menor es la resistencia mecánica, la resistencia química y la resistencia al hielo de la pasta de cemento, ya que dichos poros aumentan su permeabilidad al agua. Esto es también aplicable a los morteros y concretos. La Figura 1.6.2 muestra las caídas de resistencia al aumentar la relación a/c [13].

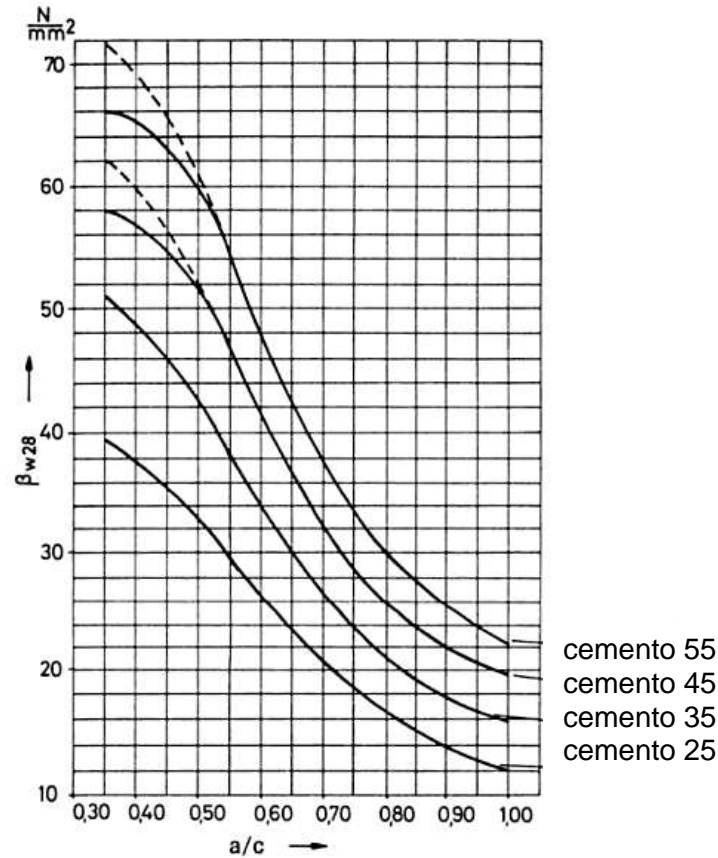


Figura 1.6.2 Relación entre la resistencia a la compresión a 28 días, la relación agua/cemento y la categoría resistente del cemento [Graff 1960]

La resistencia final de la pasta de cemento en condiciones normales de endurecimiento (a temperatura ordinaria y sin presión), en el caso más favorable puede llegar a alcanzar unos 200 N/mm^2 según experiencias de laboratorio. El factor más decisivamente influyente en el desarrollo de las resistencias es la porosidad capilar (y con ella la relación a/c y el grado alcanzado por la hidratación, así como el progreso de la misma), siendo factores de influencia secundaria la composición del cemento y las condiciones de endurecimiento del mismo. Esta resistencia final no se llega a alcanzar, en general, en condiciones prácticas reales [13].

En la práctica, las resistencias de los morteros (con agregados de tamaño ≤ 4 mm) y de los concretos (en general con agregados de tamaños < 16 mm, < 32 mm o < 63 mm), ejercen influencia, especialmente los siguientes factores:



- tipo y calidad del cemento;
- relación a/c (proporciones en masa);
- agregados (tipo, resistencia, forma, superficie, cantidad, distribución por tamaños –curva granulométrica);
- adiciones y aditivos, en su caso;
- compacidad (porosidad) y curado;
- temperatura y edad.

1.7 Concreto

Durante el siglo XXI, el concreto se ha convertido en el material de construcción más ampliamente utilizado en todo el mundo debido a su extraordinaria versatilidad en cuanto a forma (se puede moldear), función (uso estructural y no estructural) y economía, ya que la tecnología desarrollada a su alrededor hace posible que este material sea competente no sólo con las construcciones de piedra y madera, sino también con las del acero [14].

Su desarrollo se ha visto estrechamente vinculado al del “concreto armado” debido a que inicialmente se le concibió para fines estructurales, pues la asociación del concreto propiamente dicho con armaduras o varillas de acero forman un sólido único desde el punto de vista mecánico. El concreto ofrece, como las piedras naturales, una resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión y muy escasa a los de tracción (por lo general, su resistencia a la compresión); por lo tanto, es inadecuado para formar piezas que han de resistir tracciones o flexiones. Peor al disponer de varillas de acero en las zonas de tracción, se suple esta deficiencia, teniendo entonces una pieza resistente a la flexión. De manera que, el “concreto armado” es una piedra artificial que puede resistir esfuerzos de compresión, tracción y flexión, circunstancia que no se da en las piedras naturales. Por tal motivo, las propiedades y características del concreto se estudian con el fin de determinar el diseño de mezcla adecuado (proporcionamiento de sus ingredientes) para las condiciones especificadas en un proyecto dado.



1.7.1 Definición de concreto

El concreto u hormigón puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (Cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forman un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión [14].

1.7.2 Composición y definición de términos

De acuerdo con lo descrito en la definición de concreto, en la Figura 1.7.2 se esquematizan las proporciones, por volumen, de cada uno de los materiales que lo constituyen, con el objeto de dar una idea acerca de la incidencia que tienen las características y funciones de éstos, dentro de la masa, así como definir algunos términos que son de uso común.

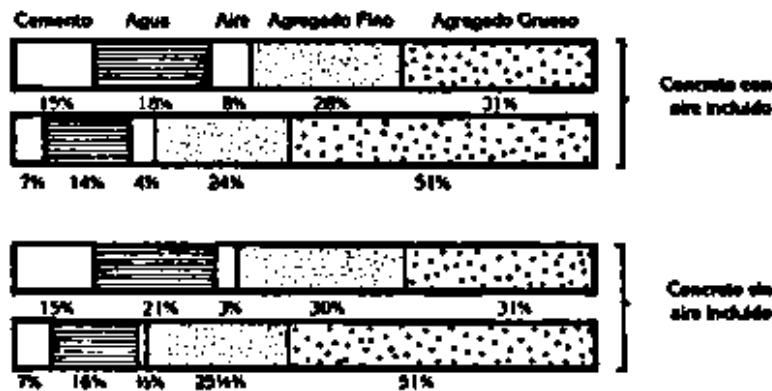


Figura 1.7.2 Componentes del concreto [13]

Pasta o pegante

El término pasta se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire (naturalmente atrapado o intencionalmente incluido) y aditivos (cuando son añadidos).

Mortero

Se refiere a la mezcla de pasta y agregado fino (arena), la cual es muy utilizada en la pega de ladrillos para hacer muros de mampostería o en el recubrimiento de éstos últimos, caso en el cual se le conoce como pañete, repello, resane o revoque.



Concreto

El mortero mezclado con agregado grueso (piedra), da como resultado el concreto u hormigón. Adicionalmente, cuando al concreto se agregan piedras de gran tamaño (pedrabola, rajón, mediazonga, etc.) cuyo diámetro es del orden de 20 cm o más se le conoce con el nombre de agregado precolocado, y más comúnmente como concreto ciclópeo [13].

1.7.3 Características y funciones de los componentes

El cemento que se utiliza, como ya se mencionó, es cemento portland hidráulico, el cual tiene propiedades tanto adhesivas como cohesivas, que le dan capacidad de aglutinar los agregados o áridos para conformar el concreto. Estas propiedades dependen de su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar.

Agua

La razón de que los cementos sean hidráulicos es que éstos tienen la propiedad de fragua y endurecer con el agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ella, de tal manera que el agua como material dentro del concreto es el elemento que hidrata las partículas de cemento y hace que éstas desarrollen sus propiedades aglutinantes.

Al mezclarse el agua con el cemento se produce la pasta, la cual puede ser más o menos diluida, según la cantidad de agua que se agregue. Al endurecer la pasta, como consecuencia del fraguado, parte del agua queda fija (agua de hidratación) en la estructura rígida de la pasta y el resto queda como agua evaporable.

Aire

Cuando el concreto se encuentra en proceso de mezclado, queda aire incluido dentro de la masa (aire naturalmente atrapado), el cual posteriormente es liberado por los procesos de compactación a que es sometido el concreto una vez que ha sido colocado. Sin embargo, como la compactación no es perfecta, queda siempre aire residual dentro de la masa endurecida. Por otra parte, en algunas ocasiones se



incluyen burbujas de aire, por medio de aditivos, con fines específicos, como se verá más adelante.

Funciones de la pasta de cemento

Cuando la mezcla se encuentra en estado plástico, la pasta actúa como lubricante de los agregados, comunicando fluidez a la mezcla, lo cual permite que la colocación y consolidación del concreto sean adecuadas, ya que un alto grado de confinamiento conduce a una mayor resistencia [14].

Cuando la mezcla se encuentra en estado sólido, la pasta de cemento obtura los espacios que hay entre las partículas al aglutinarse, reduciendo la permeabilidad del concreto evitando el desplazamiento de agua dentro de la masa endurecida, lo cual es crítico en estructuras hidráulicas o en concretos que estén expuestos a la acción de aguas agresivas que eventualmente puede degradar la estructura de la masa haciéndole perder resistencia.

Adicionalmente, la pasta fraguada endurecida en unión de los agregados contribuye a suministrar la resistencia mecánica característica a la compresión, lo cual depende de la llamada interfase agregado-pasta, o agregado matriz.

Agregados o áridos

Como agregados o áridos para concreto pueden tomarse en consideración todos aquellos materiales que, poseyendo una resistencia propia suficiente (resistencia del grano), no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico, es decir que son inertes y garantizan una adherencia suficiente con la pasta de cemento endurecida. Estos materiales pueden ser naturales o artificiales, dependiendo de su origen. La razón principal de la utilización de agregados dentro de una mezcla de concreto, es que éstos actúan como material de relleno, haciendo más económica la mezcla. Los agregados en combinación con la pasta fraguada, también proporcionan parte de la resistencia mecánica característica a la compresión, debido a que, como se mencionó anteriormente, éstos tienen una resistencia propia que aportan al concreto como masa endurecida [14].



Cuando la mezcla de concreto pasa del estado plástico al estado endurecido durante el proceso de fraguado, los agregados controlan los cambios volumétricos de la pasta, evitando que se generen agrietamientos por retracción plástica que puedan afectar la resistencia del concreto.

Aditivos

Desde mediados del siglo XX se ha desarrollado toda una tecnología sobre la utilización de los aditivos, que son materiales distintos al agua, los agregados y el cemento hidráulico que se utilizan como ingredientes en concretos y morteros y se añaden a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado. En términos de su función, éstos pueden ser reductores de agua, retardantes o acelerantes. Hay algunos otros, como los inclusores de aire, las puzolanas, los colorantes, etc [13].

Funciones de los aditivos

Pueden ser utilizados para modificar las propiedades del concreto de manera que lo hagan más adecuado para las condiciones de trabajo. Pero, también pueden ser usados por razones de orden económico, ya que permiten, en algunos casos, reducir los costos de fabricación del concreto.

Las emulsiones poliméricas han sido empleadas como aditivos en los morteros de reparación de edificaciones de concreto, puentes de concreto, como materiales de recubrimiento en carreteras y como materiales a prueba de agua que tienen una mayor durabilidad y han sido empleados en los Estados Unidos por más de 35 años [29].

1.7.4 Conceptos básicos

Las propiedades del concreto y del mortero se estudian primordialmente con la finalidad de determinar el diseño de la mezcla, el cual se define como el proceso para seleccionar los ingredientes adecuados y determinar sus cantidades relativas, con el objeto de producir, tan económicamente como sea posible, un concreto o un mortero con un mínimo de ciertas propiedades. De tal manera que los factores básicos en el diseño de una mezcla del concreto o de mortero son los siguientes:



- Economía
- Facilidad de colocación y consolidación
- Velocidad de fraguado
- Resistencia
- Durabilidad
- Impermeabilidad
- Peso unitario
- Estabilidad de volumen
- Apariencia adecuada

Estos factores o características requeridas están determinadas por el uso al que está destinado el concreto y por las condiciones esperadas en el momento de su colocación [14].

En éste trabajo se considera la alternativa del reciclaje, a fin de poder utilizar los desechos de poliestireno expandido post-consumo doméstico que normalmente serían enviados a contenedores de basura en la preparación de una emulsión con aplicación en los morteros de construcción.

1.7.5 Concreto Reciclado

Se entiende por concreto reciclado, a todos los agregados finos o gruesos que son obtenidos mediante procesos de demolición para su reutilización como materia prima en la fabricación de concretos estructurales, no estructurales y morteros.

Los residuos de construcción y demolición proceden en su mayor parte de derribos de edificios, de excedentes de materiales de construcción en obras y de pequeñas obras de reformas en viviendas o urbanizaciones [15].

1.8 Eco-Indicador

En cierto punto todo producto daña al medio ambiente. La materia prima debe ser extraída, el producto debe ser manufacturado, distribuido y empacado. Finalmente este debe ser eliminado. Además a menudo ocurren impactos ambientales debidos al consumo de energía por el uso de estos productos. Para evaluar el daño



ambiental de un producto se deben estudiar sus fases de ciclo de vida. A dicho análisis se le denomina *Análisis de Ciclo de Vida* [14].

Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida es un proceso objetivo para evaluar las cargas medioambientales asociadas a un producto proceso o actividad. Esto se lleva a cabo identificando la energía, materias utilizadas y los residuos de todo tipo de vertido al medio. El análisis incluye el estudio de ciclo de vida completo del producto, proceso o actividad, comprende las etapas de extracción y procesado de materias primas; manufactura, transporte y distribución; uso, reutilización y mantenimiento; reciclaje y destino final de la fracción de residuos [16].

Para realizar un análisis de ciclo de vida primero se debe realizar un inventario de las cantidades de cada compuesto que participa para el proceso o actividad y las emisiones por cada gas de efecto invernadero (GEI) que de esta deriven.

Los factores de emisión se presentan generalmente como la emisión de algún GEI o de equivalente total de CO₂ por unidad de contenido energético del combustible. También pueden existir factores de emisión por unidad física de combustible, o factores más específicos ligados a procesos, tales como emisión por kilómetro recorrido de un tipo de vehículo o por cantidad de producto obtenido en un proceso químico.

El “GHG Protocol”, es una alianza multipartita de empresas, organizaciones no gubernamentales (ONGs), gobiernos y otras entidades, convocada por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI), ONG radicada en Estados Unidos, y el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD), coalición integrada por 170 empresas internacionales, con sede en Ginebra, Suiza que pone a disposición una serie de herramientas que facilitan el cálculo de emisiones [17]. Estas herramientas se encuentran disponibles para ciertos sectores productivos específicos y vienen tabulados en bases de datos de la GHP.

Una vez realizado el inventario de emisiones mediante el análisis de ciclo de vida se incluye un método de ponderación para asignar una puntuación que se calcula



para el impacto ambiental total basado en los efectos calculados, a ello es a lo que se conoce como Eco-Indicador.

El Eco-Indicador de un material o proceso es, pues, un número que indica el impacto ambiental de un material o proceso, con base a datos de la evaluación de un ciclo de vida. Cuanto mayor sea el indicador, mayor será el impacto ambiental. Existen diversos tipos de Eco-Indicadores que identifican diferentes tipos de efectos, para este caso de estudio utilizaremos el Eco-Indicador 99 que se describe en el apartado 1.8.1.

1.8.1 Eco-Indicador 99

El Eco-Indicador 99 refiere su definición a tres tipos de daños ambientales; salud humana, calidad del ecosistema y recursos [18].

- **Salud Humana**

Se incluyen el número y duración de enfermedades, los años de vida perdidos por muerte prematura por causas ambientales. Los efectos que se abarcan son: el cambio climático, el agotamiento de la capa de ozono, efectos carcinogénicos, efectos respiratorios y la radiación ionizante (nuclear).

- **Calidad del ecosistema**

Se incluye el efecto sobre diversidad de las especies, especialmente para plantas vasculares y organismos inferiores. Los efectos incluidos son eco toxicidad, acidificación, eutrofización y uso de la suelo.

- **Recursos**

Se incluye el excedente energético necesario para extraer los recursos minerales y fósiles de menor calidad. Bajo la categoría de uso de suelo se considera el agotamiento de los recursos agrícolas y recursos áridos como arena y grava.



1.9 JUSTIFICACIÓN

La acumulación actual de residuos sólidos en basureros municipales y la contaminación urbana es una creciente problemática que trae consecuencias ambientales. La importancia del desarrollo de procesos sustentables donde se utilicen materiales de recicló, provee de beneficios ecológicos y también de carácter social en la generación de nuevas industrias asociadas a la obtención de utilidades y generación de empleos.

La utilización del poliestireno de reúso se propone en este trabajo para su aplicación en una de las áreas de desarrollo más importantes en nuestro país que es el de la construcción: en México 72 de cada 100 viviendas tienen techo de losa o concreto, y se ha observado un crecimiento en el número de viviendas construidas de 1995 a 2013 en un 75%. Lo cual nos indica de que más del 50% de las viviendas son construidas con materiales de cemento, y debido al crecimiento poblacional el desarrollo de nuevos materiales que mejoren el desempeño de los concretos, por ser los más utilizados, es una necesidad.

1.10 HIPÓTESIS

Una emulsión preparada a partir de poliestireno expandido post-consumo posee las características de los plásticos, que al ser adicionada como aditivo a una mezcla de mortero o concreto mejorará las propiedades mecánicas del material.

1.11 OBJETIVO

Proponer una ruta alternativa para reúso el residuo del poliestireno expandido mediante la preparación de una emulsión a partir de éste polímero de deshecho.

Objetivos Específicos

- Determinar los siguientes parámetros; viscosidad, densidad y tensión superficial de la emulsión.
- Caracterizar mediante espectroscopia IR.
- Adicionar la emulsión al mortero y realizar pruebas de tiempo de fraguado para mezclas de morteros.
- Caracterizar mediante Microscopía Electrónica de Barrido de muestras de morteros.



- Adicionar la emulsión al concreto y realizar pruebas de resistencia a la compresión con distintas concentraciones de emulsión.
- Determinar el impacto ambiental de uso de esta emulsión mediante un análisis de ciclo de vida.



2. ANTECEDENTES

De acuerdo a resultados de la literatura revisados, EPS post-consumo puede ser reciclado de muchas maneras una vez que éste ha terminado su vida útil. La elección del método de reciclado está basado en consideraciones técnicas, ambientales y económicas. Nouchi *et al* (1998) [19] reportaron que existen tres métodos de reciclar el EPS. El primero es el reciclado del material, en el cual primeramente el volumen del EPS es reducido calentándolo, disolviéndolo o friccionando, y después, el PS es recuperado en pellets o lingotes para ser reusado como materia prima, material de construcción, etc. La segunda es el reciclaje químico, que está encaminado a recuperar el monómero de estireno para reusarlo como fuente química. La tercera es el reciclaje térmico, un efectivo método para el EPS post-consumo, donde éste es utilizado para generación de energía a través de la combustión. Desarrollaron un sistema de reciclaje para EPS post-consumo utilizando un solvente natural. En su estudio proponen el uso de aceite de naranja y d-limoneno como agente de reducción. La planta de reciclaje puede reproducir PS con las mismas propiedades mecánicas que PS nuevo. El d-limoneno puede ser reusado al menos diez veces. Siguiendo ésta línea de reciclaje Schmidt *et al.* (2011) [20] reciclaron EPS post-consumo mediante la disolución con acetona y d-limoneno, para después fundirse y posteriormente pasar por un proceso de extrusión e inyección y finalmente producir tarjetas de circuitos integrados a las cuales se les realizaron pruebas flexurales y análisis de microscopía electrónica de barrido.

Amianti y Botaro (2008) [21] realizaron un nuevo método de reciclaje de EPS post-consumo. En su estudio prepararon una muestra y la impregnaron con la disolución de una mezcla de EPS, acetona y ciclohexano. Esta investigación se llevó a cabo para identificar un nuevo material de fácil aplicación, económico y eficaz, como parte de concreto impregnado con poliestireno (CIP), a fin de reducir la permeabilidad de superficies de concreto pre-fabricado, por lo tanto, la reducción de la tasa de degradación y el aumento de la durabilidad general.



Los tratamientos térmicos son utilizados para modificar propiedades de los materiales además de endurecerlos o suavizarlos. Estos procesos modifican el comportamiento de los EPS de una manera beneficiosa para maximizar vida de servicio, por ejemplo, propiedades de resistencia, densidad, o algún otro tipo de propiedades deseables, por ejemplo, absorción de agua y conductividad térmica. Los tratamientos térmicos se utilizan en muchas industrias para mejorar las propiedades mecánicas de los desechos. Sin embargo, no había ningún estudio relacionado con mejorar las propiedades del EPS con tratamiento de calor. La mayoría de los EPS de residuos limpios se han reciclado eficazmente. Por otro lado, EPS de residuos sucios, con su baja tasa de reciclaje; son arrojados a los vertederos municipales. Miskolczi *et al* (2006) [22] estudiaron la degradación del EPS post-consumo en combustibles como el diésel. Se utilizó el intervalo de temperatura de 410-450 en °C el proceso. Ellos encontraron que los rendimientos de gas y líquidos aumentaron con el aumento de temperatura de la degradación, y casi un agrietamiento completo podría alcanzarse a 450 °C.

Yanhong *et al* (2001) [23] estudiaron la estabilidad térmica, física y química de perlas de EPS. Sugirieron que, la estabilidad térmica aumenta, obviamente, con el grado de reticulación y a alta temperatura antes de la descomposición térmica se llevó a cabo por encima de 350 °C. Por lo tanto, algunos autores sugieren que la pérdida en la fuerza puede ser minimizada mediante el tratamiento previo de los agregados de EPS.

Pocos estudios se han realizado sobre el uso de EPS modificado químicamente en la mezcla de concreto. Por ejemplo, la resistencia a los ataques químicos para el concreto que contienen EPS tratados químicamente fue estudiado por Ravinrarajah and Tuck (1994) [24] anteriormente informaron que estos hormigones no se vieron afectados por el hidróxido de calcio saturado, sulfato de sodio al 10% y soluciones de sulfato de amonio al 10%. Fue demostrado que dichos agregados de EPS hacen al concreto más duradero cuando se somete a ciclos de congelación-descongelación o de ataques por sulfatos.



Babu y Babu (2003) [25] informaron que los residuos vírgenes de EPS se pueden utilizar como agregados ultra livianos. Es adecuada su aplicación para el desarrollo de concretos estructurales y no estructurales variando su porcentaje en volumen en el mortero o concreto. Más estudios realizados por Babu y Babu (2004) [26] atribuyeron la pérdida de resistencia de concreto con agregados de EPS a la falta de adhesión entre los agregados de EPS y la pasta; porque los agregados de EPS tienen casi cero fuerza.

Abdulkadir y Ramazan (2008) [27] propusieron una técnica utilizando un tratamiento de calor que reduce el volumen del EPS post-consumo alrededor de 20 veces del original. Después de la modificación, la densidad, conductividad térmica y fuerza de compresión del EPS post-consumo aumentó, obteniendo un nuevo material llamado EPS modificado post-consumo.

Por otra parte existen investigaciones de la producción de concreto de bajo peso utilizando EPS, poliuretano y otros materiales plásticos utilizados como adiciones en las mezclas de concreto. Kan A y Demirbog (2009) [28] desarrollaron una técnica para lograr el reciclado de los residuos de EPS, con el fin de utilizar EPS térmicamente modificados (MEPS) como agregados en el concreto.

Otra de las más recientes aportaciones de investigación sobre morteros de bajo peso resultan tener una baja densidad y baja conductividad térmica. Ferrandiz-Mas *et al* (2014) [29] desarrollaron un mortero de bajo peso con buenas propiedades termoaislantes tras incorporar como agregado EPS post-consumo y cenizas de lodo de papel. Este mortero puede tener aplicación como enyesante y resanante.

Chen y Liu (2007) [30] realizaron estudios de los efectos en el curado y en las propiedades mecánicas de morteros con pellets de EPS como agregados, adicionando látex de estireno butadieno. El EPS de post-consumo fue utilizado para obtener una mezcla con sílice-caucho natural reforzado por Vaikathusseril Sekharan *et al.* (2012) [31] obtuvieron mejores propiedad mecánicas de la mezcla modificada con EPS post-consumo que la mezcla sílice-caucho natural virgen.



Existen algunas investigaciones que han realizado una revisión exhaustiva de los cambios en las propiedades del mortero de cemento al agregar polímeros, tales como el aumento en la rigidez y la flexión. Chakraborty *et al* [32] estudiaron la adición de la fibra natural de yute; realizaron varias mezclas con diferentes cantidades de la fibra tratada en emulsión, y encontró la cantidad óptima de fibra que provee de mejores propiedades mecánicas al mortero.

Ukrainczyk *et al* [33] utilizaron un látex de goma de estieno-butadieno para la fabricación de un mortero de reparación, y agregando a las mezclas una pequeña cantidad de carbonato de litio para servir de acelerador. Finalmente compara la mezcla de mortero modificada con látex y la no modificada encontrando un incremento en las propiedades flexurales.

El poliestireno ha tenido uso dentro de la obtención de composites. Poletto *et al* (2011) [34] evaluaron el potencial de un composite compuesto por EPS de post-consumo y harina de madera. Desarrollaron una metodología para el reciclaje termo-mecánico del EPS post-consumo y mostraron resultados de que las propiedades mecánicas disminuyen al disminuir la adición de harina de madera.

3. METODOLOGÍA

La estrategia metodológica a seguir se dividió tres etapas principales que se presentan en el siguiente diagrama (Figura 3).

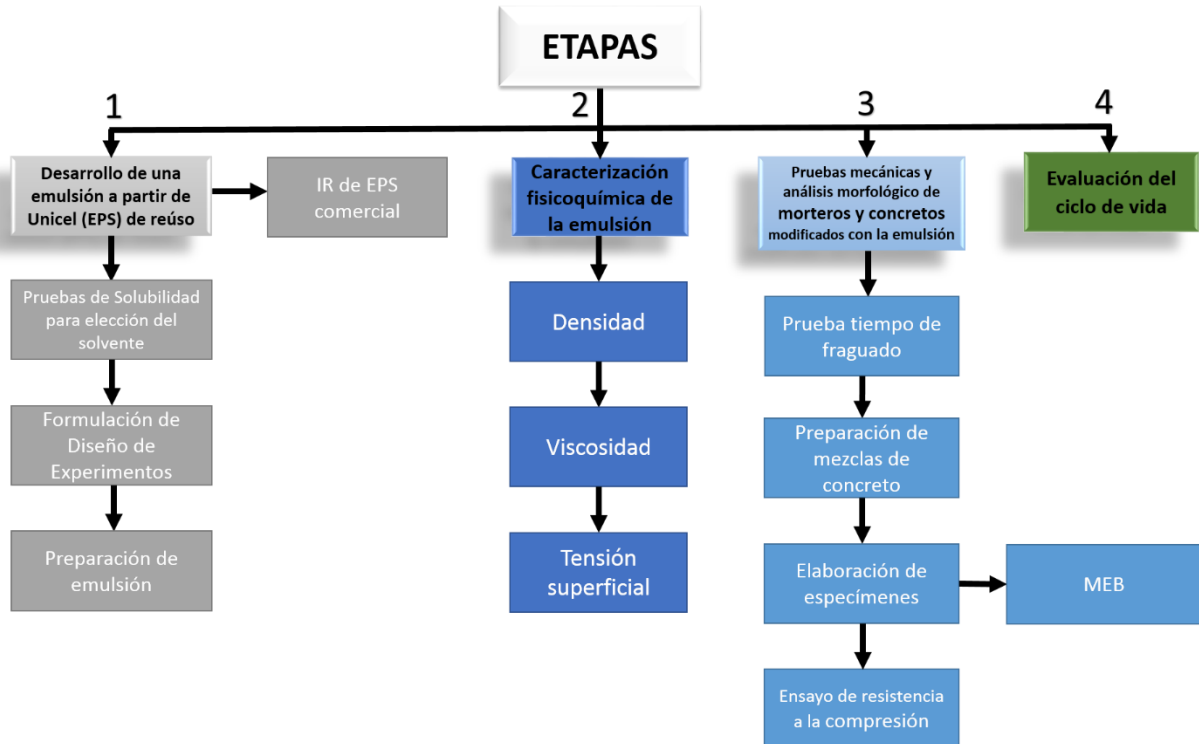


Figura 3 Diagrama de etapas de la metodología

3.1 Pruebas de solubilidad para elección del solvente

Se tomaron en cuenta los siguientes solventes según su parámetro de solubilidad: **acetato de butilo**, **acetato de etilo**, **cloruro de metileno**, **tolueno** y **xileno**; se agregó 1gr de poliestireno fragmentado por 5 ml de solvente, así pues, se midió el tiempo necesario para que el poliestireno se disolviera en cada uno de ellos.

3.2 Materiales y reactivos

Para la preparación de la emulsión:

- Poliestireno expandido post-consumo con clasificación de plásticos número 6 PS.
- Acetato de Etilo



- Lecitina de Soya
- Agua destilada

Para la fabricación del mortero y concreto:

- Agregados pétreos: Arena fina (4mm aprox.) y agregado grueso (grava)
- Concreto de recicló
- Cemento tipo CPC 30R
- Agua

3.2.1 Recolección, fragmentación y lavado del poliestireno expandido post-consumo

Se recolectará el poliestireno expandido post-consumo de clasificación de plástico no.6 de ciudad universitaria de la UMSNH, éste material será lavado y secado a temperatura ambiente para posteriormente ser trozado en pequeñas partes como las que se muestra en la Figura 3.2.1.



Figura 3.2.1 Poliestireno expandido lavado y fragmentado

3.3 Formulación de Diseño de Experimentos

Se analizarán las variables de la experimentación utilizando las cantidades de materia prima y porcentajes en peso en un diseño experimental de tipo 2^k . Donde los límites mínimos y máximos de los porcentajes en peso establecidos para cada componente fueron los siguientes: contenido de agua 15 y 25 %, de poliestireno fue del 25 y 30% y para la lecitina de soya de 4 y 8 % respectivamente. Estas variables se muestran en la Tabla 3.3, y el diagrama de las variables de experimentación en la Figura 3.3.



TABLA 3.3 Arreglo de variables para análisis ANOVA

| %w Agua (C) | | | | |
|----------------------|---|----|---|-----------|
| 15 | | 25 | | |
| %w Emulsificante (B) | | | | |
| %w EPS (A) | 4 | 8 | 4 | 8 |
| 25 | 8 | 10 | 5 | <u>30</u> |
| 30 | 1 | 2 | 1 | 1 |

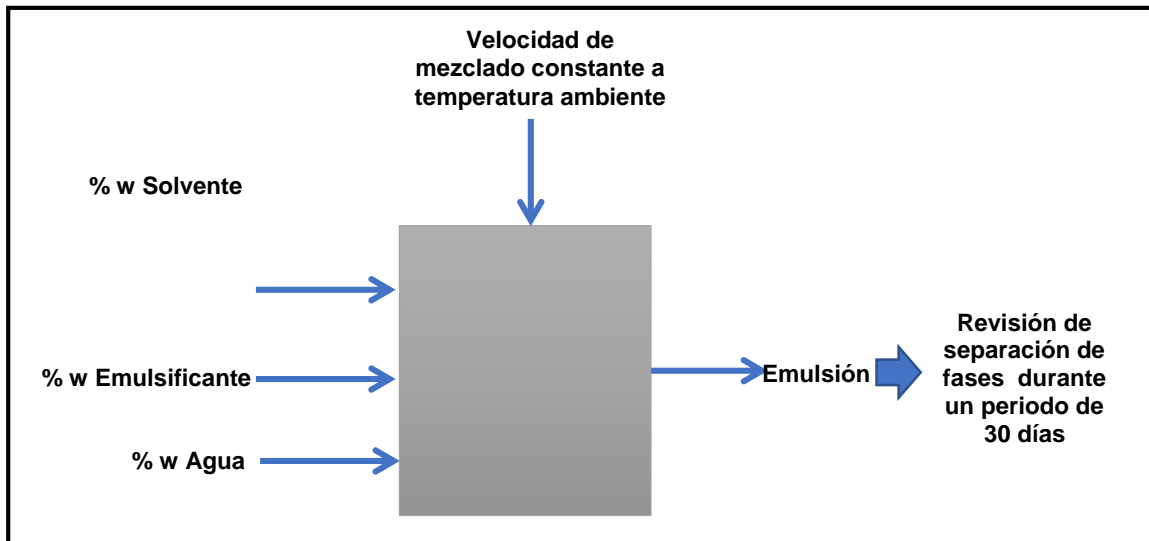


Figura 3.3 Diagrama de diseño de experimento

La Separación de fases a partir del día 30 fue la variable de salida que permitió concluir la estabilidad de la emulsión. Con este dato se ubicó la composición óptima de la mezcla sin que hubiese separación de los componentes.

3.4 Elaboración de la emulsión

Se agregaron los siguientes reactivos en el su correspondiente orden: poliestireno disuelto en solvente, agente surfactante y agua. La emulsión se preparará agitando los tres componentes anteriormente mencionados durante 2 minutos en un emulsificador.

Las proporciones para la elaboración de la emulsión se tomaron en base al diseño de experimentos:

- ✓ Poliestireno post-consumo disuelto en solvente
- ✓ Lecitina de soya
- Manteniendo constante la agitación de mezclado

Se monitorearon las emulsiones durante el transcurso 30 días para evaluar la estabilidad de las mismas y verificar la existencia de separación entre las fases. En la Figura 3.4 se muestra el procedimiento de la preparación de la emulsión.

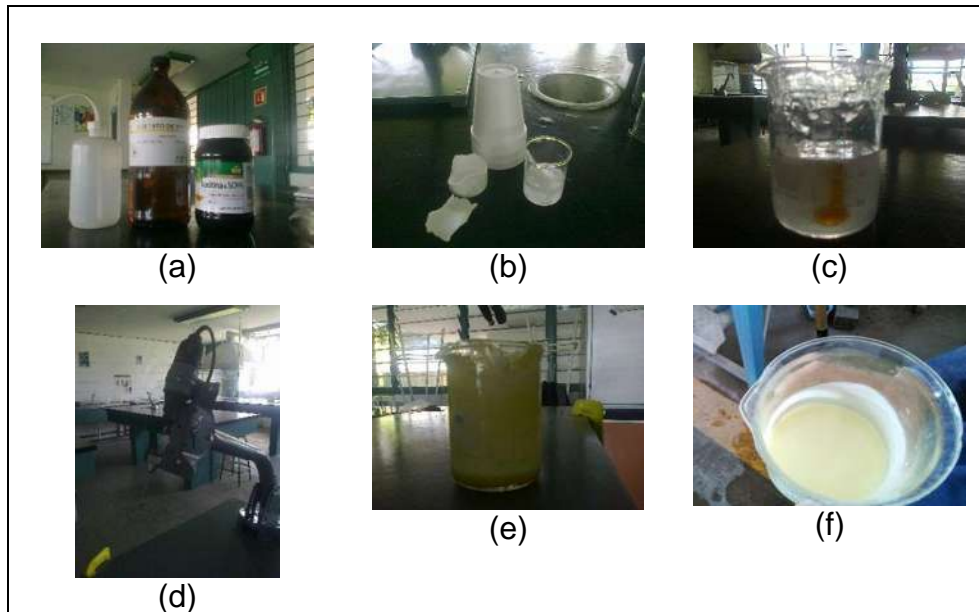


Figura 3.4 Procedimiento de elaboración de emulsión (a) Reactivos, (b) Disolución del poliestireno, (c) Adición de emulsificante, (d) Mezcladora, (e) y (f) Apariencia de emulsión.



3.5 Pruebas realizadas con las muestras de emulsión

3.5.1 Espectroscopia de Infrarrojo

La determinación de la presencia de los grupos funcionales en la suspensión se efectuó por espectroscopía de infrarrojo en el espectrofotómetro IR, BRUKER TENSOR27 del IIMM-UMSNH, en los modos de transmitancia y reflectancia total atenuada (ATR-IR). Para el análisis de transmitancia se fabricó una pastilla de polvos de la muestra, embebidos en una matriz de KBr (muestras de PS). Para el estudio de ATR-IR, los polvos de la muestra se depositaron directamente en el portamuestras del espectrómetro (muestras de emulsión).

3.5.2 Densidad

Se realizó la medición usando el método del picnómetro (Figura 3.5.2), obteniendo una densidad de 1.5g/cm^3 a 19°C .



Figura 3.5.2 Medición de densidad

3.5.3 Viscosidad

En UN viscosímetro modelo BROOKFIELD DV-II + PRO se determinó la viscosidad utilizando el eje estándar de acero inoxidable del equipo #3 con una velocidad de torque promedio de 63.1% y temperatura de 19.2°C , tal como lo muestra la Figura 3.5.3.

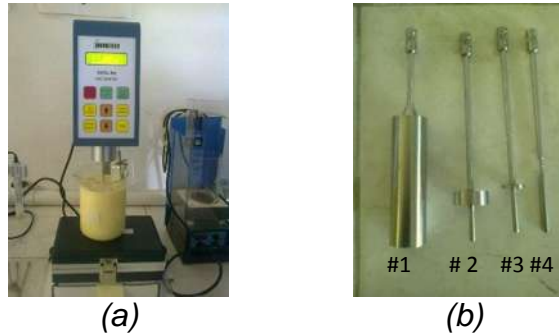


Figura 3.5.3 Prueba de viscosidad. (a)Viscosímetro Brookfield DV-II+PRO.
(b) Ejes intercambiables de acero inoxidable.

3.5.4 Tensión Superficial. Método de capilar.

Se utilizaron 2 pipetas Pasteur y un tubo de ensaye. Se llenó el tubo de ensaye con emulsión y se procedió a introducir las pipetas Pasteur, una de ellas fungiendo como capilar y la otra como tubo de desprendimiento, ambas se colocaron de tal manera que quedaran al ras de la emulsión. Se marcó en el tubo de ensaye la altura de la emulsión y se tomó la temperatura a la cual se encontraba el fluido fue de, 19°C.

Así pues, se introdujo una cantidad de aire a través del tubo de desprendimiento soplando cuidadosamente por el mismo, obligando a la emulsión a entrar al capilar y posteriormente dando un tiempo para que ésta llegara a su posición de equilibrio y se marcó dicha altura final. Esto se muestra en la Figura 3.5.4.

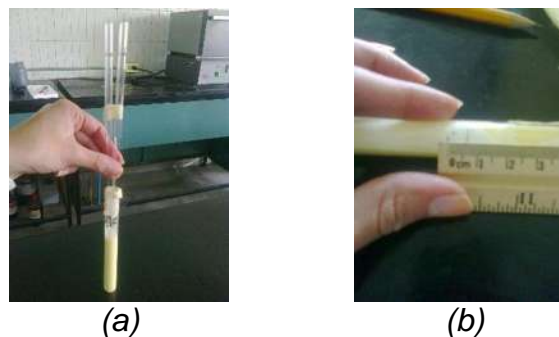


Figura 3.5.4 (a) Instrumento de Medición, (b) Medición de altura.



La ley de Jurin define la altura que se alcanza cuando se equilibra el peso de la columna de líquido y la fuerza de ascensión por capilaridad. La altura h en metros de una columna líquida está dada por la ecuación:

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho gr} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

- γ tensión superficial interfacial (N/m)
- θ ángulo de contacto
- ρ densidad del líquido (kg/m^3)
- g aceleración debida a la gravedad (m/s^2)
- r radio del tubo (m)

Como θ es aproximadamente igual a cero, entonces $\cos \theta = 1$

$$\gamma = \frac{1}{2} r h \rho g \quad \text{Ec.3}$$

3.6 Preparación de mezclas de cemento

Se diseñaron las mezclas de concreto para obtener la resistencia a la compresión de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, en una máquina de ensayo de tipo hidráulico-mecánico del laboratorio de materiales de la FIC-UMSNH en base a la norma [35]; incluyendo las siguientes: testigo (TES), mezcla modificada con emulsión al 1% peso (TR-EM 1%) y al 4% peso (TR-EM 4%), mezcla con concreto reciclado (TES-CR) y mezcla con concreto reciclado y emulsión al 1% peso (CR-EM 1%) Y 4% peso (CR-EM 4%).

3.7 Elaboración de especímenes de concreto

Se utilizó el método de ensayo cumpliendo con la norma mexicana NMX-C-085-ONNCCE "Método de mezclado mecánico de pastas y morteros de cementantes hidráulicos". Posteriormente se siguió la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE "Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos", la cual establecen el procedimiento de elaboración y curado de las probetas.

De manera tal que, como se observa en la Figura 3.7 (a), se comienza con el mezclado de los polvos (arena, grava y cemento), para posteriormente mezclar con

agua(Figura 3.7 (b)), y obtener una pasta homogénea, (Figura 3.7 (c) y (d)); se realiza también una medición de la temperatura de la mezcla monitoreando que entre dentro de un rango de 10° a 32° C como límites máximo y mínimo (Figura 3.7 (e)). En la Figura 3.7 (f) se muestra la emulsión que paso seguido es adicionada, Figura 3.7 (g). Finalmente se vierte la mezcla en los moldes de tamaño de 150 x 300 mm, Figura 3.7 (h). Los cilindros permanecieron en los moldes durante un tiempo de 24 h, Figura 3.7 (i). Al cumplir ésta edad los especímenes se sumergieron en agua saturada de cal en los tanques de almacenamiento mostrado en la Figura 3.7 (j) [35].



Figura 3.7 Esquema cronológico de elaboración de probetas de concreto;
(a) Mezclado de arena grava y cemento, (b) Adición de agua, (c)



Componentes mezclados, (d) Mezclado con palas, (e) medición de temperatura, (f) Emulsión, (g) Adición de emulsión a la mezcla, (h) Distribución de mezclas para probetas cilíndricas, (i) Especímenes desmoldados , (l) Especímenes almacenados.

3.8 Pruebas a realizadas con las muestras y especímenes de mortero/concreto modificado con emulsión

3.8.1 Determinación del tiempo de Fraguado

Con base a la Norma Mexicana NMX-C-177-1997-ONNCCE se determinó el tiempo de fraguado de una mezcla de cemento con adiciones de emulsión que fueron del 0.5% al 9% en volumen del mortero.

El equipo utilizado para determinar la resistencia a la penetración fue el penetrómetro de mesa, una varilla de compactación y un cronómetro. El cual se presenta en la Figura 3.8.1.



Figura 3.8.1 Determinación de tiempo de fraguado.

3.8.2 Ensayo de resistencia a la compresión

Se determinó la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto modificado cumpliendo con las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE [35]. Ésta considera el procedimiento para realizar la ruptura del espécimen así como las cargas aplicadas y edades de ensayo, así como también los cálculos y expresión de los resultados.

Se registró la carga máxima indicada por el equipo y se calcula la resistencia a la compresión en N (kgf) dividiendo dicha carga entre el área de la sección transversal del espécimen utilizando la siguiente fórmula:



$$R = \frac{C_{\text{máx}}}{A}$$

Ec. 4

Donde:

$C_{\text{máx}}$ es la carga máxima en N (kgf)

R es la resistencia a la compresión

A es el área de la sección transversal del espécimen

Se realizaron 6 tipos diferentes de mezclas que se llevaron a una edad de ensayo de 7, 28 y 45 días. Su nomenclatura es la siguiente:

TES Testigo

TES-CR Concreto de reciclo

TR-EM 1% Emulsión al 1% en peso

TR-EM 4% Emulsión al 4% en peso

CR-EM 1% Concreto de reciclo con emulsión al 1% en peso

CR-EM 4% Concreto de reciclo con emulsión al 4% en peso

Utilizando la siguiente relación, se obtuvo una tabla comparativa entre el porcentaje de aumento o disminución en la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas con respecto a la mezcla testigo:

$$\% \text{ aumento o disminución } R = \frac{R_{\text{mezcla a comparar}} - R_{\text{mezcla testigo}}}{R_{\text{mezcla testigo}}} \times 100 \quad \text{Ec. 5}$$

3.9 Caracterización de las muestras de mortero mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Se analizaron a través de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) 5 muestras de mortero con diferentes concentraciones de emulsión tal como lo muestra la Tabla 3.9 a continuación presentada.

**Tabla 3.9** *Nomenclatura de la muestras analizadas por MEB.*

| MUESTRA DE MORTERO | %vol de emulsión |
|-------------------------------|-----------------------------|
| M-1 | 0 |
| M-2 | 1 |
| M-3 | 2 |
| M-5 | 4 |
| M-10 | 9 |

3.10 Evaluación de Ciclo de Vida

3.10.1 Objetivo

El objetivo de esta evaluación es generar un análisis de evaluación de ciclo de vida que permitirá realizar la comparación entre 7 rutas de producción de concreto, con los resultados es posible incrementar el valor al de la ruta con menor impacto ambiental (IA).

3.10.2 Alcance

Para el alcance se contempló el diagrama de flujo de la producción del concreto, la cual se muestra en la Figura 3.10.2, la cual consta de dos pasos principales, uno el del mezclado en seco y el segundo el mezclado con los líquidos, en ambas etapas hay entradas y salidas. En la primera etapa hay 3 entradas representadas por las letras A, B Y C, cada una puede ser uno de los productos mostrados en la Tabla 3.10.2 dependiendo de la ruta que se esté considerando, pero solo para 4 de las 7rutas el producto D existe siendo la emulsión a diferente concentración (desde la ruta 3 a la 6).

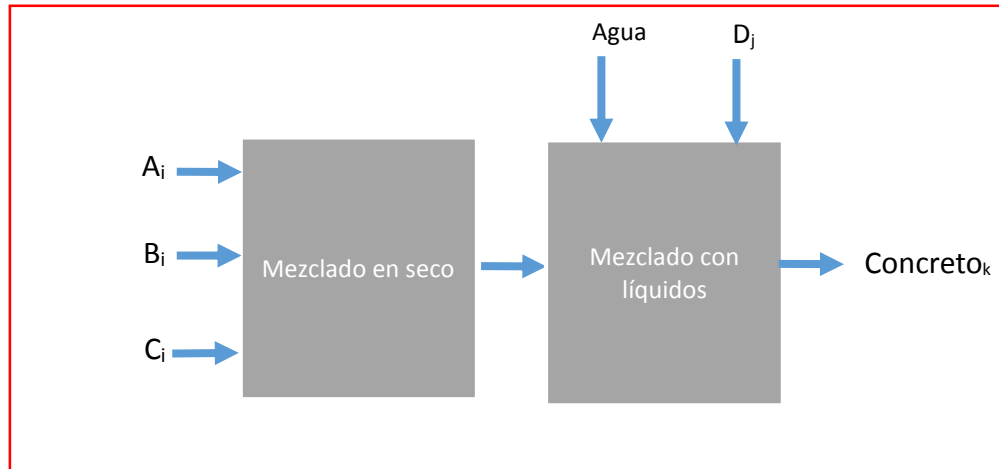


Figura 3.10.2 Diagrama del proceso de producción para la producción del concreto

Tabla 3.10.2 Entradas en las rutas

| Ruta(k) | Componentes(A _i , B _i , C _i) |
|---------|--|
| 1 | Cemento, arena y grava |
| 2 | Cemento, arena y concreto de recicló |
| 3 | Cemento, arena y grava más Emulsión 1% |
| 4 | Cemento, arena y grava más Emulsión 4% |
| 5 | Cemento, arena y concreto de recicló más Emulsión 1% |
| 6 | Cemento, arena y concreto de recicló más Emulsión 4% |

3.10.3 Análisis del Inventario

Para el inventario se tomó como objetivo de producción 1 m³ de concreto para las 6 rutas, la Tabla 3.10.3 y muestra la cantidad de cada compuesto involucrado en el proceso de producción.



Tabla 3.10.3 *Inventario de compuestos utilizados para la producción del concreto*

| Compuesto | Ruta | | | | | |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Cemento | 427,083 | 450 | 427,083 | 427,083 | 450 | 450 |
| Arena | 675,04 | 795,29 | 675,04 | 675,04 | 795,29 | 795,29 |
| Grava | 949,402 | - | 949 | 949 | - | - |
| Concreto de reciclo | - | 657,894 | - | - | 657,894 | 657,894 |
| Agua | 175,104 | 184,5 | 175,04 | 175,04 | 184,5 | 184,5 |
| Emulsión | - | - | 4,271 | 17,083 | 4,5 | 18 |



4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados correspondientes a las diferentes etapas mostradas anteriormente en el apartado de metodología.

4.1 Prueba de solubilidad y elección del mejor solvente

Se realizó una prueba de solubilidad de tiempo de disolución con la selección preliminar de solventes que tienen parámetro de solubilidad cercano al del PS. Esto se presenta en la Figura 4.1.

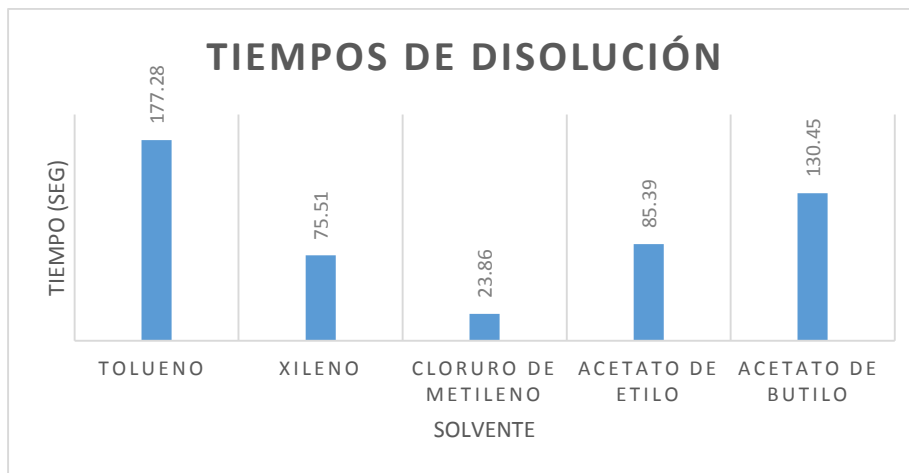


Figura 4.1 *Tiempos de disolución con diferentes solventes*

Para poder elegir el solvente menos contaminante con el medio ambiente se tomó en cuenta su nivel de toxicidad al medio ambiente y a la salud basándonos en la NFPA (National Fire Protection Association) en la Tabla 4.1 se muestra el código de seguridad de cada uno de ellos.

**Tabla 4.1** Código de Seguridad NFPA de solventes

| SOLVENTE | CÓDIGO NFPA | | | CASOS ESPECIALES |
|---------------------|----------------|--------|-------------|------------------|
| | INFLAMABILIDAD | *SALUD | REACTIVIDAD | |
| Tolueno | 3 | 2 | 0 | --- |
| Xileno | 3 | 2 | 0 | --- |
| Cloruro de Metileno | 0 | 2 | 0 | --- |
| Acetato de Etilo | 3 | 1 | 0 | --- |
| Acetato de Butilo | 3 | 1 | 0 | --- |

Inflamabilidad: 0. No arde. 1. Debe precalentarse para arder sobre los 93°C. 2. Ignición al calentarse normalmente debajo de los 93°C. 3. Ignición a temperaturas normales, debajo de los 37°C. 4. Extremadamente inflamable, arde debajo de los 25°C.

***Salud:** 0. Material corriente. 1. Ligeramente peligroso. 2. Peligroso .3. Muy peligroso. 4. Demasiado Peligroso.

Reactividad: 0. Estable normalmente. 1. Inestable si se calienta. 2. Posibilidad de cambio químico violento. 3. Puede explotar por golpe fuerte o calor. 4. Puede explotar.

El mejor solvente para utilizar en nuestro caso de estudio es el acetato de etilo, por sus propiedades de solubilidad, baja toxicidad y costo.

4.2 Análisis de Varianza (ANOVA). Composición de la emulsión.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para tres factores donde se evaluó como variable de salida la cantidad de días que la emulsión permaneció estable. Los resultados de dicho análisis ANOVA Se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2** *Tabla ANOVA*

| Fuente | Suma de Cuadrados | gl | Media Cuadrática | F | Significancia |
|----------------|--------------------------|-----------|-------------------------|----------|----------------------|
| SCA | 128 | 1 | 128 | 161.4 | 0.05 |
| SCB | 42 | 1 | 42 | | |
| SCC | 42 | 1 | 42 | | |
| SC(AB) | 201 | 1 | 11.5 | | |
| SC(BC) | 183 | 1 | 61.5 | | |
| SC(AC) | 216 | 1 | 41.5 | | |
| SC(ABC) | 836.5 | 1 | 74 | | |
| ERROR | 1477 | 1 | 1 | | |
| TOTAL | 171.5 | 7 | | | |

Con este análisis, se tiene evidencia suficiente para concluir que los tres factores contribuyen en cambios en la estabilidad de la emulsión con respecto al tiempo en días con un nivel de significancia del 0.05 y un nivel de confianza del 95%. Por lo que cualquier cambio de concentración en cualquiera de los tres componentes, (agua, polímero o emulsificante) pueden afectar directamente en la estabilidad de la emulsión.

4.3 Elección de la mejor composición de la emulsión

Se realizaron diferentes emulsiones con diferentes concentraciones de cada uno de los componentes, y finalmente al transcurrir 30 días de haber sido elaborado, se verificó que no existiera separación entre las fases. Así pues, se eligió como la mejor emulsión aquella que tuvo la composición en peso mostrada en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 *Composición final de la emulsión*

| Compuesto | % peso |
|------------------|---------------|
| EPS | 25 |
| Acetato de Etilo | 41.7 |
| Lecitina de Soya | 8.3 |
| Agua | 25 |



4.4 Caracterización de materia prima y emulsión. Espectroscopía de Infrarrojo.

4.4.1 Espectroscopía IR de materia prima

Dado que en el proyecto se utilizaron materiales comerciales, se analizó una muestra de vasos de PS y de placas de PS con la finalidad de verificar que la materia prima a utilizar tuviera las bandas de excitación características del espectro IR del PS. La Figura 4.3.1 muestra la espectro IR de los vaso y placas de PS.

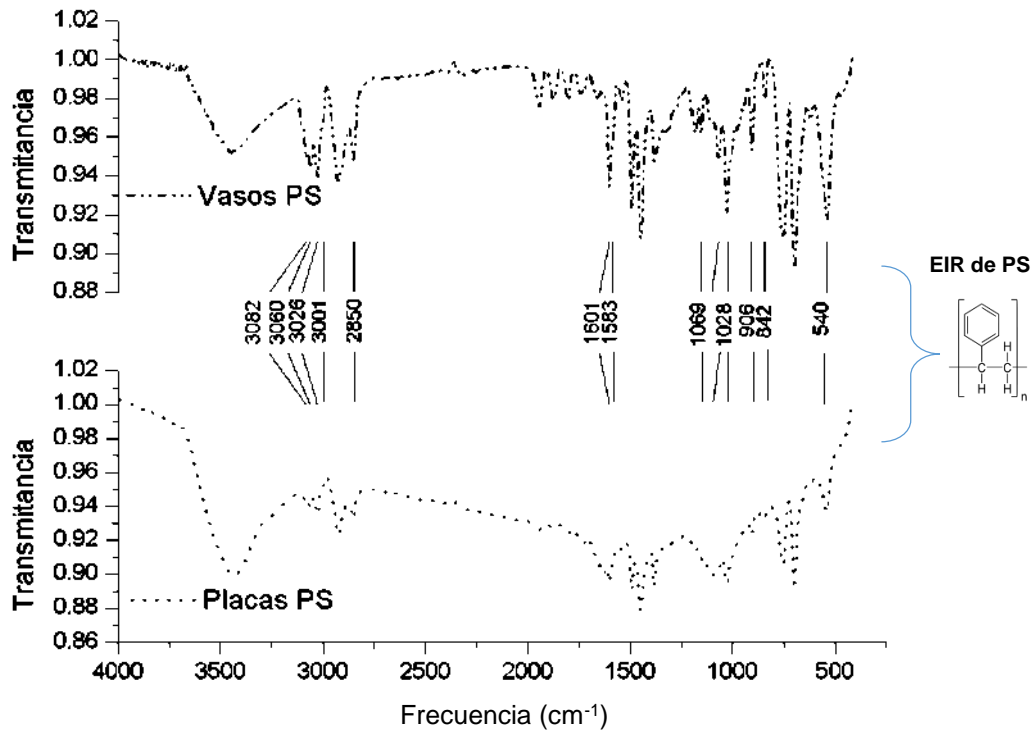


Figura 4.3.1 Espectroscopía IR de vasos y placas de PS. Bandas de excitación características de PS.

La espectroscopia IR de vasos y placas de PS (Figura 4.3.1) presenta las bandas de excitación características del PS en frecuencias que van desde 540 hasta 3082. Lo que comprueba que estos productos comerciales tienen en su composición, PS y es posible utilizarlos como materia prima para elaborar la emulsión.



4.4.2 Espectroscopía IR de emulsión

Mediante un análisis de espectroscopia IR, Etsuo Sakai and Jun Sugita [36], establecieron que aditivos poliméricos poseen grupos funcionales que son los responsables de incrementar la propiedad de adhesión.

Los aditivos con contenido de polímero estireno proveen a las mezclas de cemento un mejor desempeño en sus propiedades de adhesión ya que forman una película interfacial y superficial de polímero en el concreto modificado que aumenta la adherencia de este al estar en contacto con superficies de otros concretos. En base a esta información y a una espectroscopía IR de la emulsión se puede verificar la existencia de dichos grupos funcionales, que se muestra en la Figura 4.4.2.

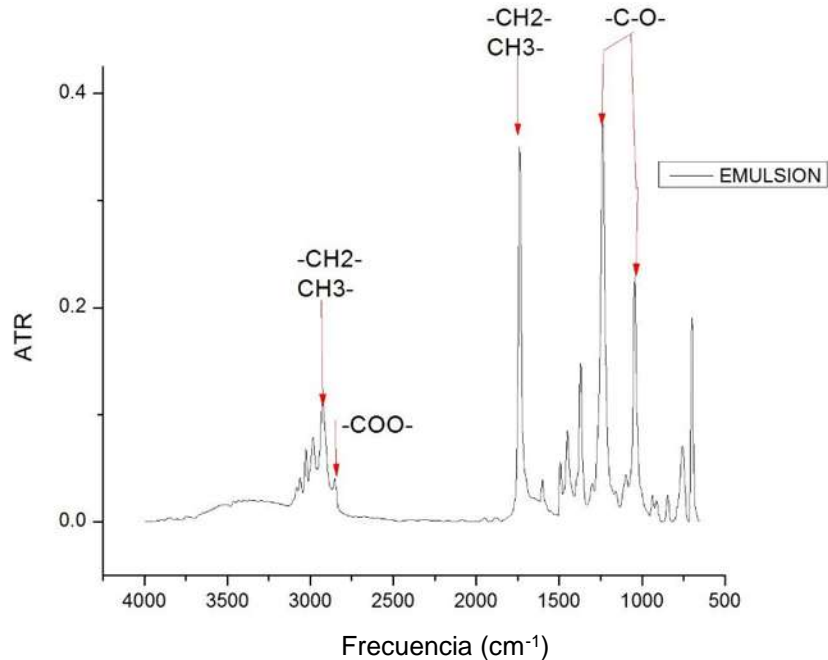


Figura 4.4.2 Espectroscopia IR de emulsión. Grupos funcionales que aumentan adhesión.

El espectro de la emulsión muestra la presencia de los grupos COO⁻, -CH₂-CH₃-, y C-O que corresponden al polímero de poliestireno.

4.5 Viscosidad de la emulsión

Se realizaron 3 mediciones bajo las mismas condiciones para verificar la precisión de la prueba de las cuales se calculó un promedio dando como resultado una viscosidad de 23.66 cp. Los resultados se muestran en la Tabla 4.5.

TABLA 4.5 Medición de viscosidad

| MEDICIÓN DE VISCOSIDAD | |
|------------------------|-----------------|
| No. De Medición | viscosidad (cp) |
| 1 | 23.5 |
| 2 | 23.6 |
| 3 | 23.9 |
| PROMEDIO | 23.66 |

4.6 Tensión Superficial

La interacción superficial entre líquido-superficie se indica a partir del valor del ángulo formado entre la emulsión y el vidrio del tubo de ensaye. La prueba experimental realizada resultó en un ángulo de contacto menor a 90° , lo que nos indica que la emulsión moja al vidrio, esto comprueba su propiedad de mojabilidad. La Figura 4.5 muestra el comportamiento de la emulsión.

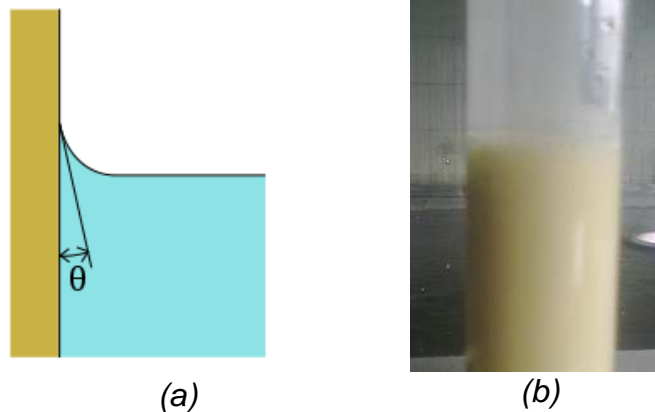


Figura 4.5 (a) Ejemplo de ángulo θ menor de 90° (b) Acercamiento de comportamiento de emulsión en el capilar formando un ángulo aproximado a 0° .



El radio del capilar tiene una medida de $0.05 \text{ mm} = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$, la gravedad un valor de 9.8 m/s^2 , la densidad de la emulsión es de $1.5 \text{ g/cm}^3 = 1500 \text{ kg/m}^3$ y la altura promedio de 3 mediciones fue de $0.4 \text{ mm} = 1.4 \times 10^{-3}$

$$\begin{aligned} \gamma_{emulsión} &= \frac{1}{2} (5 \times 10^{-5} \text{ m}) (4 \times 10^{-4} \text{ m}) \left(1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 1.47 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}} \right) \\ &= 147 \frac{\text{dina}}{\text{cm}} \end{aligned}$$

Es posible utilizar pinturas o recubrimientos en superficies de concreto o mortero cuando el valor de tensión superficial se encuentra por arriba de las 24 dinas/cm (*Especificaciones para recubrimientos Comex*), por lo tanto la emulsión tiene un buen desempeño comparado con otros recubrimientos en el mercado.

4.7 Tiempo de Fraguado

La determinación de tiempo de fraguado puede emplearse para determinar los efectos de variables, tales como la temperatura, cemento, diseño de mezclas, aditivos, modificadores del tiempo de fraguado y características del endurecimiento del concreto. En este caso se emplea con la finalidad de saber la cantidad adecuada de emulsión que se debe a agregar a la mezcla de mortero [37].

El tiempo de fraguado inicial (límite de manejabilidad) es el tiempo que transcurre, a partir del momento del contacto inicial del cemento con el agua, hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 25 kg/cm^2 . El tiempo de fraguado final es el tiempo que transcurre, a partir del momento que el cemento entra en contacto con el agua, hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 280.7 kg/cm^2 .

A partir del ensayo número 8 no se tomó medición alguna por encontrarse estos tiempos fuera de la norma. Estos valores obtenidos son mostrados en la Tabla 4.7.



Tabla 4.7 Lectura de datos de tiempos de fraguado

| Muestra | % vol emulsión | Tiempo Inicial de Fraguado (h) | Tiempo Final de Fraguado (h) | Tiempo Total (h) |
|---------|----------------|--------------------------------|------------------------------|------------------|
| 1 | 0 | 5.3667 | 3.45 | 8.8167 |
| 2 | 1 | 6.6 | 3.35 | 9.95 |
| 3 | 2 | 6.8833 | 4.3333 | 11.2166 |
| 4 | 3 | 6.95 | 4.35 | 11.3 |
| 5 | 4 | 6.6667 | 5.8333 | 12.5 |
| 6 | 5 | 6.3667 | 6.3 | 12.6667 |
| 7 | 6 | 8.9 | 5.1 | 14 |
| 8 | 7 | 9.0667 | --- | --- |
| 9 | 8 | 9.3 | --- | --- |
| 10 | 9 | 9.05 | --- | --- |

Al graficar los datos de la Tabla 4.7 obtuvimos la gráfica que se muestra en la Figura 4.7.1.

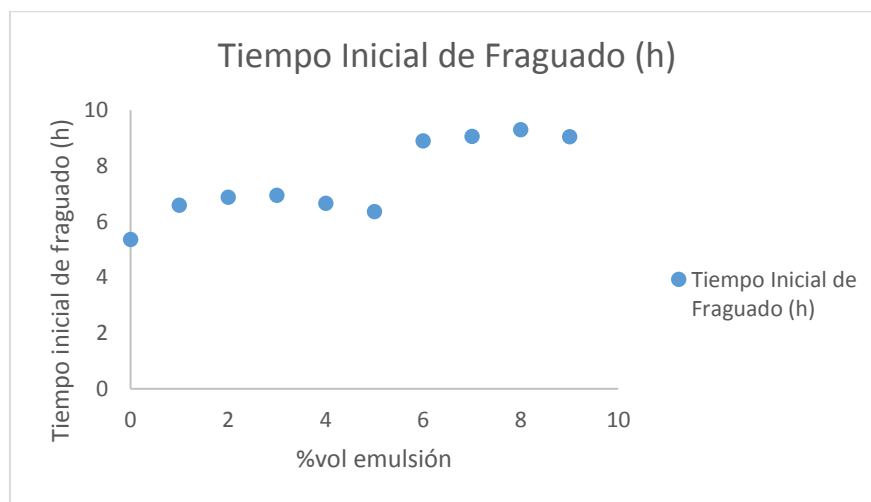


Figura 4.7.1 Tiempo inicial de fraguado vs % volumen de emulsión

El comportamiento de las muestras 1 a la 6 cae dentro de un tiempo inicial de fraguado no mayor a 7 horas, tal como lo especifica la Norma Mexicana NMX-C-



177-1997 ONNCCE, de la Industria de la Construcción. Tomando la norma en consideración, las concentraciones posibles a adicionar en mezclas de mortero serían aquellas que no pasen del 5% en volumen de emulsión.

Es claro al observar el comportamiento del tiempo total de fraguado con respecto al incremento de la concentración de emulsión en la mezcla de mortero en la Figura 4.7.2.

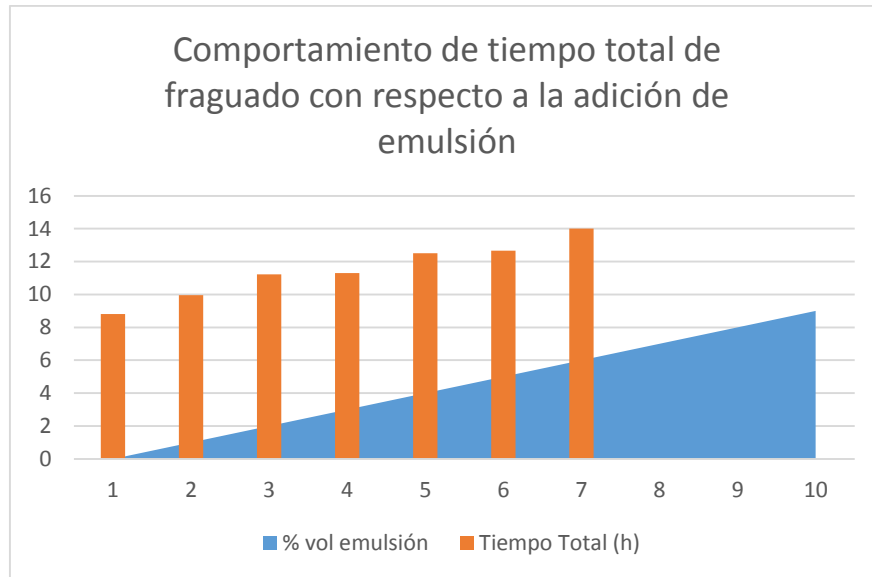


Figura 4.7.2 Comportamiento de adición de emulsión con respecto al tiempo total de fraguado

El tiempo de fraguado total se ve directamente incrementado con respecto al aumento de concentración de emulsión presente en la mezcla, por lo que es factible decir que la presencia de emulsión en los morteros actúa como retardante del tiempo de fraguado.

4.8 Resistencia a la compresión

Se realizaron 6 tipos diferentes de mezclas que se llevaron a una edad de ensayo de 7, 28 y 45 días. Para cada una de estas mezclas se realizaron 3 ensayos, tal y como lo establece la Norma Mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2010. Los resultados de las pruebas de resistencia a partir de cilindros moldeados se observan en la Tabla 4.8.1.

**Tabla 4.8.1** Cargas máximas soportadas por los especímenes (kgf).

| EDAD/ MEZCLA | TES-FL | TES-CR- FL | TR-EM 1% | TR-EM 4% | CR-EM 1% | CR-EM 4% |
|-----------------|--------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 7 | 22060 | 24700 | 19515 | 17513 | 21591 | 20443 |
| | 22149 | 23895 | 17813 | 19831 | 18721 | 20231 |
| | 30551 | | 18473 | 18556 | 19826 | 20203 |
| 28 | 30312 | 32172 | 19747 | | 26042 | 25851 |
| | 28596 | 31208 | 23049 | | 26329 | 27562 |
| | 24827 | 31270 | 24034 | | 26620 | 28655 |
| 45 | 22411 | 34665 | 26056 | 25173 | 26143 | 28512 |
| | 30804 | 37362 | 26249 | 26721 | 27380 | 29736 |
| | 26914 | 34686 | 25626 | 21260 | 27594 | 25471 |

Estos resultados fueron promediados y el valor promedio para cada mezcla y edades se muestra en la Tabla 4.8.2.

Tabla 4.8.2 Cargas máximas promedio soportadas por los especímenes (kgf)

| EDAD/ MEZCLA | TES | TES-CR | TR-EM 1% | TR-EM 4% | CR-EM 1% | CR-EM 4% |
|-----------------|-----------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 7 | 22077.5 | 24297.5 | 18600.333 | 18633.333 | 20046 | 20292.333 |
| 28 | 27911.666 | 31550 | 22276.666 | | 26330.333 | 27356 |
| 45 | 26709.666 | 35571 | 25977 | 24384.666 | 27039 | 27906.333 |

Los resultados de las cargas máximas soportadas por los especímenes sirvieron para calcular la resistencia a la compresión, la cual considera el área de las probetas (78.56 cm²), y para ello se empleó la Ecuación 6.

$$R = \frac{C_{\text{máx}}}{A}$$

Ec. 6



Resultando así los valores mostrados en la Tabla 4.8.3.

Tabla 4.8.3 Resistencia a la compresión (kgf/cm²)

| EDAD/ MEZCLA | TES (kgf/cm ²) | TES-CR | TR-EM 1% | TR-EM 4% | CR-EM 1% | CR-EM 4% |
|-----------------|-------------------------------|---------|----------|----------|-------------|-------------|
| 7 | 281.099 | 309.365 | 236.826 | 237.246 | 255.233 | 258.370 |
| 28 | 355.382 | 401.707 | 283.635 | | 335.248 | 348.307 |
| 45 | 340.078 | 452.904 | 330.749 | 310.475 | 344.271 | 355.314 |

Utilizando la Ecuación 5, obtuvimos una tabla comparativa entre el porcentaje de aumento o disminución en la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas con respecto a la mezcla testigo que se muestran a continuación en la Tabla 4.8.4.

Tabla 4.8.4 Porcentaje de aumento o disminución de la resistencia a la compresión con respecto al testigo

| EDAD/ MEZCLA | TES (kgf/cm ²) | % TES-CR | %TR-EM 1% | %TR-EM 4% | %CR-EM 1% | %CR-EM 4% |
|-----------------|-------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 7 | 281.099 | 10.0554 | 15.749 | 15.600 | -9.201 | -8.085 |
| 28 | 355.382 | 13.0355 | -10.25 | | -5.665 | -1.990 |
| 45 | 340.078 | 33.176 | -2.74307 | -8.704 | 1.233 | 4.480 |

Estos valores sirven para realizar una comparación entre las resistencias a la compresión de las mezclas que se están analizando y que podemos observar en las Figuras 4.8.1, 4.8.2 y 4.8.3, para las diferentes edades de 7, 28 y 45 días respectivamente.

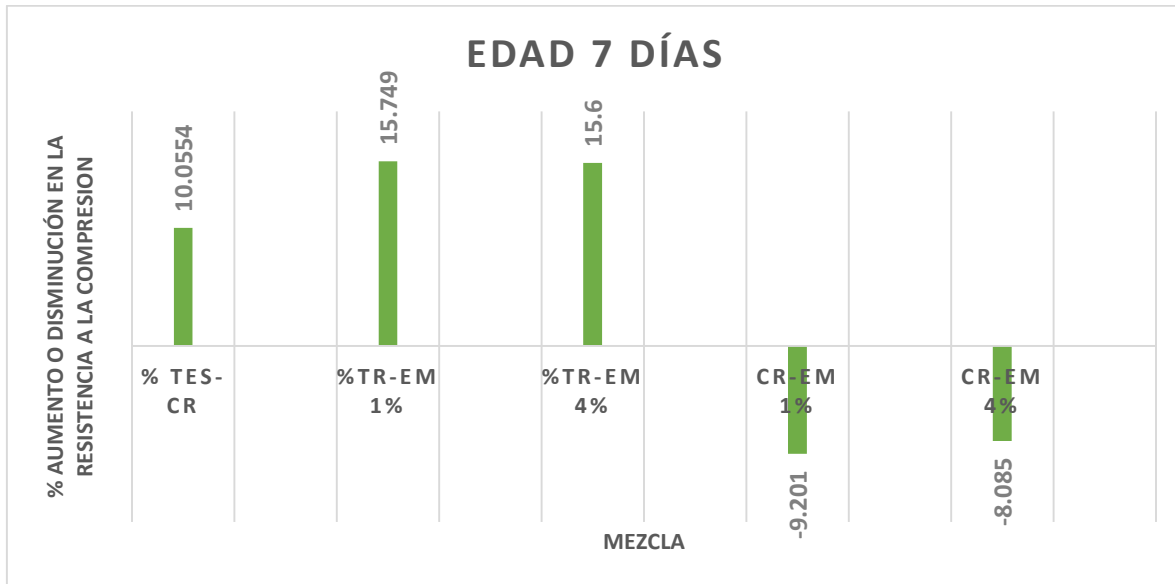


Figura 4.8.1 Aumento/Disminución de resistencia a la compresión comparada con la mezcla testigo. Edad 7 días.

Al cumplir la edad de ensayo de 7 días, los especímenes de las 4 mezclas con emulsión presentaron una menor resistencia a la compresión, principalmente aquellas que solo contenían emulsión (CR-EM 1 Y 4%), dicha disminución se dio por el orden de entre 15% a 16% con respecto a la mezcla testigo. La reducción fue aproximadamente del 9% para aquellas mezclas con emulsión y concreto de reciclado (TR-EM 1 y 4%). El que la disminución haya sido menor en las muestras con concreto de reciclado puede ser atribuido a que el concreto de reciclado tiene cierto porcentaje de cemento sin reaccionar, y éste al ponerse en contacto con agua reacciona e incrementa la resistencia a la compresión. Esto lo podemos observar más claramente en el caso de la mezcla TES-CR, que aumenta su resistencia a la compresión en un 10% con respecto a la muestra testigo.

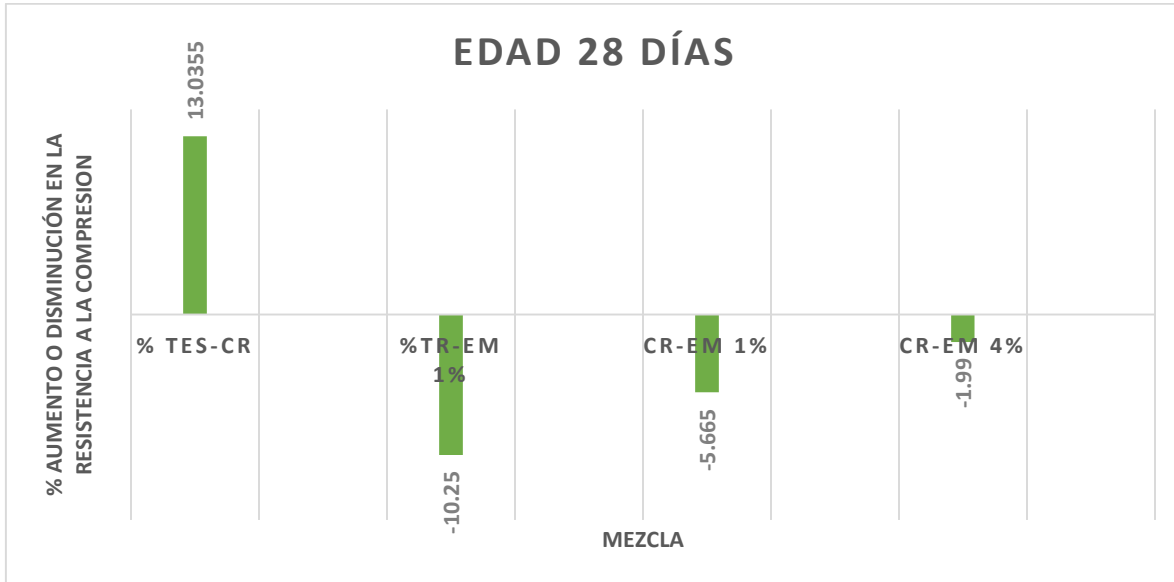


Figura 4.8.2 Aumento/Disminución de resistencia a la compresión comparada con la mezcla testigo. Edad 28 días.

Al transcurrir 28 días, como era de esperarse, el cemento siguió reaccionando y ganando resistencia, lo que aumentó el porcentaje en todas las mezclas, teniendo una disminución de aproximadamente el 10% para muestras con emulsión y de 6 a 2 % aproximadamente en las muestras con concreto de reciclado. La resistencia en la mezcla que tiene concreto de reciclado TES-CR aumentó a 13% con respecto a la muestra testigo.

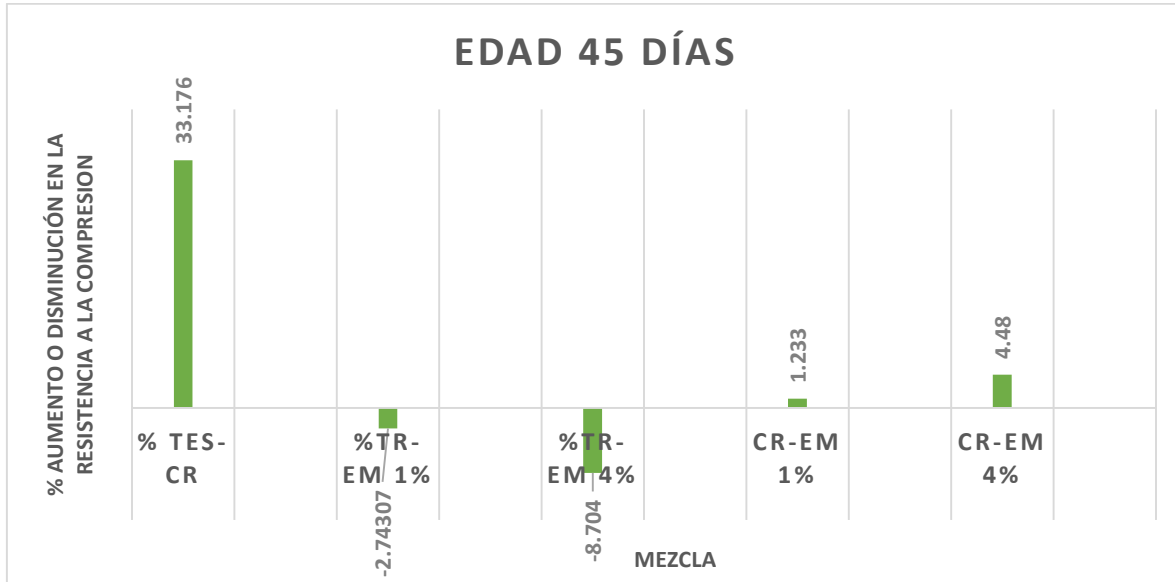


Figura 4.8.3 Aumento/Disminución de resistencia a la compresión comparada con la mezcla testigo. Edad 45 días.

Pasados 45 días podemos observar que los especímenes siguen ganando resistencia, las muestras TR-EM 1 y 4% tuvieron una disminución menor al 9%, mientras que las muestras CR-EM 1 y 4 %, y TES-CR aumentaron sus porcentajes.

Según la Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N-CRT-CAR-1-02-003-04, se considera un grado de severidad de acuerdo con la importancia del elemento estructural de que se trate, conforme a lo indicado en la Tabla 4.8.5.



Tabla 4.8.5 Grado de severidad para penalización [38]

| Tipo de estructura | Grado de Severidad | Resistencia a la compresión recomendada (kgf/cm ²) |
|---|--------------------|--|
| Elementos no estructurales como guarniciones, banquetas y parapetos | Mínima | 150-200 |
| Zapatas, cimentaciones masivas, muros y estribos | Media | 200-250 |
| Trabes, columnas y losas | Máxima | 300-350 |

En base a estos requerimientos podemos determinar el uso de un concreto o mortero modificado con la emulsión, y al observar las resistencias alcanzadas para todas mezclas a partir del día 7 (Figura 4.8.4).

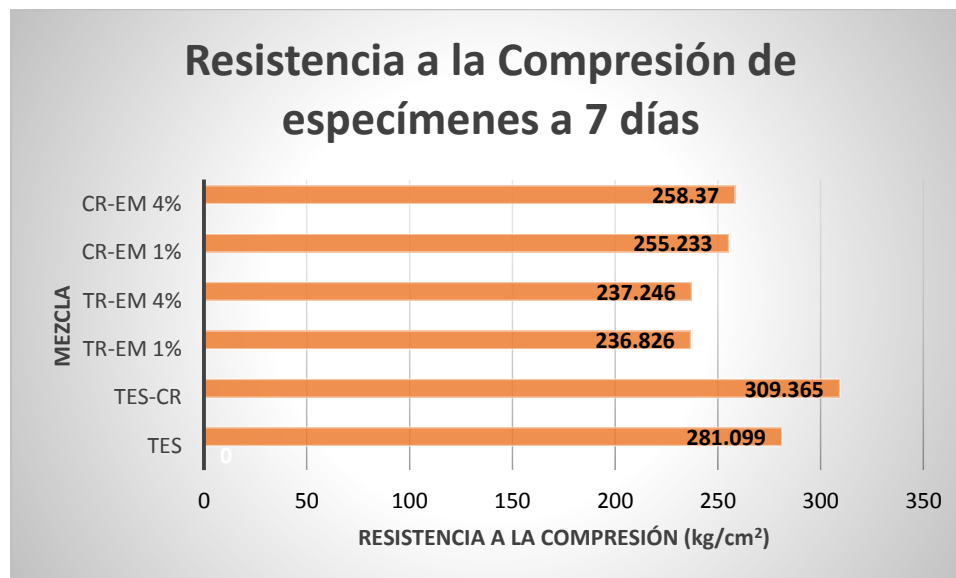


Figura 4.8.4 Resistencia a la Compresión de especímenes a 7 días

Se puede concluir que todas las mezclas pueden tener una aplicación en elementos no estructurales como guarniciones, banquetas, parapetos, zapatas, cimentaciones, muro y estribos, sin salir de la norma [38].



4.9 Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido de muestras de mortero
Dentro del análisis de MEB se realizó un mapeo con el objetivo de observar el comportamiento de la emulsión, para lo cual se localizó el elemento de carbono por ser éste el componente principal de nuestra emulsión. La Tabla 4.9 contiene la nomenclatura de las muestras de mortero y la cantidad de emulsión que contienen.

Tabla 4.9 Nomenclatura de muestras analizadas por microscopía electrónica de barrido

| MUESTRA | % DE VOLUMEN DE EMULSIÓN EN EL MORTERO |
|---------|--|
| M-1 | 0 |
| M-2 | 1 |
| M-3 | 2 |
| M-5 | 4 |
| M-10 | 9 |

A continuación se presentan en las Figuras 4.9.1 y 4.9.2 los espectros de energía dispersiva (EDS) de la muestra testigo de mortero y la muestra con emulsión correspondientemente.

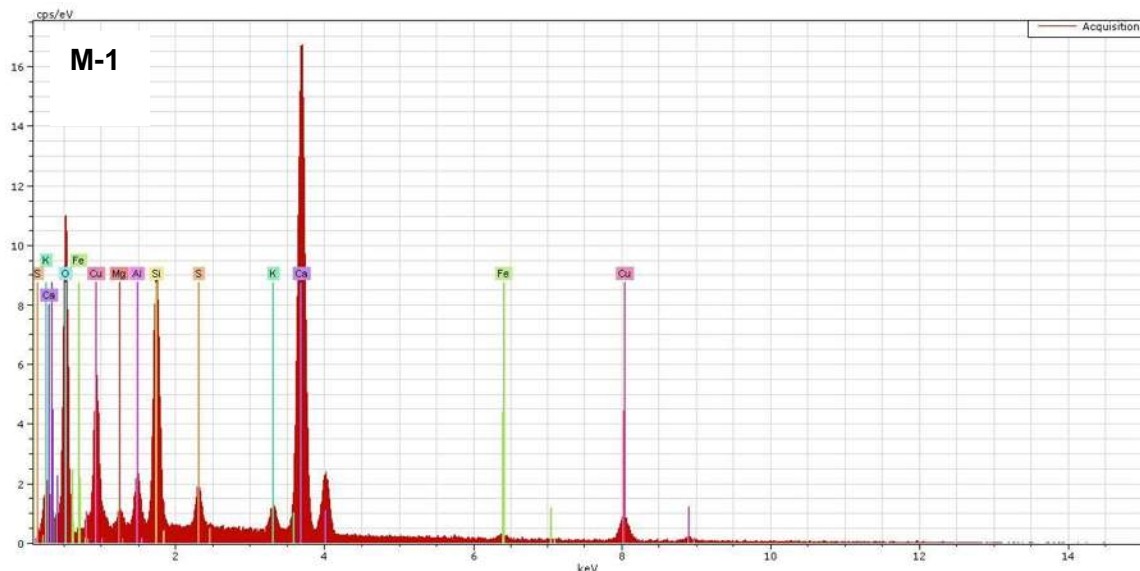


FIGURA 4.9.1 Espectro de EDS de la muestra M-1

En la Figura 4.9.1 se puede observar el espectro de EDS de una muestra sin emulsión, donde las señales corresponden a los elementos presentes en la muestra de mortero. Al mortero lo conforman agregados pétreos y cemento, razón por la cual aparecen los elementos Ca, K, O, Si, Mg y Fe.

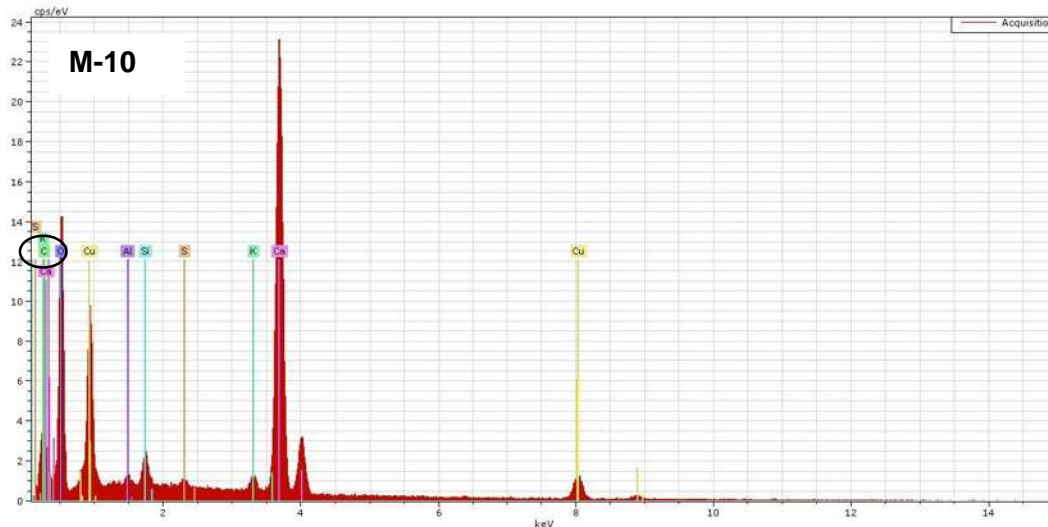
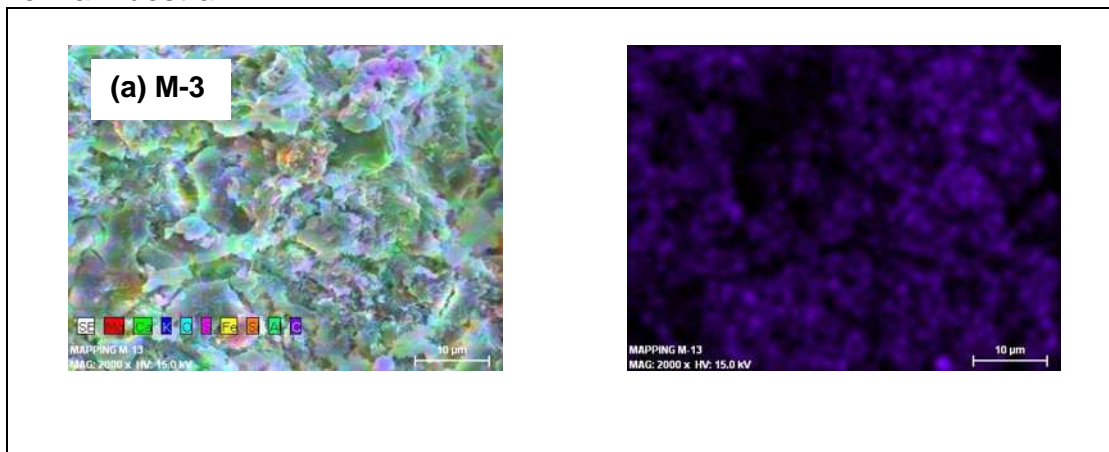


Figura 4.9.2 Espectro de EDS de la muestra M-10

En la Figura 4.9.2 el espectro de EDS de la muestra M-10, corresponde a la muestra con mayor cantidad de emulsión, en ella aparece el elemento carbono. Dicho elemento es el principal componente de la emulsión, lo cual comprueba la presencia de la emulsión en la mezcla.

Así pues, del elemento carbono también puede observarse en las microscopías realizadas y mostradas en la Figura 4.9.3 con las imágenes de las muestras M-3 a la M-10. El área morada que representa la presencia de carbono, así pues se puede apreciar como existe un incremento de saturación de dicha área morada (figuras del lado derecho) de con respecto al aumento de la cantidad de emulsión en la muestra.



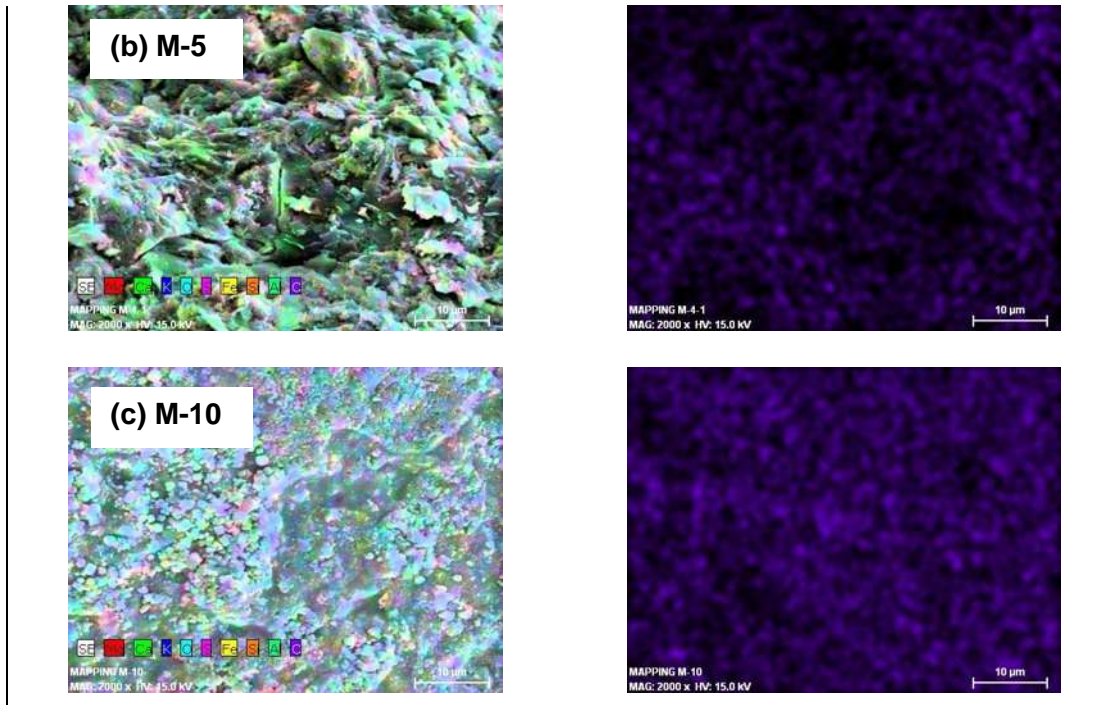
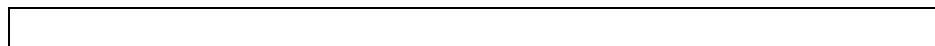


Figura 4.9.3 Comparativa de imágenes del mapeo elemental de cada una de la muestras (a) M-3 con un 2% en volumen de emulsión, (b) M-5 con un 4% en volumen de emulsión y (c) M-10 con un 9% en volumen de emulsión (lado derecho mapeo con todos los elementos, lado izquierdo mapeo de carbono).

En las secciones moradas se encuentra distribuida de manera uniforme el elemento carbono, lo que indica que la emulsión se incorpora de forma continua y a través de la matriz del mortero.

Las imágenes de cada una de las 5 muestras analizadas por microscopía electrónica de barrido con un aumento de 2000x, se presentan a continuación en la Figura 4.9.4.



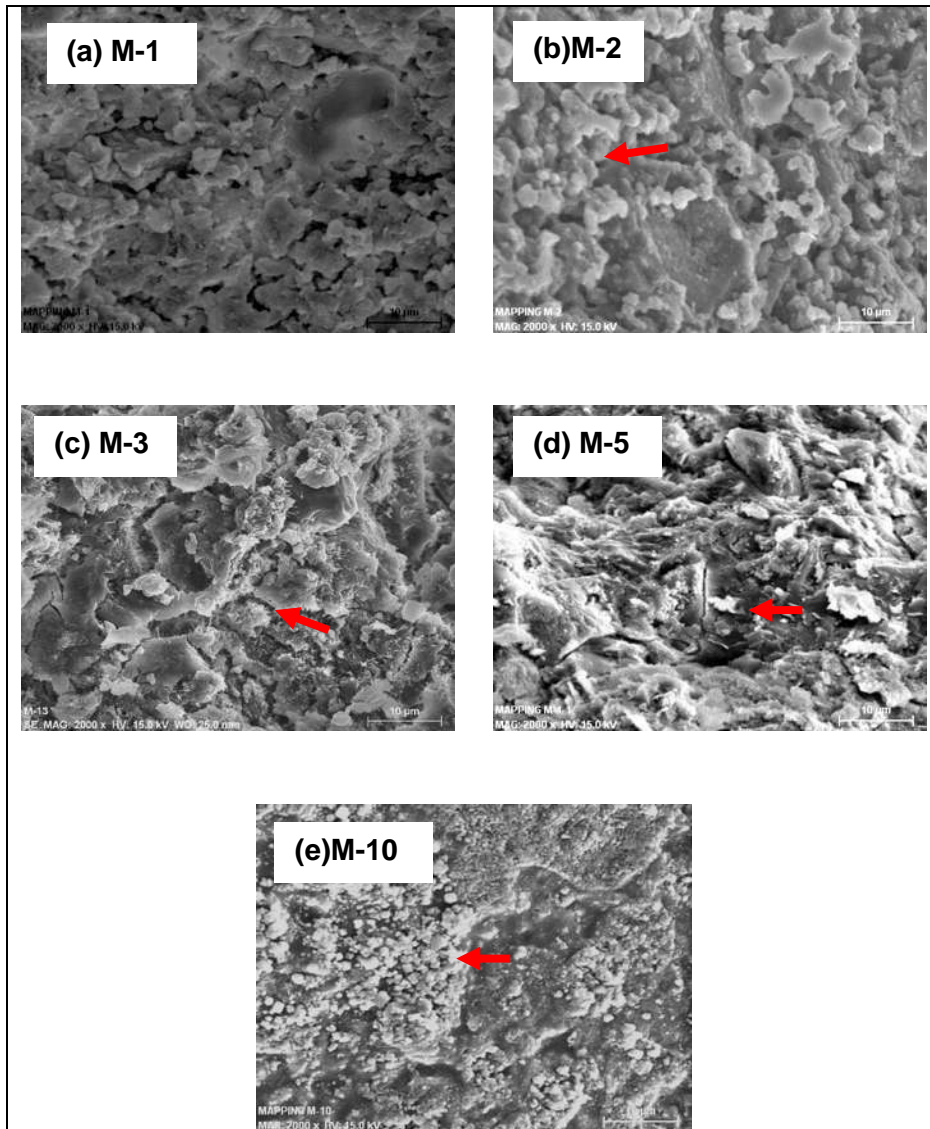


Figura 4.9.4 Imágenes de SEM de las muestras de mortero a 2000x (a) M-1 con 0% en volumen de emulsión (b) M-2 con 1% en volumen de emulsión, (c) M-3 con 2% en volumen de emulsión, (d) M-5 con 4% volumen de emulsión y (e) M-10 con 9% volumen de emulsión

Con éstas imágenes se aprecian diferencias aparentes en la saturación de sitios blanquecinos (marcados con una flecha) que aumentan considerablemente desde la muestra con menor cantidad de emulsión hasta la de mayor cantidad.

4.10 Propuesta de modelo del composito de concreto modificado con la emulsión

El modelo del mecanismo del concreto modificado con la emulsión se puede representar con el propuesto por *Etsuo Sakai y Jun Sugita* [36]. La Figura 4.10 muestra el cemento hidratado como matriz, en el cual se forma una microestructura de partículas de polímero distribuida sobre la misma. Se forma una capa interfacial en la superficie de las partículas de cemento y de los agregados que tienen una diferente microestructura.

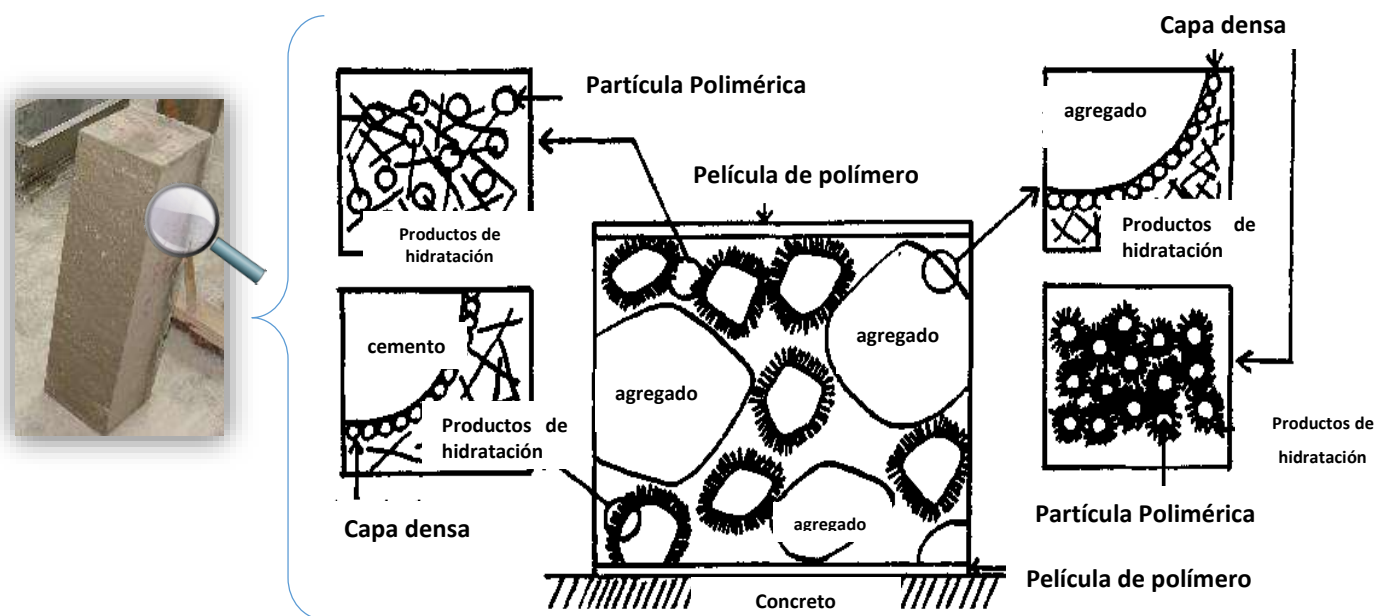


Figura 4.10 Modelo del mecanismo del composito de concreto modificado con emulsión

Para la interface del agregado, se observa también una capa interfacial compuesta por polímero-cemento hidratado con una doble cantidad de polímero. Debido al efecto división-dispersión de las partículas poliméricas, y de la presencia de surfactante estas se distribuyen en la matriz y mejoran la propiedad de adhesión de la capa interfacial existente en la interfaz que rodea a la partícula de cemento y al agregado [34].

Cuando un polímero en emulsión es mezclado con el cemento, partículas esféricas independientes de polímero llenan la interface ente las partículas de cemento, los



hidratos del cemento después del endurecimiento, producen un llenado alrededor de las partículas de polímero [34].

Adicionalmente la propiedad adhesiva del mortero modificado puede ser mejorada por la propiedad de unión de la película de polímero formada en la superficie del mortero y en la interfaz con otros materiales. Considerando que el valor de la tensión superficial brinda la capacidad de mojar al cemento y a los agregados. La razón por la cual se presenta adhesión del mortero modificado con otros materiales puede ser explicado por la formación de una película en la interface con otros materiales.

La capacidad de evitar que iones degradantes puedan penetrar en morteros y concretos modificados se relaciona con la formación de esta película.

4.11 Evaluación del Ciclo de Vida

4.11.1 Análisis del inventario

El análisis de inventario posee la cantidad de cada compuesto usado para la producción de cemento, obtención de grava y arena. Basado en dichas cantidades se asocia una cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

Las Tablas 4.11.1, 4.11.2 y 4.11.3 muestran las principales emisiones generadas a partir de la obtención de cada compuesto. Estos datos están basados en que 427 Kg de cemento son necesarios para la producción de 1 m³ de concreto.

Tabla 4.11.1 Cantidad de emisiones generadas por producción del cemento [39]

| Componente | Cantidad | Unidades |
|---------------------|----------|----------|
| CO ₂ (A) | 359,603 | kg |
| SO ₂ (B) | 0,226 | kg |



| | | |
|---|---------|----|
| NO_x (C) | 1,561 | kg |
| Cemento (D) | 35,576 | kg |
| SiO₂ (E) Óxido de Silicio | 126,715 | kg |
| Al₂O₃ (F) Trióxido de Aluminio | 159,729 | kg |
| Fe₂O₃ (G) Trióxido de hierro | 76,874 | kg |
| TiO₂ (H) Dióxido de titanio | 3,843 | kg |
| CaO (I) Óxido de Calcio | 253,046 | kg |
| MgO (J) Óxido de magnesio | 49,114 | kg |
| SO₃ (K) Trióxido de azufre | 138,801 | kg |
| K₂O (L) Óxido de Potasio | 33,739 | kg |
| Na₂O (M) Óxido de sodio | 11,104 | kg |

Tabla 4.11.2 Cantidades de emisiones generadas en el proceso de obtención de la grava [38]

| Compuesto | Cantidad | Unidades |
|---|-----------------|-----------------|
| CO₂ (A) | 4,36E-01 | kg |
| NO_x como NO₂ (B) | 1,42E-03 | kg |
| SO_x como SO₂ (C) | 2,43E-03 | kg |
| Partículas (D) | 2,57E-03 | kg |
| Energía (E) | 6,63E+00 | Mj |

Tabla 4.11.3 Cantidades de emisiones generadas en el proceso de obtención por la arena [38]

| Compuesto | Cantidad | Unidades |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| CO₂ (A) | 4,36E-01 | kg |



| | | |
|---|----------|----|
| NO_x as NO₂ (B) | 1,42E-03 | kg |
| SO_x as SO₂ (C) | 2,43E-03 | kg |
| Partículas (D) | 2,57E-03 | kg |
| Energía (E) | 6,63E+00 | Mj |

4.12.2 Evaluación de Impacto a través del ECO-INDICADOR-99

Una vez realizado el Análisis de Inventario de Ciclo de vida para cada ruta de producción del concreto, se procedió a medir el Impacto Ambiental a través de la metodología del ECO-Indicador 99. La Figura 4.12.2 muestra tales resultados obtenidos.

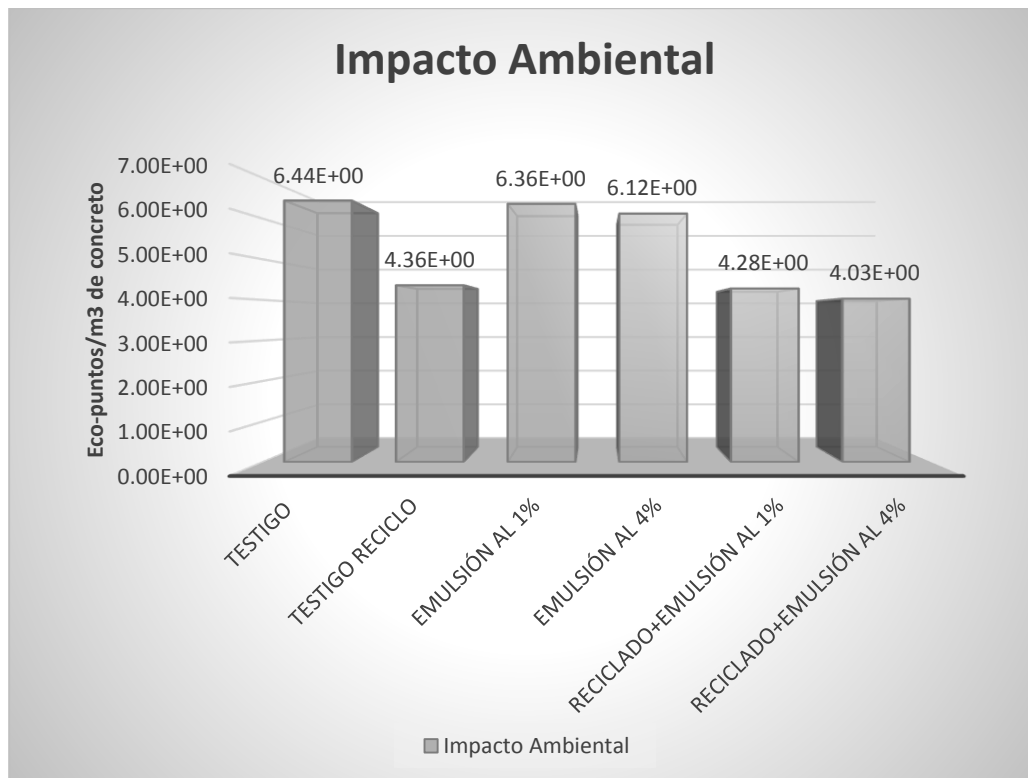


Figura 4.12.2 Eco-puntos de Impacto Ambiental para cada ruta

A partir de estos resultados, se observa que las rutas donde se utilizó emulsión y concreto de reciclado tuvieron un eco-punto más bajo comparado con el testigo. La razón de la disminución en este valor es que la materia prima utilizada en estas rutas confina a contaminantes ambientales en un material de construcción



aportando un valor agregado en el beneficio ambiental. Valores de eco-puntos más bajos nos indican un menor impacto ambiental, por lo tanto, es claro que disminuye el impacto ambiental cuando se sigue por las rutas de producción de concreto que tienen emulsión adicionada.

Estos valores concluyen que el uso de poliestireno expandido de post- consumo tiene una aplicación sustentable al ser utilizado como un aditivo en concretos y logra contribuir sustancialmente con la disminución de contaminación.

5. CONCLUSIONES

La propuesta de una nueva alternativa para el reúso de un contaminante plástico como lo es el poliestireno expandido de post-consumo se logró a través de una técnica de confinamiento distinta a las ya existentes. Esto, mediante el desarrollo



de una emulsión elaborada con este material plástico y después aplicada a materiales de construcción.

Se logró determinar la concentración y los parámetros que influyen en la estabilidad de la emulsión.

Una vez que la emulsión es adicionada a las mezclas con cemento para elaborar mortero y concreto se analizó su desempeño de tiempo de fraguado y su resistencia a la compresión para definir su aplicación, con lo que es posible utilizarla como aditivo para retardar el tiempo de fraguado y en los concretos puede ser utilizado en ciertos tipos de estructuras como elementos como guarniciones, banquetas, parapetos, zapatas, cimentaciones, muros y estribos; esto sin modificar sus propiedades y especificaciones de resistencia normadas.

Mediante el análisis de ciclo de vida y el uso del Eco-indicador 99 fue posible concluir que el impacto ambiental asociado a la producción de concretos es menor cuando es pasivado un material contaminante. En este caso el uso de la emulsión como aditivo aporta esa disminución en el índice de daño humano, daño a la calidad del ecosistema y daño a los recursos.

A partir de este trabajo se propone continuar con la investigación de futuras aplicaciones de la emulsión así como la realización de pruebas mecánicas para encontrar mejoras en propiedades de materiales de construcción elaborados con cementos y con otros tipos de materiales

6. BIBLIOGRAFÍA



- [1] Peter G. Ryan, (2014). Litter survey detects the South Atlantic 'garbage patch'. *Marine Pollution Bulletin*, 79, 220-224.
- [2] NMX-E-233-SCFI-2000 CDU 678.7 DGN. INDUSTRIA DEL PLÁSTICO - TERMINOLOGÍA DE RECICLADO DE PLÁSTICOS.
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
- [4] Areizaga Javier, Polímeros, Capítulo 12, páginas 350-364, España: Editorial Síntesis, 2012.
- [5] Rubin, Irvin. Materiales plásticos: Propiedades y aplicaciones. Capítulo 8, paginas 131-148, México: Limusa, 2012.
- [6] INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGIA: Precios de los Materiales Recuperados a través de la Pepena Thesis Consultores, S.C., 2002
- [7] Instituto Mexicano del Plástico Industrial S.C., Citado En: Secretaría de Medio Ambiente. El PET y su situación actual. Diagnóstico. Gobierno del Distrito Federal. Junio 2001.
- [8] Norma Mexicana NMX-E-232-CNCP-2005.
- [9] Enciclopedia del Plástico, Instituto Mexicano del Plástico Industrial, Tomo 3, Capítulo 29, México D.F., 2000.
- [10] Bailey, Alton, *Aceites y Grasas Industriales*. España: Reverté, 2001.
- [11] Acuña Arias, Flora, Química Orgánica, Capítulo 9. Costa Rica: EUNED, 2006
- [12] Benjumea Hernández, Pedro, Biodiesel: Producción, calidad y caracterización, Colombia: Universidad de Antioquia, 2009.
- [13] Calleja José, Virella Alberto. *Portuario del Cemento*. España: Editorial Reverté, 1985.
- [14] Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. Colombia: Bhandar editores LTDA, 2001.
- [15] M. Martínez-López, G. Martínez Barrera. Materiales sustentables y reciclados en la construcción. Omnia Publisher SL, 2015.
- [16] Aranda Usón Alfonso, *El Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de gestión empresarial*. España: FC EDITORIAL.



[17] Protocolo de Gases de efecto invernadero, Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte

[18] Eco-indicator 99 Manual for Designers *A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*, 2000.

[19] Noguchi, T., Miyashita, M., Inagaki, Y., Watanabe, H. (1998). A new recycling system for expanded polystyrene using a natural solvent. *Packaging Technology Science*, 11, 19.

[20] P. N. S. Schmidt et al. (2011). Flexural Test on Recycled Polystyrene. *Procedia Engineering*, 10, 930–935.

[21] Amianti, M., Botaro, V.R. (2008). Recycling of EPS: a new methodology for production of concrete impregnated with polystyrene (CIP). *Cement and Concrete Composites*, 30, 23–28.

[22] Miskolczi, N., Bartha, L., Deak, G. (2006). Thermal degradation of polyethylene and polystyrene from the packaging industry over different catalysts into fuel like feed stocks. *Polymer Degradation and Stability*, 91, 517–526.

[23] YanhongLi, Yunge Fan, Jianbiao Ma (2001). Thermal, physical and chemical stability of porous polystyrene-type beads with different degrees of crosslinking. *Polymer Degradation and Stability*, 73, 163-167.

[24] Ravindrarajah, R., Tuck, A. (1994). Properties of hardened concrete containing treated EPS beads, cement and concrete composites, 273-277.

[25] Babu, K.G., Babu, D.S. (2003). Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 33, 755–762.

[26] Babu, K.G., Babu, D.S. (2004) Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates 26, 605–611.

[27] Abdulkadir Kana, Ramazan Demirbog (2008). A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal of materials processing technology*, 209, 2994–3000.

[28] Kan A, Demirbog R. (2009). A new technique of processing for waste expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal Mater Process Technol*, 206(6), 2994–3000.



[29] V. Ferrandiz-Mas, T. Bond, E. Garcia-Alcocel, C.R. Cheeseman (2014). Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Construction and Building Materials*, 61, 285–292.

[30] Bing Chen, Juanyu Liu (2005). Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. *Construction and Building Materials*, 21, 7–11.

[31] Renju Vaikathusseril Sekharan, Beena Thattekatt Abraham, Eby Thomas Thachil (2012). Utilization of waste expanded polystyrene: Blends with silica-filled natural rubber. *Materials and Design*, 40, 221–228.

[32] Sumit Chakraborty, Sarada Prasad Kundu, Aparna Roy, Basudam Adhikari, S.B. Majumder, 2013. Polymer modified jute fibre as reinforcing agent controlling the physical and mechanical characteristics of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 49, 214-222.

[33] Neven Ukrainczyk, Anamarija Rogina; Styrene–butadiene latex modified calcium aluminate cement mortar (2013). *Cement & Concrete Composites*, 41, 16–23.

[34] Matheus Poletto, Juliane Dettenborn, Mara Zeni, Ademir J. Zattera (2011). Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. *Waste Management*, 31, 779–784.

[35] NORMA MEXICANA NMX-C-061-ONNCCE -2010, Industria de la Construcción, Cementos Hidráulicos-Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos.

[36] Etsuo Sakai, Jun Sugita (1995). Composite mechanism of polymer modified. *Cement and Concrete Research*, 25 (1), 127-135.1995.

[37] NMX-C-177-1997 ONNCCE, Industria de la Construcción, Cementos Hidráulicos-Determinación del tiempo de Fraguado de mezclas de concreto, mediante la resistencia a la penetración.

[38] Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N-CRT-CAR-1-02-003-04

[39] Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, SEMARNAT.