

Capítulo 7

Materiales Provenientes del Reciclamiento de Envases de Tetra Pak y su Uso en Concreto

Miguel Martínez-López¹, Gonzalo Martínez-Barrera¹, Carlos Eduardo Barrera-Díaz², Fernando Ureña-Nuñez³

¹Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Km.12 de la carretera Toluca-Atlacomulco, San Cayetano 50200, México.

²Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM. Universidad Autónoma del Estado de México Campus El Rosedal. Autopista Ixtlahuaca-Atlacomulco, km 14.5, CP50200. Estado de México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carretera México-Toluca s/n, CP 52750. La Marquesa Ocoyoacac, Estado de México.

igmiguel@hotmail.com, gonzomartinez02@yahoo.com.mx,
cbd0044@yahoo.com, fernando.urena@inin.gob.mx

Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.247>

Referenciar este capítulo

Martínez-López, M., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C.E., & Ureña-Nuñez, F. Materiales provenientes del reciclamiento de envases de Tetra Pak y su uso en concreto. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 123-143.

1. Introducción

En la actualidad la industria requiere de materiales con propiedades muy particulares, que incluyen bajo peso, altamente resistentes y con prolongada vida útil. Propiedades que son consecuencia de la combinación de las propiedades características de dos o más materiales, y que se requieren para diversas aplicaciones (construcción, espaciales, subacuáticas, transportes, etc.).

En términos generales, se considera que un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes de manera que presente la mejor combinación posible. De acuerdo con este principio de acción combinada, las mejores propiedades se obtienen por la combinación de dos o más materiales diferentes. Muchos materiales compuestos tienen propiedades excepcionales. Si bien algunos materiales compuestos son naturales (como la madera o el hueso), la gran mayoría de los materiales compuestos utilizados en la actualidad son diseñados y “fabricados” por el hombre.

La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos fases; matriz (fase continua) y refuerzo (fase dispersa). Las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de las fases dispersas.

Se han combinado ciertos metales, cerámicos y polímeros para producir una nueva generación de materiales para mejorar la combinación de propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a la tracción a temperatura ambiente y a elevadas temperaturas. Como material matriz se han empleado polímeros como resinas termoplásticas (polipropileno, poliamida, etc.) o bien termofijas (poliésteres, melaminas, poliuretanos, etc.). Así como algunas aleaciones metálicas como las de aluminio o titanio.

La fase dispersa puede estar constituida por partículas o por fibras. En el caso de las fibras los materiales empleados con mayor frecuencia son: vidrio, aramida o Kevlar, Carbono (nanotubos), Boro y Carburo de Silicio. La geometría de la fase dispersa significa, en este contexto, la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de las partículas, como se puede observar en la Figura 1.

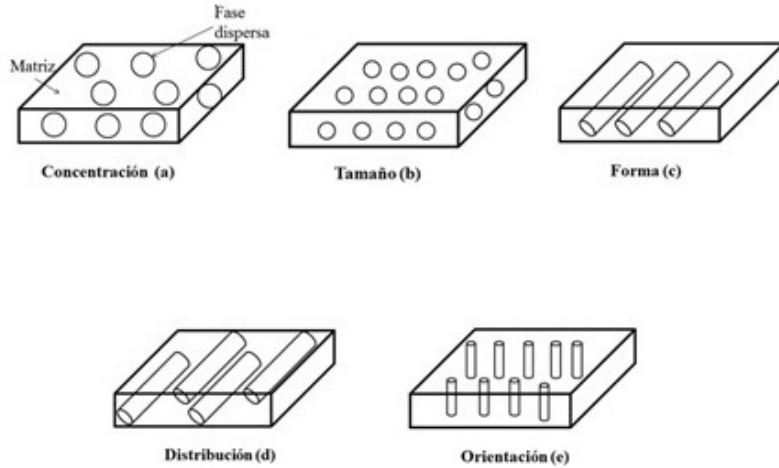


Figura 1. Geometría de la fase dispersa. a) concentración, b) tamaño, c) forma, d) distribución y e) orientación

La Figura 2 muestra un esquema simple para clasificar los materiales compuestos que, en esencia, consta de tres divisiones: compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos estructurales.

Las partículas de la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con partículas son equiaxiales (es decir, las dimensiones de las partículas son aproximadamente iguales en todas las direcciones); la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con fibras tiene la geometría de una fibra (es decir, una relación longitud/diámetro muy alta). Los materiales compuestos estructurales son materiales compuestos combinados con materiales homogéneos.

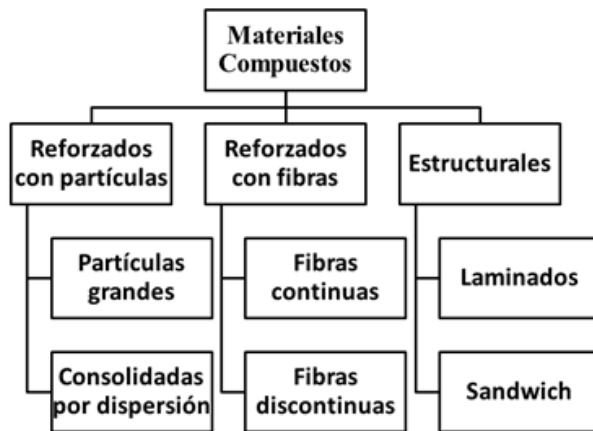


Figura 2. Clasificación de materiales compuestos

1.1. Interface Matriz-Refuerzo en Materiales Compuestos

Dos aspectos muy importantes en el desarrollo de materiales compuestos son: a) La unión entre el refuerzo y la matriz, y b) La transmisión de esfuerzos mecánicos entre el refuerzo y la matriz.

Además de las características del refuerzo y de la matriz, las propiedades de los materiales compuestos dependerán de cómo sea la interfase (la región de contacto) entre estos dos componentes. Si la interfase es débil, la transferencia de carga de la matriz al refuerzo no será eficiente y/o bien será la matriz la que termine soportando las cargas (y fallando, puesto que no es muy resistente), o se producirán huecos entre la matriz y las fibras, lo cual llevará a la rotura del material compuesto.

Lograr una buena adhesión entre la matriz y el refuerzo no es tarea fácil, ya que en general se trata de materiales diferentes (polímero, cerámico, metal), y una adecuada adhesión depende del contacto íntimo de los átomos en la superficie de uno y otro componente (Prikryl, Cech, Balkova & Venek, 2003). Razón por la cual se ha desarrollado toda un área de aditivos que permiten mayor compatibilidad con la matriz, y aumenten la adhesión entre los componentes del material compuesto.

Se sugiere tener a la matriz en estado líquido e “impregnar” perfectamente al refuerzo. De esta forma se consigue una buena unión en la interfase. La impregnabilidad o mojado se define como la capacidad de un líquido para extenderse por una superficie sólida. Una buena impregnabilidad significa que la matriz fluirá perfectamente por la superficie del refuerzo y desplazará todo el aire. En general, cuando la tensión superficial del refuerzo es igual o mayor que la de la matriz, se garantiza una buena impregnación.

Existen diferentes tipos de unión en la interfase: a) *Unión mecánica*, en donde las rugosidades entre ambas superficies dan lugar a la unión. A mayor rugosidad más efectiva es la unión en la interfase. Este tipo de unión es poco efectiva para esfuerzos de tracción pero efectiva para esfuerzos cortantes; b) *Unión electrostática*, acontece cuando una de las superficies tiene carga positiva y la otra negativa; c) *Unión química*, se da cuando la superficie del refuerzo tiene grupos químicos compatibles con grupos químicos de la matriz. La resistencia de la unión depende del número de uniones por unidad de área; y d) *Unión mediante interdifusión*, en este tipo de unión la superficie del refuerzo y de la matriz tienen cadenas poliméricas que se difunden entre ellas. La resistencia de esta unión depende del número de entrelazamientos entre cadenas y aumenta con la adición de disolventes o plastificantes.

Las interacciones matriz/refuerzo en materiales compuestos con refuerzo de fibras pueden ser estudiadas a cuatro escalas distintas dependiendo del rango de distancias matriz/refuerzo en el que se produzcan: a) *A escala molecular* las interacciones entre las distintas fases están determinadas por las propiedades químicas de cada una de las fases, de manera que entre ellas se producen enlaces químicos, interacciones de tipo ácido-base y fuerzas de Van der Waals; b) *A escala microscópica*, las interacciones interfaciales se describen en función de ciertos parámetros cuando el material compuesto es sometido a algún esfuerzo; c) *A escala mesoscópica* se considera la influencia de la distribución del refuerzo en la matriz, mientras que d) *A escala macroscópica* se trata al material compuesto de manera global como si fuese una mezcla homogénea (Mäder, Zhandarov, Gao, Zhou & Nutt, 2002).

Otro planteamiento considera al material compuesto como un conjunto de tres partes: refuerzo (F), agente de acoplamiento (SI) y matriz (MI). La modificación de la interfase a través de la

modificación química o física de la superficie del refuerzo es uno de los métodos más comunes que se emplean con objeto de mejorar la adhesión matriz/refuerzo y mejorar las propiedades finales del material compuesto (Kim & Gao, 2000; Gonon, Chabert, Bernard, Van Hoyweghen & Gerard, 1997).

Existen diversos estudios sobre la variación de la resistencia de la interfase de materiales compuestos, en algunos de ellos se modifica la superficie del refuerzo por inclusión de un agente de acoplamiento silano y/o otros agentes compatibilizantes con distintos tipos de matrices. La modificación de la estructura superficial del refuerzo hace que la interfase generada sea más resistente, es decir, que tenga mayor capacidad para transferir cargas mecánicas desde la matriz al refuerzo. La inclusión del agente de acoplamiento sobre la superficie del refuerzo, además de mejorar las interacciones refuerzo/matriz, genera una superficie químicamente activa gracias a los grupos funcionales que pueden estar presentes en el silano. Estos grupos funcionales pueden interaccionar químicamente con la matriz o pueden servir como puntos de anclaje de marcadores (González-Benito, Cabanelas, Aznar, Vigil, Bravo & Baselga, 1996; Lenhart, Dunkers, Van Zanten & Parnas, 2000).

Es de suma importancia obtener información acerca de los mecanismos de generación de la interfase, lo que implica estudiar factores como la reactividad entre la matriz y la superficie del refuerzo, el grado de miscibilidad entre la matriz y el agente de acoplamiento, o la difusión preferencial de algunos componentes de la matriz hacia la superficie del refuerzo (Olmos & González-Benito, 2010).

2. Envases Tetra Pak

En los años 50's Ruben Rausing diseñó los envases de Tetra Pak siguiendo uno de los fundamentos de la sustentabilidad: ahorrar más de lo que cuesta, en el aspecto económico, ambiental y social.

Con el desarrollo de la industria del plástico se ha promovido indiscriminadamente el uso de envases de Tetra Pak, los que después de una muy corta vida útil se convierten en basura, contribuyendo a deteriorar el medio ambiente. Una vez que cumplió su función como contenedor para alimentos presenta un valor agregado, ya que puede: a) ser incinerado para producir energía, b) reciclado, para la fabricación de papel, y c) utilizado para fabricación de láminas y productos aglomerados.

Los envases de Tetra Pak se reciclan de diferentes maneras. El proceso general comienza con el acopio de los envases Tetra Pak para su posterior "repulpeado". En este proceso se logra separar los envases en dos componentes: a) celulosa y b) polietileno-aluminio. Estos materiales se pueden comprimir para formar material aglomerado o separarlo en sus diferentes componentes para la fabricación de otros productos (Figura 3).

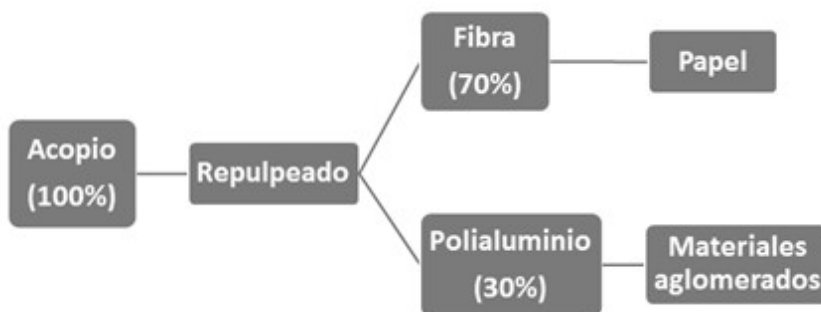


Figura 3. Reciclaje de envases Tetra Pak

En 2012 Tetra Pak produjo 173,234 millones de envases para 170 países. Tiene en operación 8707 máquinas de envasado y 67 mil unidades de procesamiento, además de 11 centros de investigación y desarrollo y reporto más de 11 mil millones de euros en ventas en 2012 (<http://www.tetrapak.com>).

En 2013, la tasa de reciclaje de envases de Tetra Pak en el mundo alcanzó un 24,5% con casi 43 mil millones de envases reciclados. Respecto a México, esta tasa se ha incrementado notablemente. En el 2003 el porcentaje de reciclaje era de 0.9% mientras que para 2013 se incrementó hasta 24% (<http://www.tetrapak.com>).

A la fecha, las escasas tecnologías que existen para el reciclaje de envases de Tetras Pak están basadas en la molienda mecánica y el uso de sustancias químicas para la reducción de tamaño y la separación de los materiales respectivamente. No se han propuesto tecnologías limpias para el reciclaje.

Los envases de Tetra Pak para bebidas están constituidos de papel (75%), polietileno de baja densidad (20%) y aluminio (5%); y conformados por 6 capas (Figura 4), cuyas funciones son:

- Primera capa: Polietileno (protege el envase de la humedad exterior).
- Segunda capa: Papel (brinda resistencia y estabilidad).
- Tercera capa: Polietileno (ofrece adherencia fijando las capas de papel y aluminio).
- Cuarta capa: Aluminio (evita la entrada de oxígeno, luz y pérdida de aromas).
- Quinta capa: Polietileno (evita que el alimento esté en contacto con el aluminio).
- Sexta capa: Polietileno (garantiza por completo la protección del alimento).

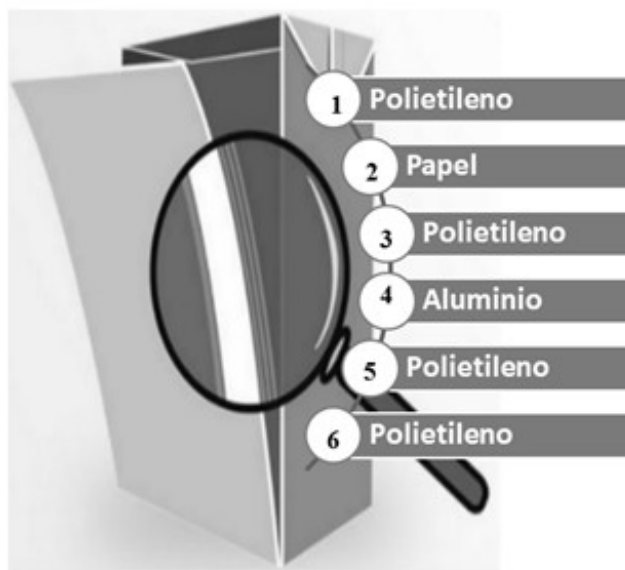


Figura 4. Envase Tetra Pak

El papel utilizado en la elaboración de envases Tetra Pak es celulosa $(C_6H_{10}O_5)_{200}$ la cual se forma por la unión de moléculas de β -glucopiranosas mediante enlaces β -1,4-O-glucosídico.

Las propiedades del polietileno, aluminio y polialuminio utilizado en la elaboración de envases se muestra en las Tablas 1, 2 y 3.

Propiedad	Valor
Punto de Fusión, °C	110
Densidad	
a 20°C	0.92
a 50°C	0.90
a 80°C	0.87
a 110°C	0.81
Módulo de Young, Kg/cm ²	1.6
Resistencia a la tracción a 20 °C, Kg/cm ²	150
Dureza Brinell (bola de 2 mm de diám. y 3 kg)	2

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas del polietileno

Propiedad	Valor
Densidad, kg/cm ³	2.69
Punto de fusión, °C	660
Punto de ebullición, °C	2.51
Conductividad eléctrica, S/m	37.7×10^6
Conductividad térmica, W/(K·m)	237
Módulo elástico, GPa	70

Tabla 2. Propiedades del aluminio

Propiedades	Valor
Tensión a la ruptura, MPa	10.9
Elongación a la ruptura, %	38.8
Modulo elástico, MPa	177.6
Resistencia al impacto Izod, MPa	302.0
Conductividad eléctrica, S/cm	1.11×10^{-8}
Densidad, g/cm ³	0.9

Tabla 3. Propiedades del polietileno-aluminio de los envases de Tetra Pak

2.1. Reciclamiento de Envases de Tetra Pak

Cada año, Tetra Pak produce más de 170 mil millones de empaques para contener toda clase de productos, los cuales se distribuyen en más de 170 países. Su uso y comercialización generan una gran cantidad de residuos. Con el propósito de reutilizar los materiales que lo conforman, desde hace varios años se han presentado diversas propuestas para su reciclaje, debido al gran interés desde el punto de vista económico y ambiental. El reciclaje a nivel mundial de envases post-consumo de Tetra Pak se ha incrementado en los últimos años. Durante los años 2011 y 2012 se reciclaron 3.6 billones de envases de Tetra Pak (<http://www.tetrapak.com>).

El proceso más conocido para reciclar los envases multicapas es el hidropulpeado (Figura 5). En éste, las capas de polietileno y aluminio (polialuminio) se separan mecánicamente del cartón en un hidropulpeador; obteniéndose fibras de celulosa de alta calidad, que se utilizan en la producción de papel y cartón; el polialuminio representa el 25% del material reciclado, el cual se puede utilizar como materia prima para diferentes procesos de transformación de plástico, tales como: extrusión, moldeo por compresión, fabricación de materiales compuestos, mezclas con otros polímeros, roto-moldeo e inyección de plásticos (Atilla, Murathan, Guru & Balbasi, 2007; Korkmaz, Yanik, Brebu & Vasile, 2009).

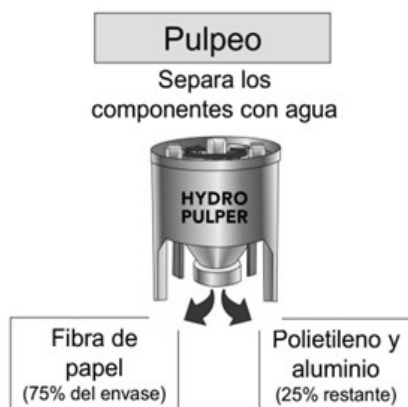


Figura 5. Hidropulpeador

La recuperación de polietileno-aluminio resulta atractiva para muchos empresarios cuando se recuperan grandes cantidades de este material; Otros procesos para la separación del aluminio del polietileno son:

- El reciclado mecánico que permite que el polialuminio se separe, y sirva como materia prima para producir artículos de plástico como paneles y cepillos.
- El uso del plasma térmico; tecnología que utiliza energía eléctrica para producir un chorro de plasma a 15,000°C. El calor ioniza la mezcla de plástico-aluminio, y da como resultado la transformación del plástico en parafina, y la recuperación del aluminio en su forma pura (<http://www.tetrapak.com>).
- La incineración del polialuminio en hornos para producir energía y utilizarla en la industria del cemento; es decir el polialuminio es una alternativa de combustible, en sustitución del carbón. Durante el proceso de generación de energía se produce óxido de aluminio, material que se requiere para la fabricación de cemento. Esta operación significa ahorro de materias primas. Cabe mencionar que en el proceso normal de producción de cemento se utiliza la bauxita, la cual al calentarse produce óxido de aluminio (<http://www.tetrapak.com>).
- Mediante pirólisis se separan estos materiales, recuperando aluminio de calidad. El polialuminio alimenta a un horno rotativo donde el material se calienta en un ambiente inerte para evitar la combustión del polímero. El resultado de este proceso consiste en bloques de aluminio y gases pirolíticos de polímero (Korkmaz et al., 2009).

Algunas empresas han creado equipos para limpiar el polialuminio después del proceso de reciclado. Estos equipos permiten una mayor efectividad en la recuperación de fibras y al mismo tiempo proveen polialuminio de mayor calidad para moldeo por inyección. Con estos materiales se han elaborado láminas que se utilizan para producir tejas de bajo costo para viviendas.

3. Concreto Modificado con Materiales de Desecho

3.1. Concreto Hidráulico

Uno de los materiales compuestos por excelencia es el concreto, por mucho, el material de construcción más importante. A nivel mundial, más de 10 mil millones de toneladas se producen cada año. Su importancia radica en ser un material de ingeniería, lo que significa que puede ser diseñado para satisfacer casi cualquier conjunto de especificaciones de rendimiento, más que cualquier otro material disponible actualmente (Hardjito, 2008).

Pero esta popularidad viene con un alto precio, que es a menudo pasado por alto: sólo para los volúmenes absolutos que se producen cada año, el concreto tiene un enorme impacto en el medio ambiente. En primer lugar, están las grandes cantidades de recursos naturales necesarios para producir estos miles de millones de toneladas de los componentes del concreto al año. Por ejemplo, se sabe que la producción de cada tonelada de cemento Portland libera casi una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, aunado al gran consumo de agua y energía. Se estima que, en todo el mundo, la industria del cemento es responsable de aproximadamente el 7% de todo el CO₂ generado (Hardjito, Cheak & Ho Lee, 2008; Aggarwal, Gupta & Sachdeva,

2012). Un problema que a la larga genera es su demolición y eliminación de estructuras de concreto, pavimentos, etc, mismos que crean una carga ambiental, aportando una fracción considerable de los residuos sólidos en los países desarrollados.

La industria del concreto se ha convertido en una víctima de su propio éxito y por lo tanto ahora se enfrenta a grandes retos. En los últimos años se ha interesado en desarrollar novedosas investigaciones en temas relacionados con la construcción sostenible. Se han propuesto diferentes herramientas y estrategias para cumplir con los desafíos ambientales que representa, los cuales se pueden resumir, entre otras, en:

- Aumentar el uso de materiales de desecho, especialmente aquellos que son subproductos de procesos industriales.
- Uso de materiales reciclados en lugar de los recursos naturales, esto hará que la industria sea más sostenible.
- Mejorar la durabilidad, las propiedades mecánicas y de otro tipo, mediante la reducción de la cantidad de materiales necesarios para su sustitución.

El uso de agregados reciclados en la elaboración de concreto permitirá solucionar entre otros: a) Problemas de contaminación ambiental: al aceptar materiales de demolición y plásticos desechados que no son reciclados debido al alto costo; b) Ahorros económicos: se reducirán los costos de transporte (menor consumo de combustibles y menor producción gases contaminantes); c) Ahorro de energía: por la menor explotación de canteras y lechos de dominio público; d) Consumo de materiales no renovables.

Dentro de los materiales reciclados que se utilizan en concretos se encuentran: vidrio reciclado, plásticos, elastómero de los neumáticos, desechos de madera, residuos agrícolas y fibras de acero. Materiales que si no se reúsan tendrían que ir directamente a los vertederos.

Los plásticos vienen en muchas formas diferentes y diversas formulaciones químicas. Esto complica el proceso de reciclaje debido a que los diferentes tipos de plásticos son generalmente mezclados, ya que es poco rentable separarlos. Muchos plásticos se pueden reciclar de nuevo en materia prima para ser utilizados para la fabricación de materiales termoestables o diferentes plásticos. Sin embargo, la calidad es menor y menos uniforme que la del material virgen, por lo tanto, los fabricantes generalmente prefieren darle usos alternativos, por ejemplo como “madera” de construcción plástica.

Un obstáculo importante para el uso de plástico reciclado en el concreto hidráulico es la pobre adhesión entre las partículas de plástico y la matriz de cemento. Sin embargo, no todas las construcciones requieren de concretos con alta resistencia, por lo que se presenta una gran oportunidad para el uso parcial de plásticos reciclados como sustitutos de agregados en la industria del concreto. Se ha creado la necesidad de plantear investigaciones de bajo costo para desarrollar métodos de sustitución de los agregados minerales del concreto por plástico reciclado.

Se han llevado a cabo estudios sobre el reforzamiento de concreto con materiales de desecho. En uno de estos se utilizó el plástico de defensas de autos como sustituto del agregado grueso; obteniéndose disminución en la resistencia a la compresión, esto a causa de la pobre adhesión entre el plástico y la matriz del concreto. En otro estudio se agregaron materiales combinados, por ejemplo un agente espumante y un bioplástico; sin embargo los costos de preparación y evaluación son costosos.

Mostafizur Rahman (Rahman, Islam, Ahmed & Salam, 2012) estudió los efectos causados por materiales poliméricos reciclados como sustitutos de los agregados en el concreto, en particular los polímeros: poliuretano-formaldehído (PUF) proveniente de envases, y polietileno de alta densidad (HDPE) proveniente de actividades comerciales. Los resultados muestran que la inclusión de estos materiales reciclados disminuyen significativamente la densidad, la porosidad y la absorción de agua de los bloques de concreto y mampostería. El concreto elaborado con PUF tiene menor densidad que el elaborado con HDPE, el cual se recomienda utilizar en estructuras flotantes y construcciones que requieran de materiales ligeros.

Para mejorar las propiedades mecánicas del concreto sin incrementar los costos pueden utilizarse minerales de desecho de las industrias. Por ejemplo, las cenizas pueden sustituir parcialmente al cemento debido a sus propiedades. Algunas ventajas de las cenizas en comparación con el cemento ordinario, son tener un menor calor de hidratación, debida que la reacción química es retardada y diferente; así como, presentar incremento de la homogeneidad debido a la eliminación de hidróxido de calcio. El calor de hidratación se puede mantener por debajo de los 15°C y con ello disminuir las tensiones térmicas y mantenerlas por debajo de la fuerza de agrietamiento de los concretos jóvenes. Hong Kong es el líder en esta tecnología y ha logrado sustituir el 93.7% del cemento en diversas construcciones.

El vidrio puede ser utilizado como un agregado en el concreto, pero debe estar sujeto a las mismas especificaciones que la de los agregados naturales, por ejemplo, uno de los requisitos es estar libre de cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas; lo que implica que el vidrio debe lavarse correctamente. El vidrio tiene la capacidad de no absorber agua, esto es una ventaja para concretos con aplicaciones específicas. Debido a la falta de absorción de agua y las superficies lisas de las partículas de vidrio utilizadas en el concreto, las propiedades de flujo son mejores que las de concreto con agregados naturales. Esto se traduce en una mejor trabajabilidad y una menor relación agua-cemento; además de obtenerse mejoramiento en la resistencia mecánica y propiedades como la durabilidad (sin la ayuda de un superplastificante). Otra ventaja del vidrio es su excelente dureza y resistencia a la abrasión lo que lo hace un material adecuado para adoquines, baldosas, y otras aplicaciones sometidas a un gran desgaste por el uso.

El concreto reforzado con fibras se utiliza cada vez más en toda la industria de la construcción. La adición de grandes cantidades de fibras cortas y uniformemente dispersadas, tiene el efecto de modificar las propiedades de la matriz de concreto. Las principales ventajas son mejora en la ductilidad y la capacidad de disipación de energía, que han sido ampliamente documentados en la literatura. Quizás aún más importante es el papel que juegan las fibras para controlar las fisuras de la matriz de concreto. Las fibras retardan la generación y propagación de las grietas, por lo que la permeabilidad del concreto puede ser conservada, lo que se traduce en una mayor durabilidad. Los tipos más comunes de fibras son de acero, polipropileno, nylon y las resistentes a los álcalis como son las fibras de vidrio. Todas estas fibras se fabrican usualmente de material virgen. Sin embargo, las fibras provenientes de materiales reciclados podrían mejorar algunas propiedades mecánicas de concretos.

3.2. Concreto Polimérico

De los materiales de construcción existentes, el concreto hidráulico a base de cemento Portland (CCP), es el material más utilizado para construcciones en el mundo. No obstante, presenta algunas desventajas como alto grado de porosidad que afecta directamente su rendimiento y

limita sus aplicaciones; la débil adherencia a ciertos materiales; baja resistencia a medios agresivos y al agua salada; así como pobre aislamiento eléctrico. Razones por las cuales se han buscado y propuesto tecnologías alternas que toman en cuenta otros materiales, como los polímeros.

El Concreto Polimérico (CP) es un material compuesto que consta de la mezcla de una resina termoestable y agregados minerales, a diferencia del agua y el cemento tipo Portland utilizados en la elaboración del cemento hidráulico. En la actualidad el concreto polimérico se emplea en el área de la construcción para la elaboración de pisos industriales, mesones para baños y cocinas, saunas, tanques para almacenamiento de agua y prefabricados para el campo de la construcción; igualmente se usa en aplicaciones eléctricas tales como: aisladores para transmisión de alta tensión, soporte para aislamiento de bujes, núcleos sólidos para aislamiento (Mayra, Valencia & Mina, 2010).

Las características y propiedades (Tabla 4), de los concretos poliméricos son:

- Ligereza: de una décima parte a una tercera parte del peso del concreto hidráulico.
- Alta resistencia: Resistencia a la compresión, flexión y tracción desde tres hasta cinco veces mayor que la del concreto hidráulico.
- Menores costos de instalación - fácil de manejar, no son necesarios equipos especiales.
- Estable bajo condiciones de congelación / descongelación.
- Baja absorción de agua: menor del 1% según la norma ASTM D-570.
- Resistente a la corrosión: Resistente a ataques químicos, al ambiente y otras formas de deterioro.
- Rentable: Supera a los materiales convencionales por más tiempo de vida útil.
- No conductor: No requieren de conexión a tierra.

Propiedad	Valor
Resistencia a la compresión, kg/cm ²	900-1500
Resistencia a la tensión, kg/cm ²	120-190
Resistencia a la tensión, kg/cm ²	190-300
Peso específico, kg/dm ³	1.8-2.3
Módulo de elasticidad, kg/cm ²	0.4-0.45 x10 ⁶
Absorción de agua, %	0.3-0.6
Conductividad térmica, Kcal/mh°C	0.8-2.6
Resistencia a la abrasión, cm ³ /cm ²	0.025
Resistencia a la temperatura, °C	-40 -100

Tabla 4. Propiedades del Concreto Polimérico

Las matrices utilizadas en concretos poliméricos son plásticos termoestables, tales como resinas epoxi, resinas de poliéster ortoftálicas, de poliéster isoftálicas, vinil éster o bisfenólicas; las de poliéster son las más ampliamente utilizadas (Tabla 5).

Tipo	Dureza Barcol	Resistencia a la Tensión (MPa)	Módulo de Tensión (GPa)	Elongación (%)	Resistencia a la Flexión (MPa)	Módulo de Flexión (GPa)	Resistencia a la Compresión (MPa)
Ortoftálica	...	55	3.45	2.1	80	3.45	...
Isoftálica	40	75	3.38	3.3	130	3.59	120
BPA	34	40	2.83	1.4	110	3.38	100
Vinil Ester	35	80	3.59	4.0	140	3.72	...

Tabla 5. Propiedades mecánicas de resinas de poliéster

El concreto polimérico es de tres a cinco veces más resistente que el concreto hidráulico ha alcanzado valores de hasta 150 MPa (Martínez-Barrera, Villareal, Viguera-Santiago, Hernández-López & Brostow, 2008), pero su fragilidad en el punto de falla limitó su utilidad en aplicaciones donde intervienen grandes cargas, por lo que es necesario mejorar la rigidez y el comportamiento esfuerzo-deformación, primordialmente en lo referente al módulo de Young. Para solucionar este problema se han propuesto: a) llevar a cabo procesos de post-curado, consistente en calentar a cierta temperatura el concreto por determinado tiempo, realizándolo por etapas, o bien b) reforzarlo con fibras, entre las que se encuentran las fibras sintéticas o las naturales; cuya influencia se ve reflejada en el mejoramiento de propiedades como la rigidez y la ductilidad (Martínez-Barrera, Viguera-Santiago, Martínez-López, Ribeiro, Ferreira & Brostow, 2013).

Uno de los problemas asociados con el uso de resinas de poliéster en la elaboración de concretos poliméricos es su contracción volumétrica de 6 a 8% durante el curado. Esto limita tener una superficie de alta calidad, así como adecuada estabilidad dimensional. Razón por la cual, las propiedades físicas de concretos a base de resina poliéster son controladas por el material de refuerzo (Davallo, Pasdar & Mohseni, 2010).

En concretos poliméricos también se han realizado estudios con materiales reciclados. João Marciano (Reis, 2009) estudió el comportamiento mecánico de concretos elaborados con resina poliéster, arena virgen y arena reciclada proveniente de procesos de fundición (metalúrgicos). Los resultados muestran mejor comportamiento mecánico, principalmente en la resistencia a la compresión, que el concreto polimérico elaborado con arena reciclada. También João y Marco (Reis, Silva-Nunes & Cerri-Triques, 2009) estudiaron el efecto de fibras textiles de poliéster recicladas procedentes de la industria del vestido. Se analizaron las propiedades mecánicas, la fractura y la propagación de grietas del concreto polimérico. Los resultados muestran mejoramiento en propiedades mecánicas con el uso de las fibras recicladas.

4. Caso de Estudio: Concreto Reforzado con Materiales Reciclados de Tetra Pak

Son escasos los estudios que involucran el uso de los materiales de reciclaje de envases de Tetra Pak. No obstante, M. Hidalgo (Hidalgo, 2011) estudió la viabilidad del uso de polietileno de baja densidad (LDPE) y el aluminio reciclados de envases Tetra Pak para la fabricación de tableros rígidos utilizando una prensa caliente. El polietileno-aluminio se modificó al compactarlo a 46 Psi de presión y una temperatura de 180°C. Los resultados muestran mayor resistencia a la

tracción y menor absorción de agua; con los cuales los tableros producidos pueden ser utilizados en la fabricación de bobinas de cable.

Hashem Rhamin (Rahamin, Madhoushi, Tabarsa & Firuzabad, 2013) publicó un estudio sobre la elaboración de paneles con densidad de 1 g/mm^3 a partir de envases Tetra Pak. El material compuesto fue elaborado con laminillas de $5 \times 5 \text{ cm}$ de Tetra Pak y resina de Melanina Urea Formaldehído (MUF). Se utilizaron tres diferentes concentraciones (0, 9 y 12 %) con dos tiempos de prensado (10 y 12 min). Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas (absorción de agua, hinchamiento, módulo de ruptura, módulo de elasticidad). Los resultados muestran mejoramiento en las propiedades mecánicas.

En un estudio realizado por los autores, se evaluó el efecto de las partículas de Tetra Pak en concretos poliméricos. Se realizaron ensayos de compresión y flexión, así como el cálculo del módulo de Young; con la finalidad de conocer el efecto de las partículas en la deformación.

Las probetas de concreto polimérico se elaboraron con resina poliéster insaturada ortoftálica y arena sílice. Cuyas propiedades se mencionan en las Tablas 6 y 7.

Propiedades	Especificaciones
No volátiles	60 – 64 %
Viscosidad Brookfield	100 cPs
Número ácido base solución	12 – 26 mg KOH /g muestra
Tiempo de gel	6 – 8 minutos
Temperatura de exoterma	145 – 163 °C
Tiempo de curado (máximo)	16 minutos
Peso específico	9.10 – 9.30 lb/gal
Estabilidad a 105 °C (mínimo)	4 horas

Tabla 6. Propiedades de resina poliéster insaturado

Propiedad	Valores
Densidad aparente, (g/cm^3)	1.56
Densidad de partículas, (g/cm^3)	2.6
Dureza (escala de Mohs)	7.0
Diámetro promedio D50, (μm)	245

Tabla 7. Propiedades físicas de la arena sílice

Las probetas de concreto polimérico se elaboraron con 80% de arena sílice y 20% de resina poliéster, y con diferentes porcentajes de partículas de Tetra Pak (2, 4 y 6 % en peso). Como se muestra en La Tabla 8.

Probeta (Código)	Resina	Arena	Partícula
CP0	20.0	80.0	0.0
CP2	20.0	78.0	2.0
CP4	20.0	76.0	4.0
CP6	20.0	74.0	6.0

Tabla 8. Composición de las mezclas de concreto polimérico (% en volumen)

Para comenzar la polimerización de la resina, se agregó 2% en peso de peróxido de metiletil cetona por cada 100 g de resina.

4.1. Resistencia a la Compresión

La evaluación de la resistencia mecánica a la compresión de las probetas de concreto polimérico se realizó en una Máquina Universal de Pruebas marca Controls^{MR}.

En general, la resistencia a la compresión de concretos poliméricos disminuye al incrementar la concentración de partículas de Tetra Pak (Figura 6). La resistencia a la compresión del concreto control (sin partículas) es de 90 MPa. La disminución de la resistencia va desde 7% hasta 27%, para concentraciones de partículas del 2 y 6%, respectivamente.

En cuanto al tamaño de las partículas, para cada concentración se observan solo ligeras variaciones en los valores. Por lo tanto, el tamaño de partícula no tiene gran influencia en la resistencia a la compresión.

El cambio en la resistencia del concreto polimérico se atribuye a los fenómenos que se presentan en la interface entre el concreto polimérico y las partículas de Tetra Pak, teniéndose: a) transferencia ineficiente de esfuerzos; b) pobre interacción entre los componentes de concreto polimérico (resina de poliéster y sílice) y capas de polietileno de los envases Tetra Pak y c) pobre adhesión entre la matriz que es de poliéster (hidrofóbica) y la celulosa (hidrofílica) de los envases Tetra Pak).

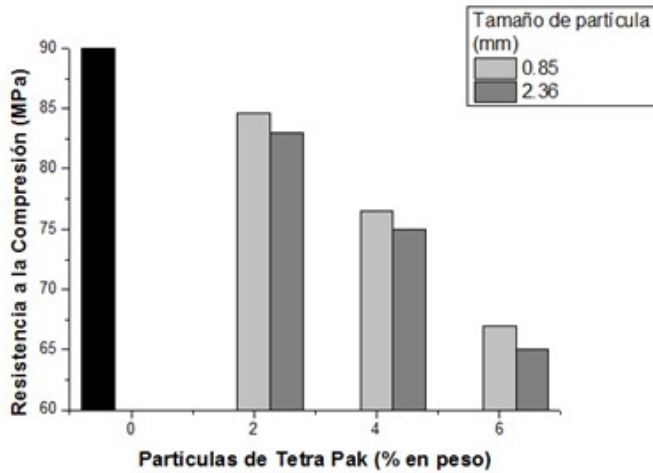


Figura 6. Resistencia a la compresión de concretos poliméricos con partículas de Tetra Pak

A pesar de que las partículas de Tetra Pak son sometidas a un proceso de secado antes de la preparación de las probetas de concreto, no es posible eliminar completamente la humedad de la celulosa. Esta humedad puede actuar como un agente de separación en la interfase entre las partículas de Tetra Pak y la matriz de resina.

4.2. Deformación en el Punto de Máximo Esfuerzo en Compresión

La deformación en el punto de máximo esfuerzo en compresión (Figura 7) disminuye con el incremento de partículas. La deformación del concreto control es de 0.0036 mm/mm. La deformación disminuye hasta un 15% para la concentración de partículas más alta de 6%. En general, no hay variaciones significativas en los valores respecto al tamaño de partícula.

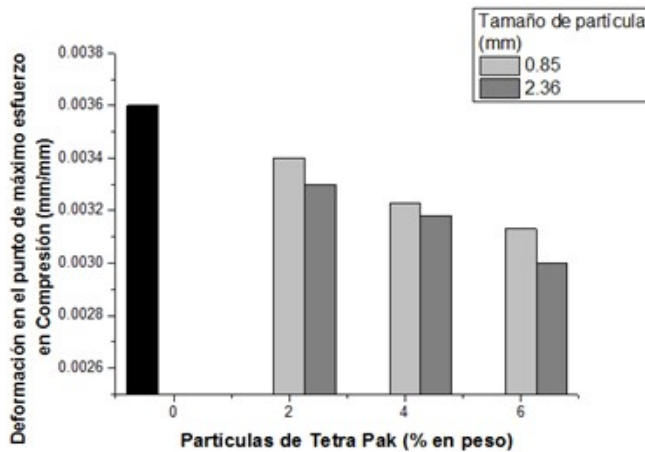


Figura 7. Deformación en el punto de máximo esfuerzo de concretos poliméricos con partículas de Tetra Pak

4.3. Resistencia a la Flexión

La resistencia a la flexión disminuye con el incremento de la concentración y tamaño de partículas de Tetra Pak. La resistencia disminuye hasta 21% para una concentración de partículas del 6%. Por otra parte, el tamaño de partícula tiene un efecto moderado en la resistencia a la flexión del concreto polimérico. La disminución en los valores de la resistencia a la flexión se debe a la ineficiente transferencia de cargas entre las partículas de Tetra Pak y la matriz polimérica por la débil interacción que existe entre ellas.

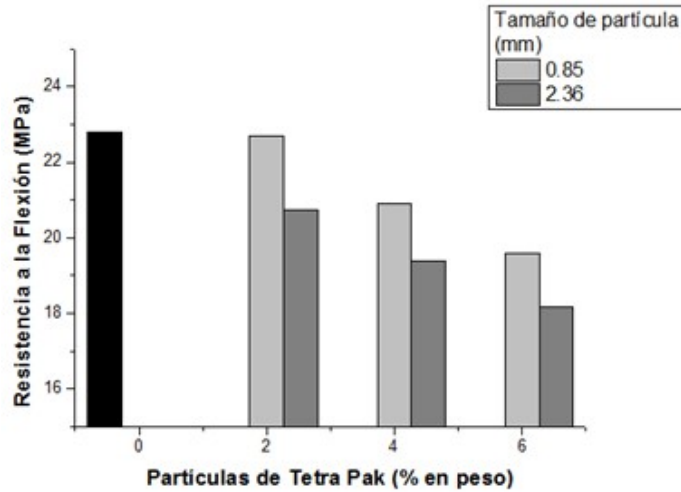


Figura 8. Resistencia a la Flexión de concretos poliméricos con partículas de Tetra Pak

4.4. Deformación en el Punto de Máximo Esfuerzo en Flexión

La deformación debido a esfuerzos de flexión disminuye cuando se incrementa la concentración de Tetra Pak pero sólo para tamaños de partícula mayores (2.36 mm). La deformación del concreto control es de 0.56 mm. Esta misma deformación se presenta para concentraciones de 2 y 6% de partículas de 0.85 mm.

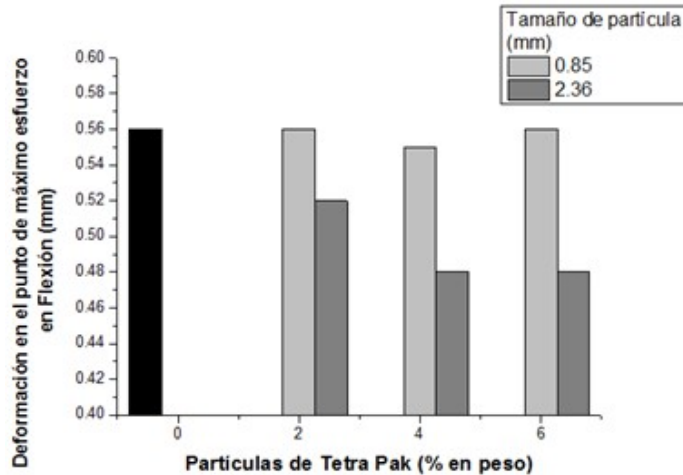


Figura 9. Deformación en el punto de máximo esfuerzo de concretos poliméricos con partículas de Tetra Pak

La deformación de concretos con tamaños de partícula de 0.85 mm es igual a la deformación del concreto control. Esto se atribuye a la mejor distribución de las partículas debido a su menor tamaño en comparación con los otros tipos de concreto (2.36 mm de tamaño de partícula).

4.5. Módulo de Young

El valor del módulo de Young es de 33 GPa para el concreto control. Este valor disminuye 10% para 6% de partículas de Tetra Pak (Figura 10). La disminución de estos valores se atribuye a la humedad presente en la celulosa de las partículas de Tetra Pak, que no permite la transferencia eficiente de esfuerzos entre los componentes del concreto. Es importante mencionar que durante la elaboración de las probetas de concreto polimérico se alcanzan temperaturas superiores a 130°C debido a la polimerización exotérmica de la resina, de modo que la humedad presente en la celulosa puede evaporarse y producir poros en la matriz polimérica, lo que puede modificar las propiedades mecánicas del concreto polímero y en consecuencia el módulo de Young.

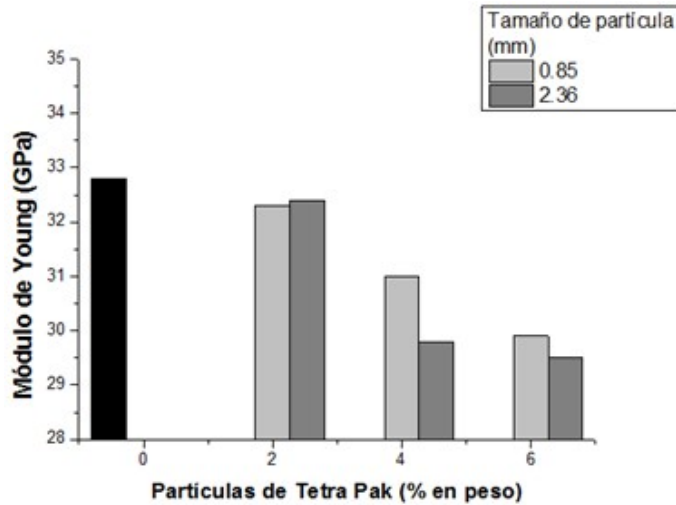


Figura 10. Módulo de Young de concretos poliméricos con partículas de Tetra Pak

5. Conclusiones

Son evidentes los esfuerzos de investigadores por utilizar materiales reciclados de los envase de Tetra Pak en el concreto, no obstante se requiere un número mayor de investigaciones sobre el tema. En el caso de estudio presentado se observa que las partículas de Tetra Pak reciclados disminuyen gradualmente las propiedades mecánicas del concreto polimérico. La resistencia a la compresión disminuye 6% pero la resistencia a la flexión sólo 0.1% respecto al concreto sin partículas recicladas. Más aún la deformación de los concretos respecto a esfuerzos de flexión es casi constante, es decir se ha logrado disminuir los valores en flexión, lo que indica que el concreto tiende a ser más elástico. Prueba de ello es la disminución del módulo de Young, el parámetro más importante para diagnosticar la dureza o flexibilidad de un material. Futuras investigaciones estarán enfocadas al estudio de la adhesión entre las partículas de Tetra Pak y la matriz polimérica, con la cual, en principio, es posible mejorar la transferencia de esfuerzos entre ambos materiales.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) por el apoyo económico a través del proyecto UAEM 3408/2013M (Megaproyecto). Así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), por la beca mixta otorgada para la realización de una estancia de investigación en Brasil a Miguel Martínez López, alumno del Doctorado en Ciencias Ambientales de la UAEM.

Referencias

Aggarwal, V., Gupta, S.M., & Sachdeva, S.N. (2012). High volume fly ash concrete: a green concrete. *Journal of Environmental Research and Development*, 6(3), 884-887.

Atila, M., Murathan, A.S., Guru, M., & Balbasi, M. (2007). Manufacturing low density boards from waste aluminium. *Materials and Design*, 28(7), 2215-2217.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2006.06.014>

Davallo, M., Pasdar, H., & Mohseni, M. (2010). Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Resin. *International Journal of ChemTech Research*, 2(4), 2113-2117.

Gonon, L., Chabert, B., Bernard, A., Van Hoyweghen, D., & Gerard, J.F. (1997). New Coupling Agents as Adhesion Promoters at the Poly(Phenylene Sulfide)/Glass Interface-Studies with Micro and Macro Composites. *The Journal of Adhesion*, 61(4), 271-292.
<http://dx.doi.org/10.1080/00218469708010526>

González-Benito, J., Cabanelas, J.C., Aznar, A.J., Vigil, M.R., Bravo, J., & Baselga, J. (1996). Surface characterization of silanized glass fibers by labeling with environmentally sensitive fluorophores. *Applied Polymer*, 62(2), 375-384.

Hardjito, D., Cheak, C.C., & Ho Lee, C.H. (2008). Strength and Setting Times of Low Calcium Fly. *Modern Applied Science*, 2(4), 3-11. <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v2n4p3>

Hidalgo, M. (2011). Manufacturing rigid board by packaging waste containing aluminum and polyethylene. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 70(3), 232-234.

Kim, J.K., & Gao, S.L. (2000). Interface adhesion and interlaminar fracture resistance of carbon/PEEK composites influenced by cooling rate. *Key Engineering Materials*, 187(2), 1063-1068. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.183-187.1063>

Korkmaz, A., Yanik, J., Brebu, M., & Vasile, C. (2009). Pyrolysis of the Tetra Pak. *Waste Management*, 29(11), 2836-2841. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.07.008>

Lenhart, J.L., Dunkers, J.P., Van Zanten, J.H., & Parnas, R.S. (2000). Characterization of sizing layers and buried polymer/sizing/substrate interfacial regions using a localized fluorescent probe. *Journal of Colloid and Interface Science*, 257(2), 398-407. [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9797\(02\)00035-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9797(02)00035-8)

Mäder, E., Zhandarov, S., Gao, S.L., Zhou, X.F., & Nutt, S.R. (2002). Bond strength measurement between glass fibers and epoxy resin at elevated temperatures using the pull-out and push-out techniques. *The Journal of Adhesion*, 78(7), 547-569. <http://dx.doi.org/10.1080/00218460213737>

Martínez-Barrera, G., Viguera-Santiago, E., Martínez-López, M., Ribeiro, M.C., Ferreira, A.J.M., & Brostow, W. (2013). Luffa fibers and gamma radiation as improvement tools of polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 86-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.038>

Martínez-Barrera, G., Villareal, U., Viguera-Santiago, E., Hernandez-Lopez, S., & Brostow, W. (2008). Compressive Strength of Gamma-Irradiated Polymer Concrete. *Polymer Composites*, 29(11), 1211-1217. <http://dx.doi.org/10.1002/pc.20432>

Mayra, E., Valencia, P., & Mina, E. (2010). Caracterización fisicomecánica de concreto polimérico basado en resina poliéster. *Revista Científica Guillermo de Ockham*, 8(1), 83-93.

Olmos, D., & González-Benito, J. (2010). Composites formed by glass fibers and PS-modified epoxy matrix. Influence of the glass fibers surface on the morphologies and mechanical properties of the interphases generated. *Polymer Composites*, 31(6), 946-955.

Prikryl, R., Cech, V., Balkova, R., & Venek, J. (2003). Functional interlayers in multiphase materials. *Surface and Coatings Technology*, 174(175), 858-862. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00704-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00704-7)

Rahamin, H., Madhoushi, M., Tabarsa, T., & Firuzabad, M.R.D. (2013). Investigation on feasibility of manufacturing "Carton board" from recycled beverage carton (Tetra Pak containers) without using resin. *World Science Journal*, 1(3), 170-179.

Rahman, M.M., Islam, M.A., Ahmed, M., & Salam, M.A. (2012). Recycled Polymer Materials as Aggregates for Concrete and Blocks. *Journal of Chemical Engineering*, 27(1), 53-57.

Reis, J.M.L. (2009). Effect of textile waste on the mechanical properties of polymer concrete. *Materials Research*, 12(1), 63-67. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392009000100007>

Reis, J.M.L., Silva-Nunes, L.C., & Cerri-Triques, A.L. (2009). Mechanical Characterization Using Optical Fiber Sensors of Polyester Polymer Concrete Made with Recycled Aggregates. *Materials Research*, 12(3), 269-270. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392009000300004>