



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Maestría en Ciencias (Construcción)

**PÁNELES PREFABRICADOS CON MATERIAL PLÁSTICO PET RECICLADO
 COMO MATERIAL SUSTENTABLE EN LA CONSTRUCCIÓN.**

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
 Maestría en Ciencias (Construcción)

Presenta:
 Ing. Elvick Alejandro Noguera Dávila

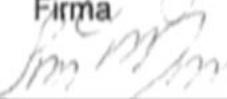
Dirigido por:
 M.I. Rubén Ramírez Jiménez

M.I. Rubén Ramírez Jiménez
 Presidente



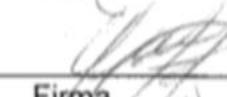
 Firma

Dr. José Luis Reyes Araiza
 Secretario



 Firma

M.C. Felipe Ortiz Arredondo
 Vocal



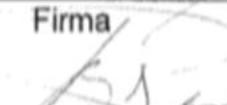
 Firma

Dr. Alejandro Manzano Ramírez
 Suplente



 Firma

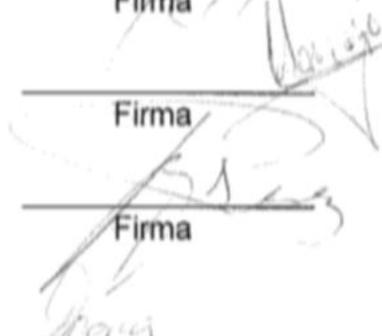
Dra. María de la Luz Pérez Rea
 Suplente



 Firma



 Dr. Manuel Toledano Ayala
 Director de la Facultad



 Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
 Director de Investigación y Posgrado

RESUMEN

Dentro del campo de la construcción, y a lo largo de la historia, se han desarrollado numerosos materiales para la edificación, siempre buscando el objetivo de desarrollar materiales resistentes, económicos, innovadores y que contribuyan a un desarrollo sustentables entre el medio ambiente y la construcción, por esta razón es la importancia de experimentar con materiales reciclados como componentes de materiales y desechos cotidianos que generalmente son de un solo uso. Este trabajo se enfoca en el uso del polímero PET, por sus siglas, polietileno tereftalato, derivado de recipientes plásticos, que su principal uso es el contener sustancias de la industria alimenticia, y que es de usos muy limitados antes de la disposición del mismo, con el fin de obtener un elemento que será utilizado como un panel para muros divisorios, los cuales son muy comúnmente utilizados en la industria de la construcción pero utilizando materiales más convencionales y de bajo índice de reciclaje, como lo es el yeso. Se fabricaron 30 probetas de medidas 20x20x0.7 cms cada una, divididas en diferentes tiempos de procesado térmico, 3, 5, 7 horas, dando como resultado óptimo las probetas procesadas térmicamente durante 7 horas. Estas probetas fueron sometidas a diferentes pruebas mecánicas, fue calculado la densidad el producto final, así como su absorción de agua después de 24 horas y su resistencia a la flexión y la tensión máxima a la que fueron sometidos estos especímenes antes de su falla. Estos elementos presentaron una densidad un poco menor que la del material PET virgen, lo que se traduce en un aligeramiento en los paneles y mejor manejo del mismo. Su resistencia a la flexión resultó en el orden de los 150 kg/cm², lo cual se traduce en ser un material muy resistente para el uso para el que se le fue diseñado. Y al mismo tiempo se reduce y mitiga el daño ambiental que este material está ocasionando alrededor del mundo.

Palabras Clave: Desarrollo sustentable, Polietileno Tereftalato, Termoplástico, Panel, Termofusión, Muro divisorio.

SUMMARY

Within the field of construction, and throughout history, numerous building materials have been developed, always seeking the objective of developing resistant, economic, innovative materials that contribute to a sustainable development between the environment and construction, For this reason, it is important to experiment with recycled materials as components of everyday materials and waste that are generally for single use. This work focuses on the use of PET polymer, for its acronym, polyethylene terephthalate, derived from plastic containers, whose main use is to contain substances from the food industry, and which is of very limited uses before the disposal thereof, in order to obtain an element that will be used as a panel for dividing walls, which are very commonly used in the construction industry but using more conventional and low recycling materials, such as plaster. 30 test pieces measuring 20x20x0.7 cm each were fabricated, divided into different thermal processing times, 3, 5, 7 hours, giving as an optimal result the heat processed specimens for 7 hours. These specimens were subjected to different mechanical tests, density was calculated the final product, as well as its water absorption after 24 hours and its resistance to bending and the maximum tension to which these specimens were subjected before its failure. These elements presented a density a little lower than that of the virgin PET material, which translates into a lightening in the panels and better handling of the same. Its resistance to bending resulted in the order of 150 kg / cm², which translates into being a very resistant material for the use for which it was designed. And at the same time the environmental damage that this material is causing around the world is reduced and mitigated.

Keywords: Sustainable development, Polyethylene terephthalate, Thermoplastic, Panel, Thermofusion, Dividing wall.

DEDICATORIA

A DIOS

Primeramente, gracias santo padre, por permitirme escribir estas líneas, te agradezco, por ayudarme, cuidarme y bendecirme en todo momento.

A MIS PADRES

Gracias por su apoyo, por creer, confiar en mí y animarme en seguir adelante en todo momento, por estar siempre a mi lado, este logro no solo es mío sino también de ustedes.

A MIS HERMANAS

Ya que siempre me estuvieron apoyando en todo momento y siempre encuentro consuelo en sus palabras. Mis mejores deseos para ellas, también este es un logro suyo.

A MI FAMILIA Y AMIGOS

Gracias por su apoyo incondicional a todos y cada uno de ellos, ya que con su apoyo me he convertido en la persona que soy hoy y he aprendido las lecciones más importantes en mi vida.

A MI NOVIA

Gracias por siempre estar ahí para mí, gracias por cuidarme y preocuparte por mí, gracias por siempre apoyarme en todo momento.

Agradezco a todas las personas que me apoyaron con este trabajo, que invirtieron tiempo y dedicación, y a los que contribuyeron con su granito de arena, con comentarios, sugerencias y aportaciones para que esto saliera adelante... muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el M.I. Rubén Ramírez Jiménez, por su apoyo y confianza para realizar este trabajo. Gracias por apoyarme y brindarme su amistad y consejos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), por el apoyo y los financiamientos brindados para la realización de este trabajo.

A mis sinodales Dr. José Luis Reyes Araiza, M.C. Felipe Ortiz Arredondo, Dr. Alejandro Manzano Ramírez y la Dra. María de la Luz Pérez Rea; por sus comentarios y aportes a este trabajo de tesis.

Al Dr. José Luis Reyes Araiza por sus críticas, comentarios y consejos durante la realización de este trabajo.

A todos los profesores y personal de la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DIPFI) los cuales formaron mi conocimiento durante mi estancia en la institución.

A mis compañeros de generación ya que ayudaron a tener un ambiente de amistad y compañerismo además haciendo que este fuese más ameno a lo largo de los dos años en el posgrado.

Y a todos los que hicieron posible la realización de este trabajo. Muchas gracias.

INDICE

RESUMEN.....	2
SUMMARY.....	3
DEDICATORIAS.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
ÍNDICE.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.1.1 CONTAMINACIÓN EN LOS OCEANOS.....	20
1.1.1.1 OCEANO PACIFICO.....	20
1.1.1.2 OCEANO ATLANTICO.....	21
1.1.1.3 OCEANO INDICO.....	21
1.1.1.4 OCEANO ARTICO.....	21
1.1.1.5 OCEANO ANTARTICO.....	22
1.2 ORIGEN DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS MARINOS.....	22
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	24
1.4 HIPOTESIS.....	24
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	25
1.6 OBJETIVOS PARTICULARES.....	25
2. ANTECEDENTES.....	26
2.1. ¿QUÉ ES UN POLIMERO?.....	26
2.2. CLASIFICACION DE LOS POLIMEROS.....	26
2.3. ¿QUÉ ES UN TERMOPLASTICO?.....	28
2.4. ¿QUÉ ES UN POLÍMERO TERMOESTABLE?.....	30
2.5. ¿QUÉ ES EL PET?.....	31
2.6. TIPOS DE PET.....	33
2.7. APLICACIONES DEL PET.....	33
2.8. RECICLAJE DEL PET.....	34
2.9. USOS Y APLICACIONES DEL PET EN LA CONSTRUCCIÓN.....	34
2.9.1. BOTELLAS DE PET COMO MATERIAL SUSTENTABLE DE CONSTRUCCIÓN.....	35
2.9.2. DESARROLLO DE UNA BOTELLA DE PLASTICO UTILIZABLE COMO BLOQUE DE CONSTRUCCIÓN.....	36
2.9.3. USO DE DESECHOS PLÁSTICOS PET COMO AGREGADOS EN LA MEZCLA DE CONCRETO.....	39
2.9.4. AGREGADOS DE DESECHOS PET EN MORTEROS POLIMÉRICOS.....	40

2.9.5. PÁNELES FABRICADOS CON PLASTICOS RECICLADOS Y RESINA.....	42
3. METODOLOGÍA.....	48
3.1. BANCO DE MATERIALES DE LA MATERIA PRIMA.....	48
3.2. MATERIALES.....	50
3.3. EQUIPO.....	50
3.3.1. EQUIPO MANUAL.....	50
3.3.2. EQUIPO ELECTRICO Y MECÁNICO.....	51
3.4. ELABORACIÓN Y ENSAYE DE PROBETAS.....	51
3.4.1. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE PET.....	51
3.5. PRUEBAS DE DENSIDAD DE PROBETAS DE PET.....	56
3.6. PRUEBA DE ABSORCIÓN EN 24 HORAS A PROBETAS DE PET.....	57
3.7. PRUEBA DE FLEXIÓN A PROBETAS DE PET.....	58
3.7.1. CÁLCULO DE LA TENSIÓN MÁXIMA DE PROBETAS DE PET.....	60
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN.....	61
4.1. RESULTADOS DE PRUEBA DE DENSIDAD.....	61
4.2. RESULTADOS DE PRUEBA DE ABSORCIÓN EN 24 HORAS.....	62
4.3. RESULTADOS DE PRUEBAS A FLEXIÓN EN PROBETAS DE PET.....	63
5. CONCLUSIONES.....	70
6. REFERENCIAS.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA

1. Producción mundial de plásticos distribuidos por países productores, 2001....	15
2. Producción mundial de plásticos por tipo de plástico.....	16
3. Enlaces cruzados de un polímero termoestable.....	26
4. Estructura esquemática de un termoplástico.....	27
5. Pirámide de excelencia para algunas familias de termoplásticos	28
6. Estructura química del PET.....	31
7. Reacción química para formar PET	31
8. Prueba aplicada en botellas de PET de desecho llenas de suelo y cerrado herméticamente.....	35
9. Diseño de PET(b)rick 1.0	36
10. Desempeño de la botella con 0.2 kN y 1.2 kN de carga respectivamente.....	37
11. Comparación de prueba a compresión con diferentes materiales de relleno.....	37
12. Ensayo a flexión de especímenes de resinas epoxi-arena-PET triturado.....	40
13. Ensayo a compresión de especímenes de resinas epoxi-arena-PET triturado.....	41
14. Molde metálico utilizado en la mezcla de desechos plásticos con resina náutica.....	43
15. Panel de residuos plásticos con resina náutica desarrollado por Gaggino.....	44
16. Ensayo a resistencia a compresión de panel con residuos plásticos y resina náutica.....	45
17. Ensayo a resistencia a flexión de panel con residuos plásticos y resina náutica.....	46
18. Material plástico PET.....	48
19. Mufla utilizada para termofusionar el material PET fijada a 275°C.....	52
20. Proceso de termofusión del PET después de 60 minutos.....	52
21. Molde metálico para probetas de PET.....	53

22. Molde metálico destapado una vez endurecido el material PET.....	53
23. Panel medido y cortado transversalmente con cuchilla.....	54
24. Micrómetro digital utilizado para medir la deflexión.....	54
25. Rodillos de apoyo para pruebas a flexión.....	55
26. Rodillos de carga para pruebas a flexión.....	55
27. Pesado de probeta de PET.....	56
28. Medición de anchura de probeta de PET.....	56
29. Inmersión de probetas de PET en agua.....	57
30. Prueba de flexión a probeta de PET.....	58
31. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 1.....	64
32. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 2.....	64
33. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 3.....	65
34. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 4.....	65
35. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 5.....	66
36. Gráfico de Carga/Deformación de conjunto de probetas.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA

1. Cantidad estimada de desechos plásticos marinos flotando en los océanos del mundo y el mar mediterráneo.....	18
2. Estimaciones de desechos para el 2010 de los principales 10 países clasificados por la masa de residuos plásticos mal administrados.....	22
3. Resultados de la densidad de probetas PET.....	60
4. Resultados de absorción en probetas de PET.....	61
5. Caracterización de probetas ensayadas a flexión.....	62
6. Resultados de carga vs deformación de probetas de PET sometidas a flexión.....	63
7. Resultados de resistencia a la flexión en probetas ensayadas.....	67
8. Resultados de tensión máxima en probetas de PET ensayadas.....	68

1 INTRODUCCIÓN

En este documento de investigación se aborda el estudio de la propuesta de un material plástico, el polietileno tereftalato, conocido también por sus siglas en inglés PET, que por medio de procesos de termofusión y reciclaje sea posteriormente utilizado como un material versátil en la industria de la construcción, mitigando de esta manera tanto el daño ambiental que provoca el uso de este polímero no biodegradable, como los residuos poco reciclables de los materiales utilizados en las obras civiles.

Esta investigación busca abordar el problema de la contaminación ambiental y proponer un método donde un material de desecho pueda sustituir sustentablemente otros materiales prefabricados utilizados ampliamente y de manera continua en el ramo de la construcción, pero que a su vez no son materiales reutilizables, lo que los convierte de igual manera en generadores de contaminación al medio ambiente.

El progreso y bienestar que hoy se goza en los países industrializados también se ve reflejado en efectos indeseados, como son severos impactos al medio ambiente a escala global y local, producto de un consumo desenfrenado de recursos en materiales y energía. Hay otras muchas señales que nos indican la falta de sustentabilidad en nuestras formas de producir, comerciar y consumir. Un mensaje claro de los desajustes del estilo de vida con el entorno es la evidente acumulación de residuos que se vierten en mayor o menor escala y con diferentes características en la mayoría de las sociedades del mundo. El problema de los residuos es un mal de hoy, difícil de soportar, pero factible de atender para reducir sus consecuencias.

Este esfuerzo busca presentar una alternativa para conservar la utilidad y alargar el ciclo de vida de los residuos de este tipo, lo que en principio busca cooperar a la disminución de las cantidades de polietileno tereftalato para ser reciclados o revalorados y, en el caso más indeseable, a postergar su depósito en los rellenos municipales.

De manera consistente crece en la sociedad el convencimiento de la necesidad por reducir la cantidad de residuos. Para lograrlo se debe disminuir el consumo de los mismos y después aumentar el reciclaje de estos materiales, y para ello se han desarrollado diversas técnicas que buscan retornar al ciclo industrial a los residuos, conservando de la mejor manera sus propiedades originales.

Desde nuestras posibilidades, buscando aportar a la mejora del medio ambiente por medio del reciclaje de residuos de polímeros, en este caso el polietileno tereftalato (PET), nos hemos propuesto desarrollar una forma innovadora y sencilla de alargar la vida útil de estos materiales, que generalmente son de un solo uso, y que pretende, por un lado, disminuir la demanda de materiales vírgenes y además permitirnos ofrecer un producto para la construcción que coopere con el cuidado del medio ambiente.

La necesidad del hombre por poseer un material que tenga diversas propiedades y características favorables tanto para la construcción como le medio ambiente lo ha llevado a experimentar con técnicas innovadoras para la fabricación de diversos materiales sustentables, desafortunadamente, esta tendencia no ha sido del todo aprobada por los constructores, quienes han preferido los sistemas constructivos tradicionales, y esto puede ser en parte porque ya se tiene un control total sobre los sistemas constructivos tradicionales, y modificar alguna parte de ese sistema generaría un cambio en la producción, el manejo del tiempo, el manejo de

los mismos materiales sustentables, lo cual genera incertidumbre y falta de confianza, por lo que no ha sido posible que la sociedad en general adopte estos nuevos sistemas y materiales que a la postre beneficiarían al medio ambiente y con ello, a todos los habitantes del mismo.

Por lo que nuestro objetivo en este trabajo es desarrollar un elemento prefabricado con un adecuado comportamiento estructural y con características mecánicas favorables como lo son la resistencia a compresión, resistencia a flexión, impermeabilidad, todo esto a partir de un proceso de reciclaje de material polimérico PET de desecho, buscando que a su vez ofrezca un beneficio ecológico.

1.1 Descripción del problema

El ser humano produce grandes cantidades de desperdicios. Algunos de estos desperdicios pueden ser “absorbidos”, reciclando desechos alimenticios como fertilizantes para cosechas, por ejemplo. Otra parte de estos desperdicios son no biodegradables, este es el caso de los plásticos, los cuales no pueden ser absorbidos por la naturaleza.

Gran parte de los desperdicios plásticos son acumulados, enterrados o incinerados legal o ilegalmente, causando impactos altamente negativos para el ecosistema.

Los depósitos a cielo abierto producen contaminación en el agua, suelo, aire y alimento. Producen un deterioro al paisaje, devaluación a la propiedad y consecuencias a la salud.

La combustión de desechos está justificada para prolongar la vida útil del vertedero y el control de enfermedades, pero produce grandes cantidades de contaminación al aire, además de producir gases carcinógenos.

El siglo XXI ha llevado consigo un uso casi ilimitado de los plásticos; los productos elaborados con estos materiales se encuentran presentes en la vida cotidiana formando parte de objetos como muebles, juguetes, piezas automotrices, ropa, contenedores de alimentos o productos, entre muchos otros. Sin embargo, con el desarrollo de la industria del plástico, desde hace aproximadamente más de 60 años, también se ha promovido indiscriminadamente el uso de envases

“desechables” para almacenamiento y transporte de toda clase de productos, los cuales después de una muy corta vida útil se convierten en basura, contribuyendo así al deterioro del entorno, ya que al degradarse, lo cual puede tomar un tiempo de hasta varios siglos, entran en la cadena alimenticia de la flora y fauna, y hasta del mismo ser humano. Evidentemente lo anterior ha llevado a una crisis ambiental que deriva en un desarrollo poco sustentable que en la actualidad alcanza dimensiones mundiales (Hernández, López, Martínez & Menchaca, 2015).

El rápido crecimiento resultante en la producción de plásticos ha sido extraordinario, superando a la mayoría de los demás materiales hechos por el hombre. Excepciones destacadas son los materiales que se utilizan ampliamente en el sector de la construcción, como el acero y el cemento. (World Steel Association, 2016).

Desde la aparición de los plásticos como materiales industriales, tanto su producción como el consumo de estos materiales ha crecido de forma sostenida, a excepción de ciclos que corresponden con hechos puntuales, como fue la crisis petrolera de los años setenta y la guerra de Irak en el año 2002. En fechas recientes esta tendencia al crecimiento se ha confirmado.

La producción mundial de plásticos para el año 2001 se concentra en tres grandes bloques de productores. Norteamérica y Europa Occidental dominan con el 27% de la producción mundial cada uno, Sudeste de Asia con el 24.5% y el resto se distribuye en las diferentes áreas geográficas del mundo (ver Figura 1). La producción mundial de plásticos para el año 2003 fue de 169 millones de toneladas (Godoy, 2014).

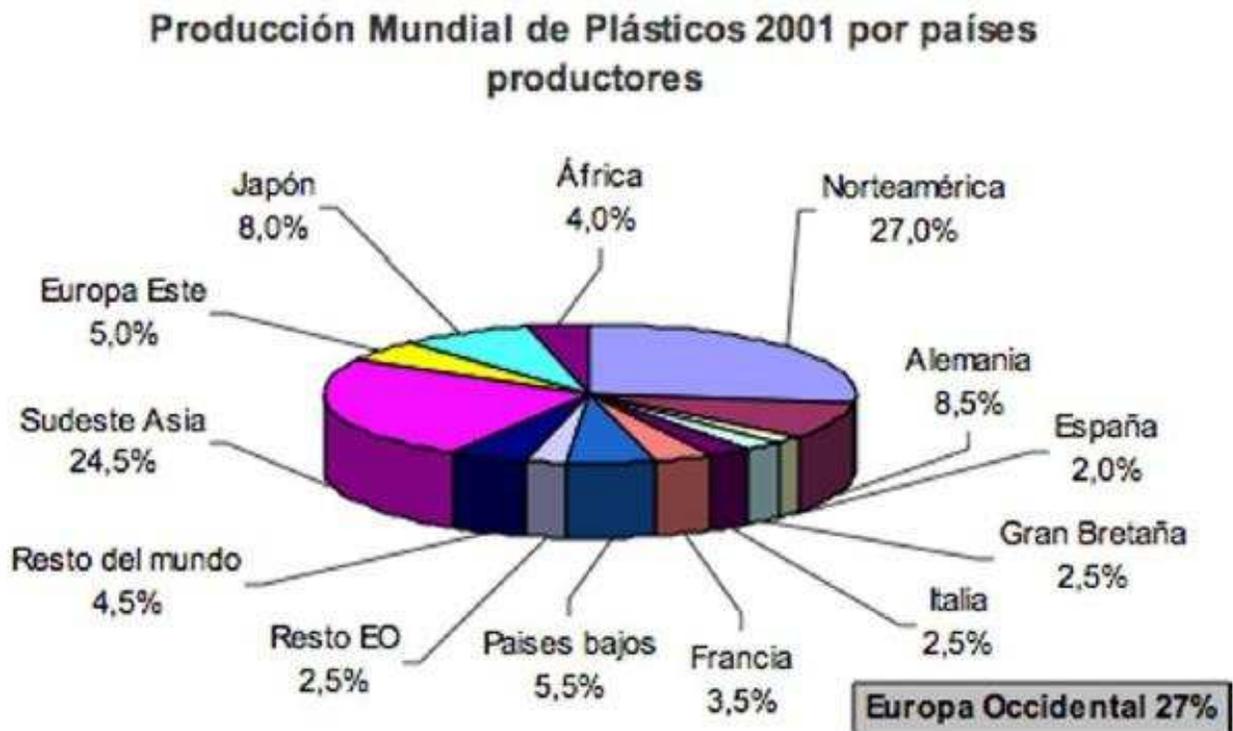


Figura 1. Producción Mundial de Plásticos distribuidos por países productores, 2001. Fuente: Godoy, 2014)

La producción global de resinas plásticas alcanzó para el 2012 la cifra de 288 millones de toneladas (Jambeck et al., 2015), lo que representa un incremento del 620% desde 1975.

El mercado más grande de plásticos es el envasado, una aplicación cuyo crecimiento se aceleró por un cambio global de contenedores reutilizables a contenedores de un solo uso. Como resultado, la presencia de los plásticos en los

desechos sólidos municipales aumentó. En 1960, los plásticos representaban menos del 1% de los desechos sólidos municipales en los países de ingresos medios y altos. Para el año 2005, los plásticos representaban al menos el 10% de los desechos sólidos en 58% de los países con información disponible. (Hoornweg, 2012).

En la producción mundial por tipo de plásticos, las poli-olefinas mantuvieron su hegemonía sobre otras resinas con un porcentaje total del 53%, seguidas de lejos por el PVC con 17%. La producción del polietileno tereftalato (PET) estuvo presente con un 5% de la producción global (Godoy, 2014).



Figura 2. Producción Mundial de Plásticos por tipo de plástico, 2001.

Fuente: Godoy, 2014.

Un estudio de Geyer et al. corrobora que los grupos más grandes en la producción total de plásticos no fibrosos son el Polietileno (PE) con 36%, polipropileno (PP) con el 21% y PVC con el 12%, seguidos del PET, PUR y PS con una cantidad menor al 10% cada uno.

Juntos, estos siete grupos representan el 92% de todos los plásticos fabricados. Aproximadamente el 42% de todos los plásticos que no son de fibra se han utilizado para el envasado, que se compone principalmente de PE, PP y PET. El sector de la construcción, que ha utilizado el 69% de todo el PVC producido, es el siguiente consumidor más grande, utilizando el 19% de todos los plásticos no fibrosos (Geyer et al., 2017).

La gran mayoría de los monómeros utilizados para fabricar plásticos, como etileno y el propileno, se derivan de hidrocarburos fósiles, lo cual significa que ninguno de los plásticos comúnmente utilizados es biodegradable.

Se estima que hasta la fecha se han producido 8,300 millones de toneladas métricas de plásticos vírgenes. A partir de 2015, se generaron aproximadamente 6300 toneladas métricas de desechos plásticos, alrededor del 9% de los cuales se reciclaron, el 12% se incineró y el 79% se acumuló en vertederos o en el entorno natural.

Los plásticos son polímeros orgánicos sintéticos o semi-sintéticos los cuales son baratos, ligeros, resistentes, durables y resistentes a la corrosión (Derraik, 2002). Estos tienden a fragilizarse y romperse en pequeños pedazos que eventualmente se degradan cuando son expuestos a radiación UV ya sea directamente a la luz solar o en el agua marina (Moore, 2008).

El tema de los desechos plásticos en las aguas oceánicas ha representado otra problemática con estos materiales en las últimas décadas. Siendo los desechos marinos definidos como cualquier material sólido persistente que es manufacturados o procesado y, directa o indirectamente, intencionalmente o no,

dispuesto o abandonado dentro del ambiente marino (Cornell University School, 2006).

Estudios realizados por Eriksen et al. en 2014 revelan que la contaminación plástica en los océanos del mundo alcanza más de 5 trillones de piezas de plástico, pesando en total más de 250,000 toneladas sobre el mar.

Han sido documentadas cinco parches de basura flotando en corrientes oceánicas. Los estimados sobre el tamaño, cantidades y composición sobre estos parches de basura varía, pero basándose en modelos oceanográficos y datos de expediciones, la cantidad calculada de desechos marinos plásticos flotando en los océanos del mundo y en el mar Mediterráneo se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Cantidad estimada de Desechos plásticos marinos flotando en los océanos del mundo y el mar Mediterráneo (Eriksen, 2014).

Región Marina	Conteo (n x 10¹⁰)	Peso (ton)
Pacífico Norte	199.0	96,400
Pacífico Sur	49.1	21,020
Atlántico Norte	93.0	56,470
Atlántico Sur	29.7	12,780
Océano Indico	130.0	59,130
Mediterráneo	24.7	23,150
Total	525.0	268,940

Debido a su resistencia a la degradación muchos residuos plásticos persistirán en el medio ambiente por siglos y serán transportados lejos de su fuente de procedencia, incluyendo grandes distancias en el océano.

1.1.1 Contaminación en los Océanos

1.1.1.1 Océano Pacífico

El “Gran parche de basura del Océano Pacífico”, también conocido como “el Parche de basura del este” es un área de desechos marinos encontrada flotando en las corrientes del Pacífico Norte.

Se ha estimado que el tamaño de este parche de basura flotante va desde los 700,000 Km² hasta más de 15,000,000 Km². Aproximadamente entre el 0.4% y el 8% del tamaño del Océano Pacífico.

Esta área de desechos plásticos se encuentra en constante movimiento y cambia dependiendo las corrientes marinas, pero se localiza entre las islas de Hawaii y el estado de California en los Estados Unidos.

De acuerdo con algunas descripciones, el “Gran parche del Pacífico” tiene la misma superficie que el estado de Texas, y es del doble de tamaño que el país de Francia (Lennard, 2010).

Moore estima que la abundancia y peso de los desechos plásticos marinos en el Pacífico Norte oscila de 31,982 a 969,777 piezas/Km², y 64 a 30,169 g/Km² respectivamente. Teniendo como resultado un promedio de concentración y peso de 334,271 piezas/Km² y 5,114 g/Km², respectivamente. (Moore, 2001).

1.1.1.2 Océano Atlántico

Esta parte del océano no cuenta una historia muy diferente a la del anterior visto, ya que Law et al. presentó un análisis de 22 años de datos recolectados por embarcaciones en el noroeste del océano atlántico y el mar caribe desde 1986 hasta 2008. La concentración más grande reportada fue de 580,000 piezas/Km² en mayo de 1997. (Law et al. 2010)

La concentración promedio en la parte media del Atlántico Norte es de 20,328 piezas/Km² con un peso promedio de 0.05 g/Km².

1.1.1.3 Océano Indico

El parche de basura del océano Índico fue descubierto en marzo-abril de 2010 por Eriksen y su tripulación. Ésta fue descrita como un área masiva de por lo menos 2 millones de Millas cuadradas, aproximadamente 5 millones de Km². (Parker, 2014).

1.1.1.4 Océano Ártico

Ha sido reportado que el hielo del mar Ártico de remotas locaciones contienen concentraciones de microplásticos en mayores magnitudes de las que habían sido anteriormente reportados en superficies de agua altamente contaminadas, como lo son las corrientes marinas del Pacífico.

Estos descubrimientos indican que los microplásticos se han acumulado lejos de las ciudades concurridas y que el hielo marino polar representa un importante e

histórico sumidero mundial de partículas artificiales hechas por el hombre. (Obbard, 2014).

1.1.1.5 Océano Antártico

El total de conteo de partículas en dos estaciones cerca de la Antártica fueron estimados en el rango de las 100,000 piezas/Km² (Isobe, 2016).

1.2 Origen de los Desechos Plásticos Marinos

Los desechos plásticos marinos pueden ser clasificados de acuerdo a su origen, así vengan de tierra o de actividades marítimas. Los que se originan en tierra representan hasta el 80% de los desechos marinos, los cuales son transportados al mar por medio del sistema de drenaje y alcantarillado, vías acuáticas naturales, viento o negligencia humana (Derraik, 2002).

El 20% restante de desechos marinos son derivados de fuentes marítimas tales como embarcaciones, botes recreativos, instalaciones en las costas y buques de pescas comerciales, los cuales vierten desechos directamente en el agua (Sheavly, 2007).

Tabla 2. Estimaciones de desechos para el 2010 de los principales 10 países clasificados por la masa de residuos plásticos mal administrados. (Jambeck et al. 2015)

Posición	País	% Desechos mal manejados	Desperdicios Plásticos Mal Manejados (millones de toneladas/año)	% del total de Desperdicios Plásticos Mal Manejados	Desechos Plásticos Marinos (millones de toneladas/año)
1	China	76	8.82	27.7	1.32-3.53
2	Indonesia	83	3.22	10.1	0.48-1.29
3	Filipinas	83	1.88	5.9	0.28-0.75
4	Vietnam	88	1.93	5.8	0.28-0.73
5	Sri Lanka	84	1.59	5	0.24-0.64
6	Tailandia	75	1.03	3.2	0.15-0.41
7	Egipto	69	0.97	3	0.15-0.39
8	Malasia	57	0.94	2.9	0.14-0.37
9	Nigeria	83	0.85	2.7	0.13-0.34
10	Bangladesh	89	0.79	2.5	0.12-0.31

Los varios tipos de desechos plásticos marinos pueden ser categorizados en base a su tamaño como macrodesechos, los cuales son representados por piezas plásticas mayores a 20 milímetros. Mesodesechos, que van de 5 a 20 milímetros. Y los microdesechos, los cuales son partículas plásticas de un tamaño menor a 5 milímetros. El término “megadesechos” (>100 mm) también es utilizado y puede ser aplicado a grandes desechos plásticos marinos, como por ejemplo redes de pesca abandonadas.

Una botella completa de plástico incluye el cuerpo de la botella, la tapa, revestimiento, anillo, etiqueta, adhesivo, tintas y, opcionalmente, metal. La mayoría de las botellas de bebidas no alcohólicas son hechas de PET. Las tapas son comúnmente hechas de poliolefinas, como polipropileno (PP) y polietileno (PE).

Una botella típica de PET contiene entre 83-92% de peso de PET, 7.5-13.5% de peso de poliolefinas, 1-3% de peso de adhesivos, y 0.9-0.5% de peso de metal.

1.3 Justificación

El motivo para efectuar el presente trabajo de investigación corresponde a la necesidad de desarrollar sistemas alternativos y eficientes para la elaboración de nuevos materiales sustentables utilizando polímeros sustentables, en este caso el Polietileno tereftalato (PET), se evaluará la viabilidad analizándose el comportamiento bajo pruebas mecánicas.

En la construcción se utilizan muchos materiales tanto prefabricados como vírgenes que al terminar su vida útil o al tener algún desperfecto son desechados como escombros o basura sin la posibilidad de reutilizarse, fomentando así más contaminación al ambiente y reduciendo la vida útil de los vertederos y rellenos sanitarios, es por ello que se busca elaborar un elemento prefabricado con material polimérico, que en primera instancia son desechados después de un muy corto periodo de uso, y ofrecer una alternativa sustentable a los materiales irreutilizables de las construcciones.

1.4 Hipótesis

El uso de material polimérico reciclado a base de polietilentereftalato (PET) permite la producción, por el método de fusión a base de incremento de calor, de paneles prefabricados alternativos utilizables en el ámbito de la construcción.

1.5 Objetivo General

Desarrollar un elemento prefabricado con la inclusión de material reciclado a base de PET para determinar mediante pruebas físicas y mecánicas su factibilidad como sustituto de paneles comerciales en el uso en el ámbito de la construcción.

1.6 Objetivos particulares

- 1) Fabricar páneces utilizando como material polímeros PET reciclados.
- 2) Determinar mediante pruebas mecánicas la resistencia a la flexión del panel de PET.
- 3) Determinar la densidad de los especímenes fabricados con este polímero y corroborar que sea constante con la densidad general del Polietileno Tereftalato.
- 4) Determinar el porcentaje de absorción del PET una vez reciclado por termofusión.

2. ANTECEDENTES

2.1 ¿Qué es un polímero?

Un polímero es una molécula grande construida a partir de numerosas moléculas más pequeñas. Estas moléculas grandes pueden ser lineales, ligeramente ramificadas o altamente interconectadas. En este último caso, la estructura se desarrolla en una gran red tridimensional.

Las moléculas pequeñas utilizadas como bloques de construcción básicos para estas moléculas grandes son conocidas como monómeros.

La unidad repetida en el polímero normalmente corresponde al monómero del que se fabricó el polímero.

2.2 Clasificación de los polímeros

Hay una serie de métodos para clasificar polímeros. Un sistema de clasificación, primero sugerida por Carothers en 1929, está basado en la naturaleza de las reacciones químicas empleadas en la polimerización. Aquí los dos grupos principales son la condensación y la adición de polímeros.

Los polímeros de condensación son aquellos preparados a partir de monómeros en los que la reacción se acompaña de la pérdida de una molécula pequeña, generalmente agua.

Por el contrario, los polímeros de adición son aquellos formados por la reacción de adición de un monómero insaturado.

Este sistema fue ligeramente modificado por P. J. Flory, quien hizo énfasis en el mecanismo de las reacciones de polimerización. Él reclasificó las polimerizaciones como reacciones escalonadas o reacciones en cadena que corresponden

aproximadamente a la condensación o la adición en el esquema de Carother, pero no completamente.

Una de las clasificaciones más utilizadas en la actualidad adopta el enfoque utilizando su respuesta al tratamiento térmico y dividirlos en termoplásticos y termoestables.

Los termoplásticos son polímeros que se funden cuando se calientan y se vuelven a solidificar cuando se enfrían, mientras que los termoestables son aquellos que no se funden cuando se calientan, pero, a temperaturas suficientemente altas, se descomponen de manera irreversible.

Los polímeros termoestables están constituidos por largas cadenas (lineales o ramificadas) de moléculas que están fuertemente unidas por enlaces cruzados (entrelazados) para formar estructuras de redes tridimensionales. Los polímeros de red o termoestables se parecen a un manojo de hilos que están tejidos entre sí en varios sitios y no solo enmarañados, por lo general son más resistentes, aunque más frágiles que los termoplásticos. Los termoestables no se funden al calentarse, sino que empiezan a desintegrarse. No son fáciles de reprocesar después que las reacciones de enlaces cruzados han tenido lugar y, por tanto, su reciclaje es difícil.

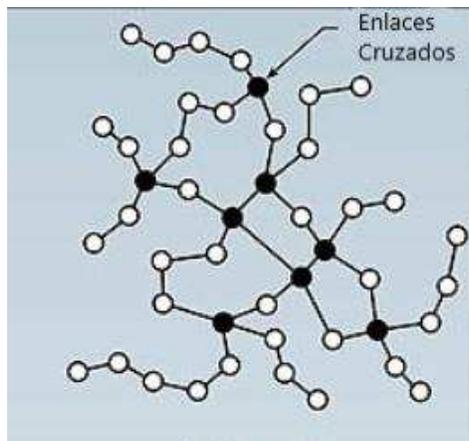


Fig. 3. Enlaces cruzados de un polímero termoestable.

2.3 ¿Qué es un termoplástico?

Los polímeros denominados como termoplásticos están formados de largas cadenas producidas al unir los monómeros, comúnmente se comportan de una manera plástica y dúctil. Las cadenas pueden o no estar ramificadas. Las cadenas individuales están entrelazadas.

Los termoplásticos tienen la estructura molecular más simple, con macromoléculas químicamente independientes. Al calentarse, se ablandan o se derriten, luego se les da forma, se sueldan y solidifican cuando se enfrían. Se pueden repetir varios ciclos de calentamiento y enfriamiento sin daños severos, lo que permite el reprocesamiento y el reciclaje.

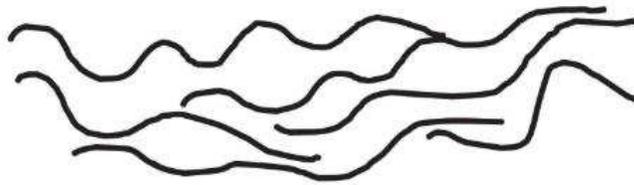


Fig. 4. Estructura esquemática de un termoplásticos (Michel Biron, 2007)

Comúnmente algunos aditivos son agregados al termoplástico para mejorar propiedades específicas, tales como la estabilidad térmica o química, la resistencia a la radiación UV, entre otros.

El consumo de termoplásticos es aproximadamente el 80% o más del consumo total de plásticos.

Ventajas

- El ablandamiento o la fusión por calentamiento permite soldar y termoformar el polímero.
- Los ciclos de procesamiento son muy cortos debido a la ausencia de la reacción química de enlaces cruzados.

- El procesamiento es más sencillo de monitorear, porque solo hay una transformación física.
- Los termoplásticos no liberan gases o vapor de agua si se secan correctamente antes del procesamiento.
- Los desechos son parcialmente reutilizables como material virgen debido a la reversibilidad del ablandamiento físico o fusión.

Desventajas

- Cuando la temperatura aumenta, el módulo de retención disminuye, debido a la ausencia de enlaces químicos entre las macromoléculas.
- Por la misma razón, los comportamientos de fluencia no son tan buenos como los de los termoestables.
- Durante un incendio, la fusibilidad favorece el goteo y reduce la cohesión física residual final.
- Existen pocos materiales trabajables en su estado líquido.

La 'Pirámide de excelencia' clasifica arbitrariamente las principales familias de termoplásticos de acuerdo a sus rendimientos y nivel de consumo.

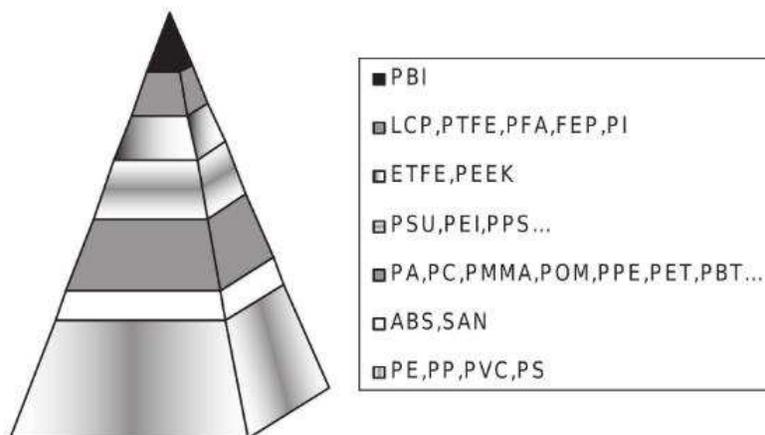


Fig. 5. Pirámide de excelencia para algunas familias de termoplásticos (Michel Biron, 2007)

- PE, PP, PVC, PS: Termoplásticos de productos básicos.
- ABS, SAN: Copolímeros con aplicaciones más específicas.
- PA, PC, PMMA, POM, PPE, PET, PBT...: Termoplásticos de ingeniería.
- PSU, PEI, PPS...: Termoplásticos de ingeniería con desempeños más específicos.
- ETFE, PEEK: Usos de alta tecnología, consumo limitado.
- LCP, PTFE, PFA, FEP, PI: Usos de alta tecnología, consumo más limitado.
- PBI: Usos muy específicos y consumo muy restringido.

2.4 ¿Qué es un polímero termoestable?

Los polímeros termoestables antes del endurecimiento, como los termoplásticos, son macromoléculas independientes. Pero en su estado final, después del endurecimiento, tienen una estructura tridimensional obtenida mediante reticulación química producida después o durante el procesamiento.

Algunos polímeros se usan industrialmente en sus dos formas, tanto termoplásticos como termoestables. El consumo de plásticos termoestables es aproximadamente del 12-20% del consumo total de plásticos.

Los enlaces creados entre las cadenas de los termoestables limitan su movilidad y sus posibilidades de desplazamiento relativo y aportan ciertas ventajas y desventajas.

Ventajas

- Infusibilidad: los termoestables se degradan por calor sin pasar por el estado líquido. Esto mejora algunos aspectos del comportamiento al fuego.
- Cuando la temperatura aumenta, el módulo de retención es mejor, debido a la estructura tridimensional.

- Mejor comportamiento general de fluencia, los enlaces entre las cadenas restringen los desplazamientos relativos de las macromoléculas, uno contra el otro.
- Simplicidad de las herramientas y procesamiento para algunos materiales trabajados o procesados manualmente en estado líquido.

Desventajas

- La reacción química de entrelazamiento lleva un tiempo considerable que alarga los ciclos de producción y, a menudo, requiere calentamiento.
- El procesamiento es a menudo más difícil de controlar, porque es necesario tener cuidado para obtener un equilibrio preciso entre el avance de la reacción de entrelazamiento y del moldeado.
- Ciertos polímeros liberan gases, en particular vapor de agua, durante el endurecimiento.
- Los desechos no son reutilizables como material virgen debido a la irreversibilidad de la reacción de endurecimiento. En el mejor de los casos, pueden usarse como rellenos o agregados después de su molienda.

2.5 ¿Qué es el PET?

El Polietileno Tereftalato, por sus siglas en inglés, es un polímero plástico, lineal, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado. Es extremadamente duro, resistente al desgaste, dimensionalmente estable, resistente a los químicos y tiene buenas propiedades dieléctricas.

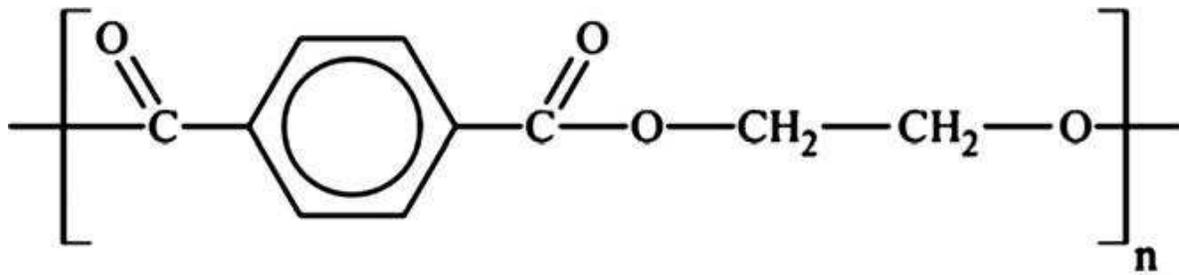


Fig. 6. Estructura química del PET (Raju, 2015)

El PET está hecho de petróleo crudo, gas y aire. Un kilogramo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar como resultado ácido tereftálico.

El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. El polietileno tereftalato resulta combinando el ácido tereftálico y el etilenglicol.

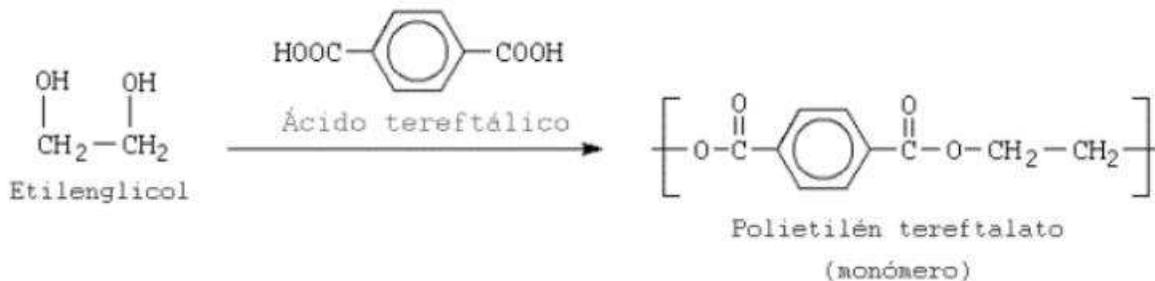


Fig. 7. Reacción química para formar PET (QuimiNet, 2005)

2.6 Tipos de PET

Se pueden distinguir tres tipos fundamentales de PET: el grado textil, el grado botella y el grado film.

El grado textil fue la primera aplicación industrial del PET. Durante la Segunda Guerra Mundial, se utilizó para reemplazar las fibras naturales como el algodón o el lino. Al poliéster (nombre común del PET grado textil), se le reconocieron excelentes cualidades desde un inicio para el proceso textil, entre las que se encuentran su alta resistencia a la deformación y su estabilidad dimensional.

El grado botella se comenzó a producir en Europa a partir de 1974 y su primera comercialización se llevó a cabo en los Estados Unidos. Desde entonces ha experimentado un gran crecimiento y una continua demanda, debida principalmente a que el PET ofrece características favorables en cuanto a resistencia contra agentes químicos, gran transparencia, ligereza, menores costos de fabricación y comodidad en su manejo. La más reciente y exitosa aplicación del PET, es el envasado de bebidas carbonatadas, también se ha comenzado a utilizar en el envasado de productos farmacéuticos, de droguería o alimenticios.

El PET grado film se utiliza en gran cantidad para la fabricación de películas fotográficas, de rayos X y de audio.

2.7 Aplicaciones del PET

Entre algunas de las aplicaciones que tiene el PET, se encuentran: envases de bebidas carbonatadas, aguas minerales, aceite, zumos, té, vinos y bebidas alcohólicas, detergentes y productos de limpieza, productos cosméticos, salsas y otros alimentos, productos químicos y lubricantes, productos para tratamientos agrícolas, películas, contenedores alimentarios, cintas de audio/video, fotografía, aplicaciones eléctricas, electrónicas, embalajes especiales y de rayos X.

Algunos otros usos y aplicaciones que tiene el PET son tubería, perfiles, paredes, piezas inyectadas; fibras, textiles, marcos y construcción.

2.8 Reciclaje del PET

Una vez recolectados, los envases de PET van a las estaciones de reciclado donde son molidos en forma de copos. Los copos son separados y limpiados de acuerdo con las especificaciones del mercado. El PET recuperado luego es vendido a los fabricantes quienes lo convierten en productos útiles.

El PET también puede ser depolimerizado a través de metanólisis o glicólisis. Dichos procesos someten al PET a una reacción química que lo reduce a sus monómeros o a sus materias primas originales.

El resultante luego es purificado o vuelto a reaccionar, dando de nuevo PET que puede usarse para envases de alimentos, etc.

El PET tiene un alto valor de incineración de 10,000 BTUs por fibra, una cantidad que se compara con la del carbón.

Como los envases de PET no contienen halógenos, azufre o nitrógeno, los productos de la combustión completa son compuestos que contienen hidrógeno, oxígeno y carbono.

El polietileno puede ser reciclado mecánicamente, es decir, se vuelve a fundir y transformar en productos finales. El polietileno reciclado es utilizado para fabricar bolsas de residuos, caños, madera plástica para postes, marcos, film para agricultura, etc.

2.9 Usos y aplicaciones del PET en la construcción

El PET no ha sido ajeno a la construcción, en las últimas décadas el PET ha sido motivo de investigación tanto para mejorar ciertas características mecánicas de los materiales comúnmente utilizados en la construcción como para darle un uso más

duradero a un material que en su estado comercial generalmente tiene una vida útil muy corta.

Este polímero utilizado principalmente en la industria alimenticia ha abierto brecha para su investigación como sustituto de agregados tanto gruesos como finos en la mezcla de mortero y concreto, esto con la finalidad de aligerar el producto.

De la misma manera han sido agregados fibras de PET a las mezclas con la intención de mejorar la resistencia a la tensión del concreto.

Otros investigadores han desarrollado un diseño de recipiente elaborado con material PET, con conectores macho-hembra para su ensamblaje, dichos recipientes fueron llenados con agregado fino.

Todos estos usos y más ha tenido el PET en las investigaciones como un material potencialmente usable en la construcción como sustituyendo otros materiales comunes o adicionando estos con la intención de mejorar las características mecánicas de los elementos. Todas estas investigaciones se muestran a continuación.

2.9.1 Botellas de PET como material sustentable de construcción

Rawat et al. (2014) estudiaron la viabilidad de sustituir la mampostería tradicional, llámese blocks o tabique, por botellas de PET desechadas. Esto con el propósito de hacer frente a la amenaza que representa el mal manejo de desechos.

Describen que fueron recolectados recipientes de PET y llenados con suelo que se encontraba disponible en la zona de investigación.

Estos especímenes fueron ensayados en una máquina universal a compresión y comparados con ensayos del mismo tipo en tabiques convencionales.



Fig. 8. Prueba aplicada en botellas de PET de desecho llenas de suelo y cerrado herméticamente (Rawat et al. 2014).

Sus resultados después de realizar ensayos a 8 botellas de PET rellenas con suelo del lugar describen una resistencia a compresión promedio de 8.99 MPa.

Fueron comparadas las ventajas que tendría incluir estos elementos en los sistemas constructivos, tales como un nulo tiempo de curado (comparado con los 28 días que supone la fabricación del tabique), cero emisiones de carbono al medio ambiente al utilizar botellas de PET en comparación con las originadas al hornear los tabiques, un menor costo de fabricación, propiedades mecánicas muy similares y una manera de implementar una construcción bioclimática.

2.9.2 Desarrollo de una botella de plástico utilizable como bloque de construcción

Nováková et al. (2017) desarrollaron un diseño experimental de una botella de PET que puede ser utilizada, por su forma, como bloque de mampostería. Estos especímenes fueron fabricados con material PET reciclado y producidos con tecnología de moldeado por soplado.

Su botella de uso como material de construcción, o como ellos lo denominan, “PET(b)rick”, puede ser fabricado de PET virgen o reciclado, puede ser apilado en al menos dos direcciones. Estos especímenes fueron ensayados a pruebas mecánicas que usualmente se les aplica a los bloques tradicionales, llámese tensión y compresión.

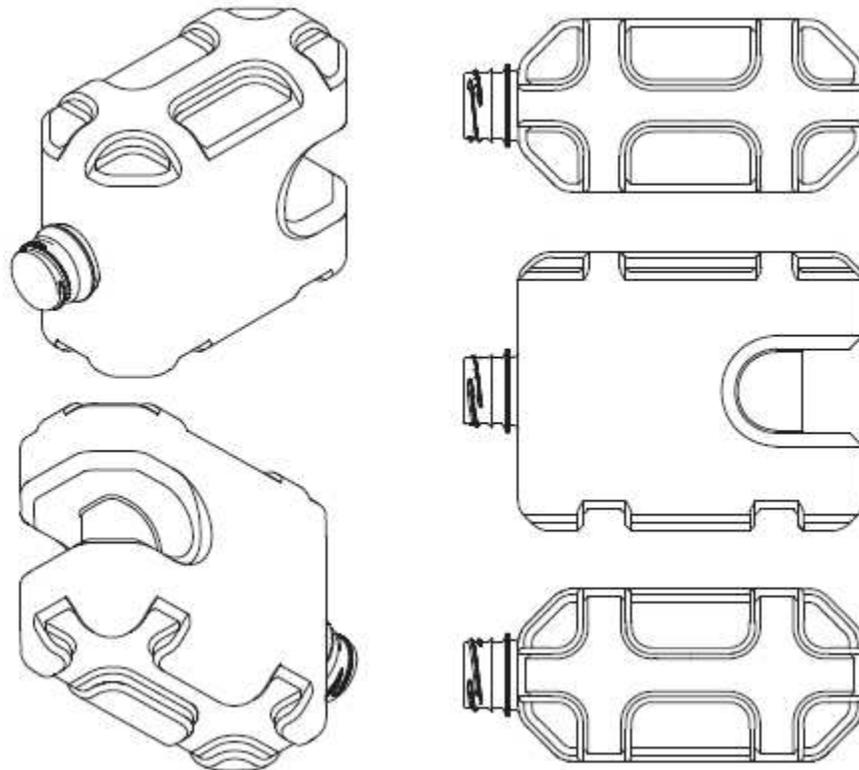


Fig. 9. Diseño de PET(b)rick 1.0 (Nováková et al. 2017)

Estos especímenes fueron llenados de arena, agua, CO₂ y aire, previo a sus ensayos, con la finalidad de conocer sus diferencias de estabilidad y deformación.



Fig. 10. Desempeño de la botella con 0.2 kN y 1.2 kN de carga respectivamente (Nováková et al. 2017)

En estas pruebas, fue considerado como “falla” al momento en que el PET(b)rick libere aire de su interior, ya sea por sus muros o por pérdida de la tapa. A 1.1 kN se observaba una deformación en la botella, pero no un colapso de la misma. Esto no ocurrió sino hasta haber aplicado una carga de 3 kN.

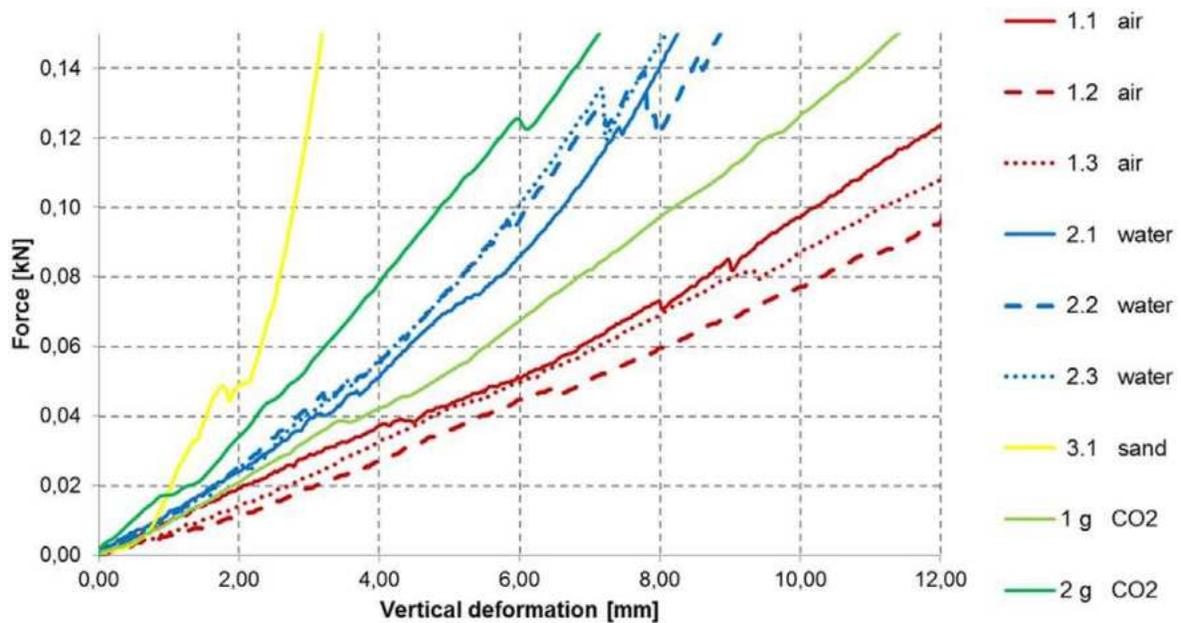


Fig. 11. Comparación de prueba a compresión con diferentes materiales de relleno (Nováková et al. 2017).

2.9.3 Uso de desechos plásticos PET como agregados en la mezcla de concreto

El polímero PET también ha sido tema de estudio desde hace algunas décadas atrás como agregado fino en mezclas de concreto y de mortero.

El estudio de Rahmani et al. (2013) concluye que cuando una cantidad de arena natural es reemplazada con partículas PET que tienen diferente graduación, se ve un incremento en la porosidad del concreto debido a las formas que las partículas de PET tienen.

En ese mismo estudio, Rahmani pudo observar que la sustitución del 5% de agregado fino con partículas PET produce mejores resultados a pruebas mecánicas a compresión. Con una sustitución del 5% la resistencia a compresión del concreto incrementa entre un 8.86% y un 11.97%.

Sin embargo, con un incremento mayor en la sustitución de las partículas PET por agregado fino del 10 al 15% la resistencia a compresión decrece debido a la débil cohesión entre la textura y las partículas de PET.

Otro estudio de Ramadevi y Manju (2012) detalla que la resistencia a compresión de una mezcla de concreto aumenta cuando se le sustituye hasta un 2% de agregados finos con fibras de botellas hechas de PET y gradualmente decrece la resistencia a compresión cuando esa sustitución aumenta a 4 y 6%.

La resistencia del concreto con una sustitución del 2% de fibra de PET incrementa en un 19.23% con respecto a las mezclas de control.

Sin embargo, al hacer esta sustitución, decrece la trabajabilidad de la mezcla de concreto. Batayneh et al. (2007) reporta en su estudio que una matriz preparada

con una sustitución del 20% de agregados finos con partículas PET la trabajabilidad se reduce hasta en un 25%.

2.9.4 Agregados de desechos PET en morteros poliméricos

Reis y Carneiro (2012) desarrollaron una mezcla de mortero polimérico utilizando arena de fundición con resinas epoxi y poliéster insaturado. La resina de poliéster que utilizaron fue un poliéster insaturado fabricado a partir de PET reciclado.

El agregado utilizado fue arena de fundición con un tamaño homogéneo de grano. Antes de ser agregado a la resina polimérica, la arena fue secada para reducir el contenido de humedad, asegurando así un buen vínculo entre polímero y agregado inorgánico.

Los residuos triturados de botellas de PET utilizados como agregados fueron obtenidos recolectando botellas de PET desechadas, lavadas y trituradas con una máquina especial.

Probetas de un tamaño de 40 x 40 x 160 mm fueron hechas para las respectivas pruebas a flexión. Cilindros de 50 mm de diámetro por 100 mm de alto se prepararon para pruebas a compresión.

Sus probetas fueron diseñadas con una sustitución del 0, 5, 10, 15, 20% respectivamente con la incorporación de PET triturado sustituyendo a la arena de fundición.

Antes de las pruebas mecánicas se pudo observar que la densidad de los especímenes decrecía considerablemente a medida que se incrementaba el porcentaje de PET triturado que se sustituía en las mezclas. Hasta un 23% menor densidad se presentó en los especímenes.

De la misma manera, en las pruebas a flexión se demostró que la sustitución de arena por PET triturado en resinas epoxi y morteros poliméricos contribuían a una menor resistencia a flexión. En las diferentes sustituciones, el decremento en la resistencia oscila entre un 4.1% hasta un 47.8% para especímenes con una sustitución del 20% de arena por PET triturado.

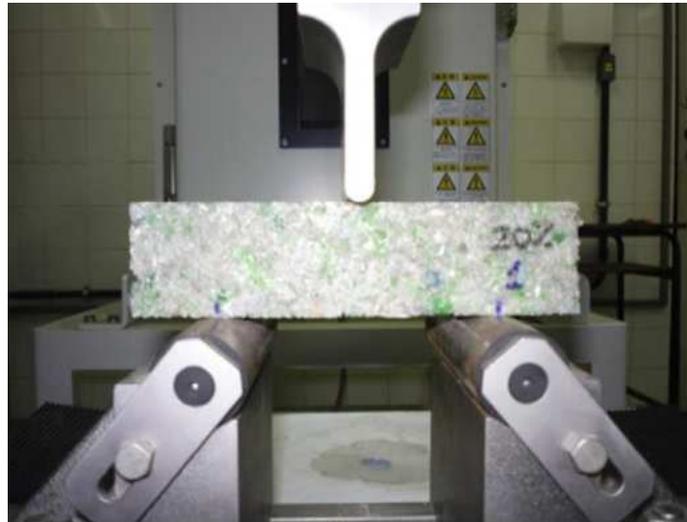


Fig. 12. Ensayo a Flexión de Especímenes de resinas epoxi-arena-PET triturado (Reis y Carneiro, 2012)

Sin embargo, se obtuvieron resultados inversamente proporcionales al aumento del módulo de elasticidad presentado por los especímenes a medida que el porcentaje de PET triturado sustituido aumentaba. Hasta un incremento del 78.4% fue observado para muestras con un 5% de sustitución.



Fig. 13. Ensayo a Compresión de Especímenes de resinas epoxi-arena-PET triturado (Reis y Carneiro, 2012)

En pruebas a compresión se notó que el aumento en la sustitución de PET triturado contribuía al decremento en la resistencia a compresión. Un decremento del 21.4% en resistencia a compresión fue reportado con una sustitución del 5% de mortero polimérico. Elevando la sustitución de PET triturado a un 10, 15, 20%, la resistencia a compresión decrecía en un 33.85, 36.4 y 59.3% respectivamente.

2.9.5 Páneles fabricados con plásticos reciclados y resina

La investigadora Gaggino (2012) desarrolló y estudió el comportamiento de páneles fabricados con materiales plásticos de desechos aglomerados con resina.

Los materiales provienen de desechos industriales por desperfectos en industria alimenticia, perfumería o empaquetados de limpieza, los cuales las empresas las desechan, resultado de un desperfecto en el grosor de producción o fallo en la impresión de los mismos.

Estos materiales son en su mayoría LDPE (polietileno de baja densidad, por sus siglas en inglés) y PVC (polyvinyl chloride). Estos son un tipo de desechos que no pueden ser reciclados para otros usos. Dada la presencia de tinta y de polvo de aluminio hace que el reprocesamiento sea complejo, especialmente en los casos de reciclaje en los que involucra materiales de fusión.

El material aglomerante que fue utilizado es una resina utilizada en poliéster náutico. Este material es conocido en el mercado por varias aplicaciones requiriendo buenas propiedades mecánicas y resistencia al agua, dado que no es soluble en agua.

En esta experimentación fueron analizados cuatro diferentes mezclas, en las cuales se fue reduciendo el agregado de residuos plásticos antes mencionados y aumentando la resina de poliéster.

El proceso básicamente fue el siguiente: los desechos plásticos fueron procesados en un molino especial para su trituración hasta que las partículas obtenidas tuvieran una dimensión máxima de 3 mm. Estas partículas de plásticos triturados fueron colocadas en un mezclador horizontal e impregnadas con la mezcla de resina y catalizador utilizando una pistola de aire. Mientras se realizaba la impregnación, el material era constantemente mezclado. La mezcla es transferida consecuentemente a un molde metálico con dimensiones de 46 x 26 x 10 cms.



Fig. 14. Molde metálico utilizado en la mezcla de desechos plásticos con resina náutica. (Gaggino, 2012)

A la mezcla se le aplicó uniformemente una carga de presión con una máquina hidráulica de 40 toneladas durante 24 horas. Subsecuentemente el molde fue retirado y el panel con las dimensiones antes mencionadas estuvo listo.



Fig. 15. Panel de residuos plásticos con resina náutica desarrollado por Gaggino. (Gaggino, 2012)

Los resultados de las pruebas aplicadas a este tipo de paneles fueron positivos, tanto en resistencias químicas como físicas. Demostraron una resistencia al intemperismo como a compresión y flexión.

Sus resultados a las pruebas de flexión denotaron un promedio de resistencia de 12.11 N/mm^2 . Mientras que a pruebas mecánicas de resistencia a compresión fue en promedio de 91.24 N/mm^2 .



Fig. 16. Ensayo a resistencia a compresión de panel con residuos plásticos y resina náutica
(Gaggino, 2012)

Fue encontrado que presentaba una densidad considerablemente mayor a la de sus competidores cercanos. Una absorción mucho menor, dado que los desechos plásticos y la resina son a prueba de agua. Desafortunadamente los resultados al intemperismo arrojaron resultados negativos, ya que sus materiales (plásticos de desecho y resinas nauticas) no son apropiadas para su uso en exteriores, pero sí en interiores.



Fig. 17. Ensayo a resistencia a flexión de panel con residuos plásticos y resinas nauticas (Gaggino, 2012).

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se realizarán algunas pruebas en el laboratorio para obtener ciertas propiedades físicas y mecánicas de los materiales y especímenes de interés que se ensayaron a lo largo de esta investigación.

Al realizar nuestras pruebas de laboratorio tenemos que tener en cuenta la forma en que se realiza cada una de éstas, así como las condiciones y las características de los materiales. La facilidad y la manejabilidad para fabricar estos elementos serán muy importantes para determinar si es un producto que se pueda llevar a la industria de la construcción.

Las pruebas experimentales se desarrollarán bajo las normas y los reglamentos establecidos por la ASTM, utilizando en dichas pruebas el equipo manual y mecánico estandarizado dentro de dicho reglamento y que se encuentra en el laboratorio de hidráulica y el laboratorio de mecánica de suelos.

Los pasos específicos de la metodología utilizada para esta investigación se detallan en los puntos a continuación.

3.1 Banco de materiales de la materia prima

El polietilentereftalato, como ya se mencionó anteriormente, es un material de usos muy versátiles, y que puede ser encontrado abundantemente en nuestro día a día, pero a la hora de hablar de un reciclaje por procesamiento térmico se vuelve un tema un poco complejo.

Originalmente se pensó en hacer un banco de materiales, recolectando botellas y contenedores de PET para después ser triturados. Pero este proceso mecánico se torna complicado cuando no se tiene la maquinaria correcta.

Es por ello que se optó por conseguir este material ya procesado y molido proveniente de una compañía recicladora de plásticos. Dicho material presentaba características óptimas para el reprocesamiento térmico que se explicará en breve.

Presentaba unas dimensiones aproximadas de 3mm x 3mm x 0.7 mm cada partícula, todo el material era homogéneo a dichas medidas. Su color era transparente y habían sido reciclados de contenedores de productos de limpieza bucal.



Fig. 18. Material plástico PET molido.

De dicha empresa recicladora fueron adquiridos 25 kilogramos de polietileno tereftalato de estas características físicas para el procesado y las posteriores pruebas que se mencionarán a continuación.

3.2 Materiales

En esta investigación el único material que se empleó en la elaboración de estos paneles fue polietileno tereftalato, comercialmente mejor conocido por sus siglas PET.

La finalidad de estos paneles es buscar un sustituto ideal, sustentable y ecológico, que comparta características similares con los paneles comerciales más utilizados, como pueden ser los paneles de yeso. Se optó por no agregar o adherir ningún otro material a las probetas con el fin de que estos elementos pudieran tener en un futuro un fácil reciclaje una vez cumplido su ciclo de vida útil o de presentar desperfectos debido al desgaste por su uso.

3.3 Equipo

3.3.1 Equipo manual

Para realizar las distintas probetas estudiadas en esta investigación se utilizó el siguiente equipo manual de laboratorio:

- Recipientes metálicos para la fundición del PET
- Sujetador de presión metálico
- Espátula metálica de cuchillo
- Molde metálico de medidas 20cm x 20cm, con tapa
- Bata de laboratorio
- Botas de seguridad
- Lentes de seguridad
- Temporizador
- Guantes de carnauba
- Flexómetro
- Vernier analógico
- Escuadra metálica
- Cuchilla empleada para cortar acrílico

3.3.2 Equipo eléctrico y mecánico

Para la realización de las probetas se contó con el siguiente listado de equipo eléctrico y mecánico:

- Máquina Universal Tinius Olsen
- Báscula digital con precisión de ± 0.01 g
- Cámara digital de 20 megapíxeles de resolución
- Mufla marca Felisa
- Micrómetro digital
- Laptop
- Base metálica para pruebas a flexión a cuatro puntos

3.4 Elaboración y ensaye de probetas

En esta sección se explica detenidamente y paso a paso la experimentación y como se realizaron las pruebas a los especímenes en el laboratorio.

3.4.1 Elaboración de las probetas de PET

En esta etapa se elaboraron 8 probetas de polietileno tereftalato (PET) para conocer sus propiedades mecánicas cuando es sometido a pruebas a flexión. Se siguió la metodología descrita a continuación:

- 1) Se encendió la mufla y se fijó a una temperatura de 275°C (esta mufla en específico tarda aproximadamente 65 minutos en alcanzar dicha temperatura).
- 2) Los 4 recipientes metálicos fueron pesados y tarados en una báscula electrónica para el control del pesaje del material.
- 3) Una vez tarados los recipientes, se les agregó 380 gramos de PET triturado a cada uno.
- 4) Ya alcanzada la temperatura fijada en la mufla, se procedió a ingresar cada uno de los recipientes metálicos, dejando un desfase de 20 minutos entre

cada uno, esto con la finalidad de tener tiempo suficiente para manipular cada muestra por separado respetando el tiempo de fusión de cada uno.

- 5) Una vez ingresado el PET molido contenido en cada uno de los recipientes metálicos, se fijó el temporizador a 7 horas, las cuales cada muestra permanecería dentro de la mufla para su reprocesamiento térmico y su fusión.
- 6) Alcanzadas las 7 horas de procesamiento térmico, cada uno de los recipientes fue retirado con cuidado de la mufla utilizando un sujetador de presión metálico para después ser vertido en el molde metálico de 20x20x1 cms, haciendo uso de una espátula metálica para verter el excedente que pudiera quedar adherido al recipiente metálico.
- 7) Ya vertido el PET en estado líquido en el molde metálico, se procedió a tapar éste con la tapa metálica y se dejó enfriar el material por 10 minutos.
- 8) Cumplido este tiempo, se destapó el molde y la probeta fue retirada del mismo, medido y pesado para sus posteriores estudios.
- 9) Dichos especímenes fueron marcados y cortados transversalmente a cada 5 centímetros con una cuchilla empleada para cortar acrílico, con la finalidad de que cumplan con las medidas sugeridas por la norma ASTM D6272 para pruebas a flexión a cuatro puntos para plásticos moldeados.



Fig. 19. Mufla utilizada para termofusionar el material PET fijada a 275°C



Fig. 20. Proceso de termofusión del PET después de 60 minutos.



Fig. 21. Molde metálico para probetas de PET



Fig. 22. Molde metálico destapado una vez endurecido el material PET



Fig. 22. Panel medido y cortado transversalmente con cuchilla.



Fig. 23. Micrómetro digital utilizado para medir la deflexión.



Fig. 24. Rodillos de apoyo para pruebas a flexión



Fig. 25. Rodillos de carga para pruebas a flexión

3.5 Prueba de densidad de probetas de PET

Esta prueba se realizó en el laboratorio mediante el uso de un vernier electrónico para medir la sección transversal y la altura de cada una de las probetas de PET, posteriormente se pesaron y finalmente la densidad se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{W_s}{V} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

Ws: Peso de la probeta en estado seco, (Kg)

V: Volumen de la probeta, (m³)



Fig. 26. Pesado de probeta de PET



Fig. 27. Medición de anchura de probeta de PET

3.6 Prueba de absorción en 24 horas a probetas de PET

La prueba de absorción consiste en determinar la cantidad de agua absorbida por el espécimen en 24 horas. Siguiendo la norma ASTM C 67 – 03 se pesa el espécimen, posteriormente se somete a inmersión total en agua fría donde permanece durante 24 horas, después se extraen del agua dichos especímenes y se seca su superficie; por último, se pesa nuevamente la probeta. La absorción del espécimen se calcula de la siguiente manera con la ecuación:

$$Absorción = \frac{W_{24h} - W_S}{W_S} \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

En donde:

W_{24h} : Peso del espécimen después de su inmersión en agua por 24 horas, (Kg)

W_s : Peso del espécimen en estado seco, (Kg)



Fig. 28. Inmersión de probetas de PET en agua

3.7 Prueba de flexión a probetas de PET

En esta prueba, fueron ensayadas 5 probetas de PET. Los especímenes fueron colocados como viga simplemente apoyada sobre dos rodillos de soporte y cargados vertical y uniformemente con dos rodillos, respetando una separación del 25% entre cada rodillo. Posteriormente se procedió con la aplicación de carga. Apoyado de un micrómetro digital y una computadora (laptop) se midió la deformación del espécimen en forma de deflexión en el centro del espécimen mientras la carga era aplicada.

Todo el procedimiento fue ejecutado rigurosamente bajo los parámetros de la norma ASTM D 6272 – 00 Método de prueba estándar para las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados.

La resistencia a la flexión es igual a la tensión máxima en las fibras externas en el momento de la rotura. Esto puede ser calculado en concordancia con la siguiente ecuación:

$$S = 3PL/4bd^2 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

S = Resistencia a la flexión de la probeta de PET, (MPa).

P = Carga máxima al momento de la rotura, (N)

L = Intervalo de apoyo, (mm)

b = Anchura de la probeta, (mm).

d = Espesor de la probeta, (mm)



Fig. 29. Prueba de flexión a probeta de PET

3.7.1 Cálculo de la deformación máxima de probetas de PET

Cuando una viga se carga en flexión en dos puntos centrales y se apoya en dos puntos externos, la deformación máxima en las fibras externas se produce entre los dos puntos de carga centrales que definen el intervalo de carga.

Esta deformación máxima puede calcularse de la siguiente manera mediante la siguiente ecuación:

$$r = 4.36Dd/L^2 \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

r = Deformación máxima de la probeta (mm/mm)

D = Deflexión máxima en el centro de la viga, (mm).

L = intervalo de apoyo, (mm).

d = Espesor de la probeta, (mm).

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

En esta parte de la investigación se muestran los resultados de las probetas de PET previamente ensayadas y sometidas a diversas pruebas para su caracterización, dichos ensayos fueron descritos en el capítulo anterior.

4.1 Resultados de prueba de densidad

Tabla 3. Resultados de densidad de probetas de PET

# PROBETA	Lado A	Lado B	Espesor	Volumen	Peso	Densidad	
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ³)	(g)	(g/cm ³)	(Kg/m ³)
1	4.954	6.239	0.74	22.87192	29.23	1.277986	1277.986
2	4.96	6.036	0.739	22.1246	27.5	1.242961	1242.961
3	4.93	5.403	0.706	18.80557	22.39	1.190604	1190.604
4	4.952	5.224	0.75	19.40194	24.16	1.245237	1245.237
5	5.015	5.72	0.685	19.64977	23.74	1.208156	1208.156
Prom=						1.232988	1232.988

Se puede observar, y como era esperado, que estas probetas por ser completamente de PET reciclado, sin incluir ningún otro material extra, la densidad general del material PET es respetada con respecto a estas probetas. Se muestra una disminución mínima en la densidad, lo cual puede deberse a imperfecciones en las probetas al momento de tomar sus medidas.

4.2 Resultados de prueba de absorción en 24 horas.

Tabla 4. Resultados de absorción en probetas de PET

# PROBETA	Peso	Peso sat 24 h	Absorción
	(g)	(g)	(%)
1	29.23	29.24	0.034211
2	27.5	27.52	0.072727
3	22.39	22.4	0.044663
4	24.16	24.16	0
5	23.74	23.76	0.084246
		Promedio =	0.047169

Observando los resultados en la tabla, se puede demostrar, como era de esperarse, que estos páneles, por ser fabricados 100% de PET reciclado, y al ser el PET un polímero impermeable, se puede observar que el resultado de la prueba de absorción a 24 horas tiende a 0%. Esto se puede traducir a que en la aplicación, este elemento se comportará de manera muy constante, sin importar la región en la que está y las condiciones climatológicas. No necesitará la adición de ningún tipo de impermeabilizante para asegurar un buen comportamiento de su estructura, no permitirá filtraciones, ni contendrá humedad dentro de él.

4.3 Resultados de pruebas a flexión en probetas de PET.

En esta etapa de la experimentación, fueron ensayadas 5 probetas de PET siguiendo las indicaciones como lo marca la norma ASTM D6272 para pruebas a flexión en plásticos reforzados y no reforzados.

La caracterización de las probetas antes mencionadas se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5. Caracterización de probetas ensayadas a flexión

# PROBETA	Lado A	Lado B	Espesor	Peso
	(cm)	(cm)	(cm)	(g)
1	4.954	19.601	0.74	91.83
2	4.96	19.601	0.739	89.30
3	4.93	19.601	0.706	81.23
4	4.952	19.886	0.75	91.97
5	5.015	19.886	0.685	82.53

El ensayo de estas probetas arrojó una carga máxima soportada por cada una y datos de la deflexión de cada probeta a cada 2 Kgf de carga sobre la misma. Estos datos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6. Resultados de carga vs. Deformación de probetas de PET sometidas a flexión.

Carga (kgf)	# Probeta				
	1	2	3	4	5
2	0.42	0.57	0.42	0.42	0.52
4	0.75	0.95	0.85	0.87	0.96
6	1.25	1.33	1.24	1.26	1.31
8	1.7	1.74	1.63	1.64	1.76
10	2.13	2.13	2.01	2.05	2.15
12	2.59	2.57	2.4	2.49	2.54
14	2.7	3.03	2.77	2.88	2.93
16	3.15	3.45	3.19	3.45	3.34
18	3.5	3.88	3.56	3.72	3.79
20	3.85	4.33	3.95	4.02	4.18
22	4.15	4.75	4.33	4.41	4.37
24	4.65	5.15	4.71	4.76	4.82
26	5.05	5.28	5.09	5.11	5.06
28	5.43		5.48	5.52	5.79
30			5.85		
Carga máxima (kgf)	28.125	27.006	30.739	28.785	29.565
Carga máxima promedio (kgf)	28.844				

En esta tabla se puede observar como las probetas de PET, al ser sometidas a cargas a flexión, sufren una deformación, en este caso, medido desde el centro de la probeta con un micrómetro, llegando a presentar una deflexión máxima de 5.85 milímetros antes de su falla.

También se muestra que la carga máxima soportada promedio por las probetas de PET ensayadas en esta prueba asciende a 28.444 Kgf.

En las posteriores gráficas se muestra un análisis detallado del resultado de carga/deformación de cada probeta.

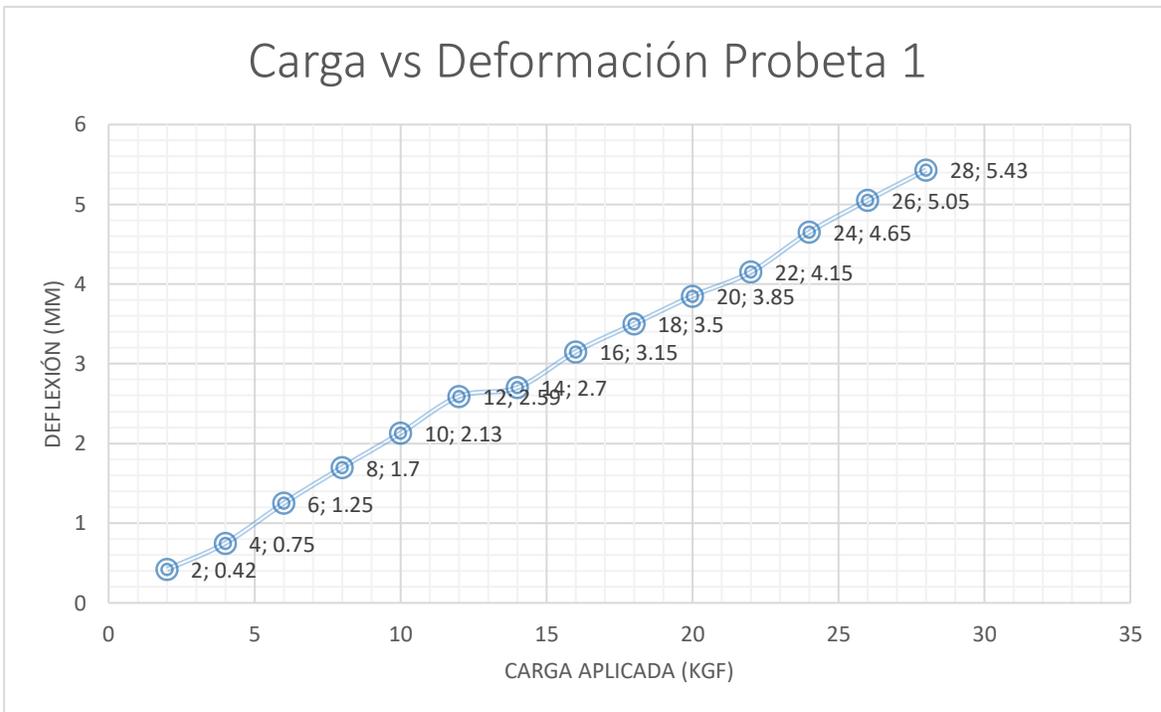


Fig. 30. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 1

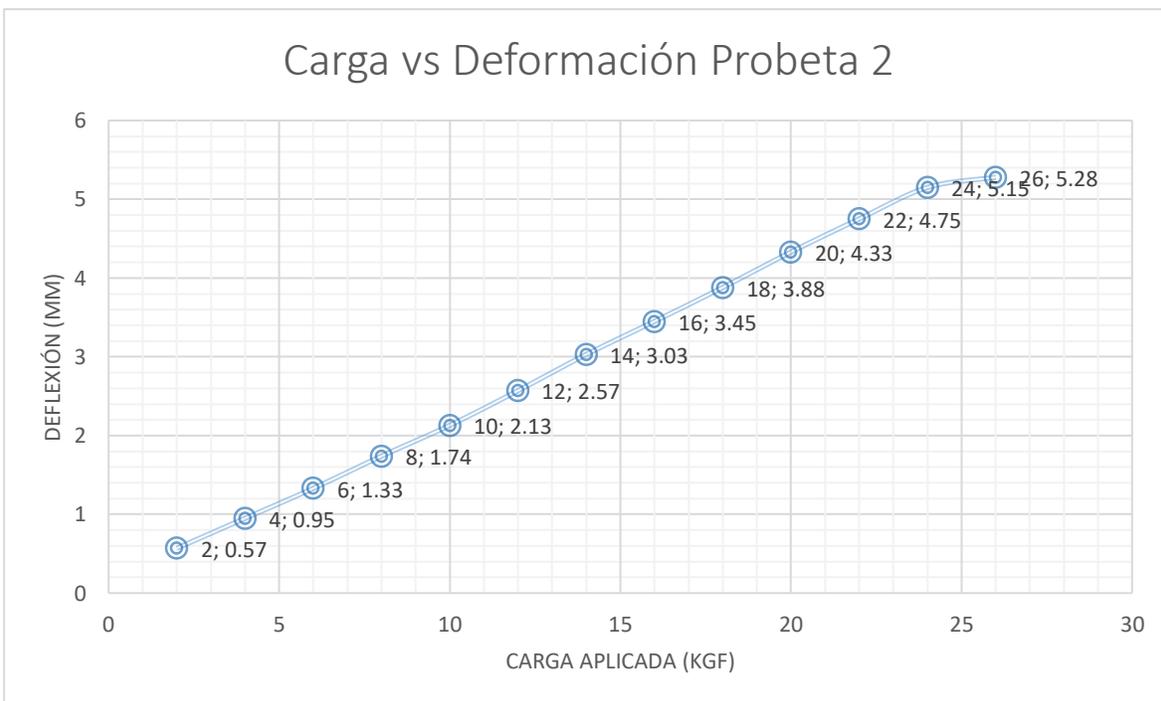


Fig. 31. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 2

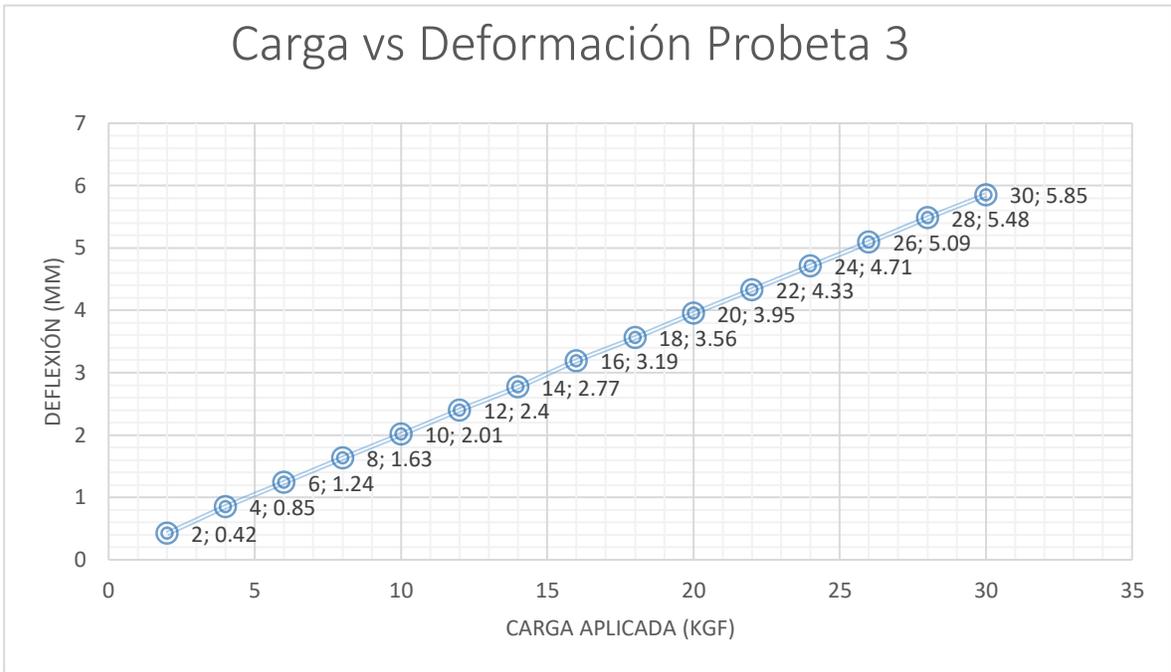


Fig. 32. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 3

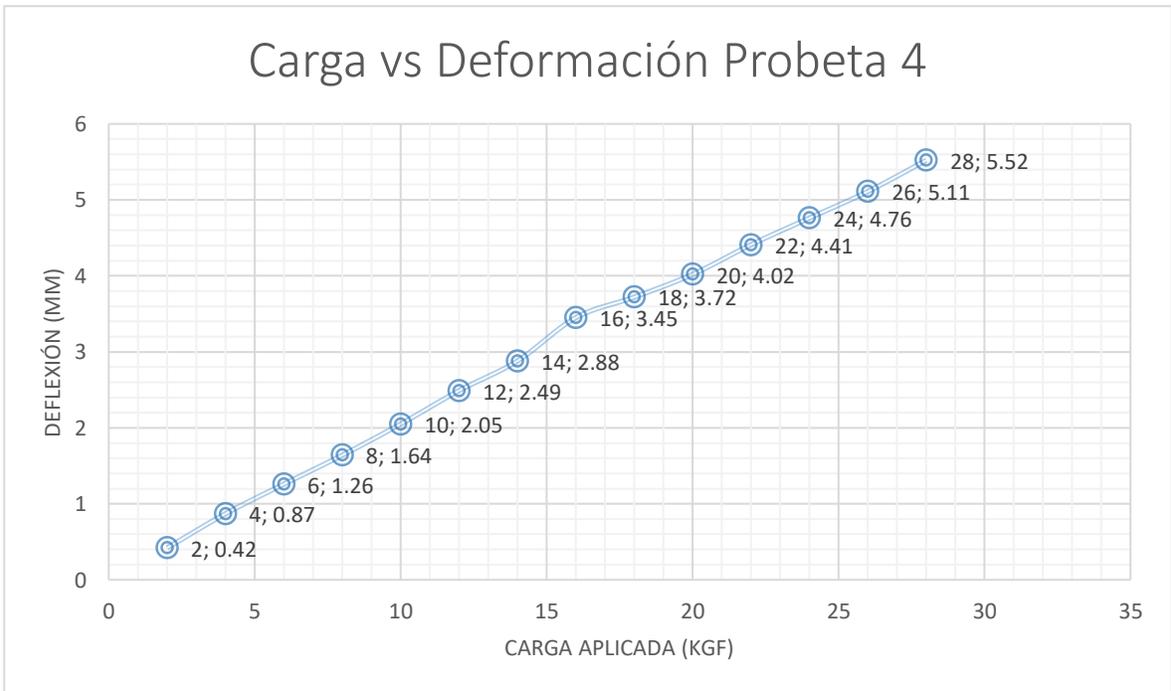


Fig. 33. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 4

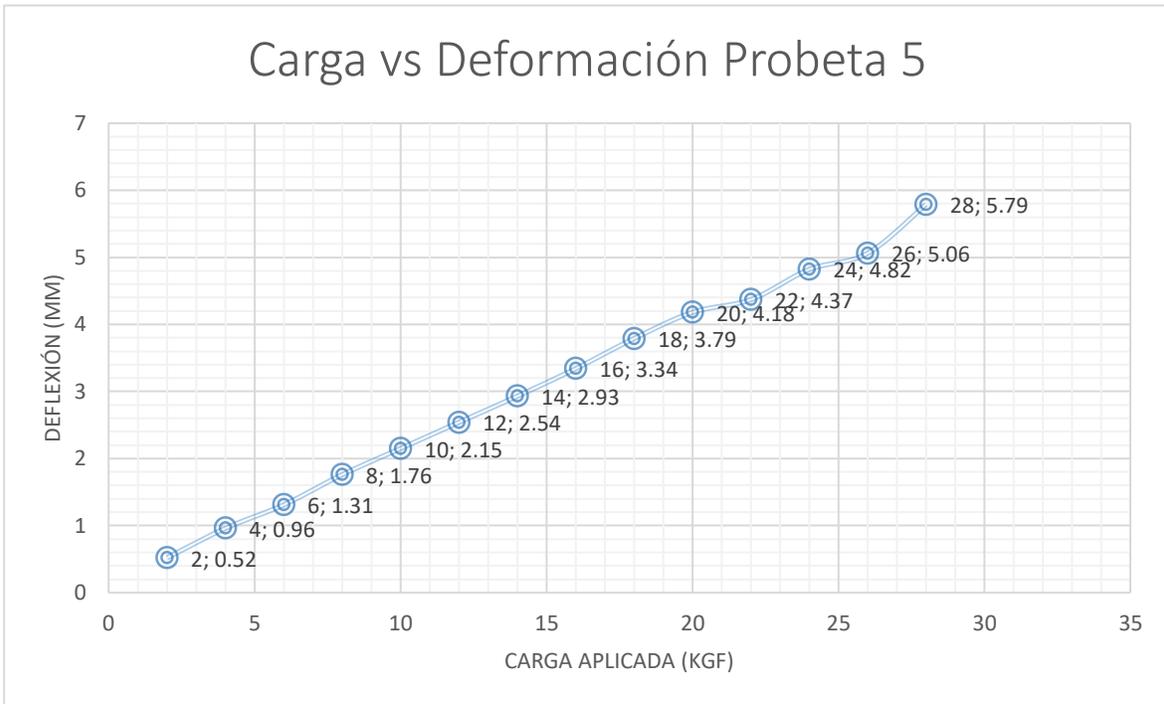


Fig. 34. Gráfico de Carga/Deformación de probeta 5

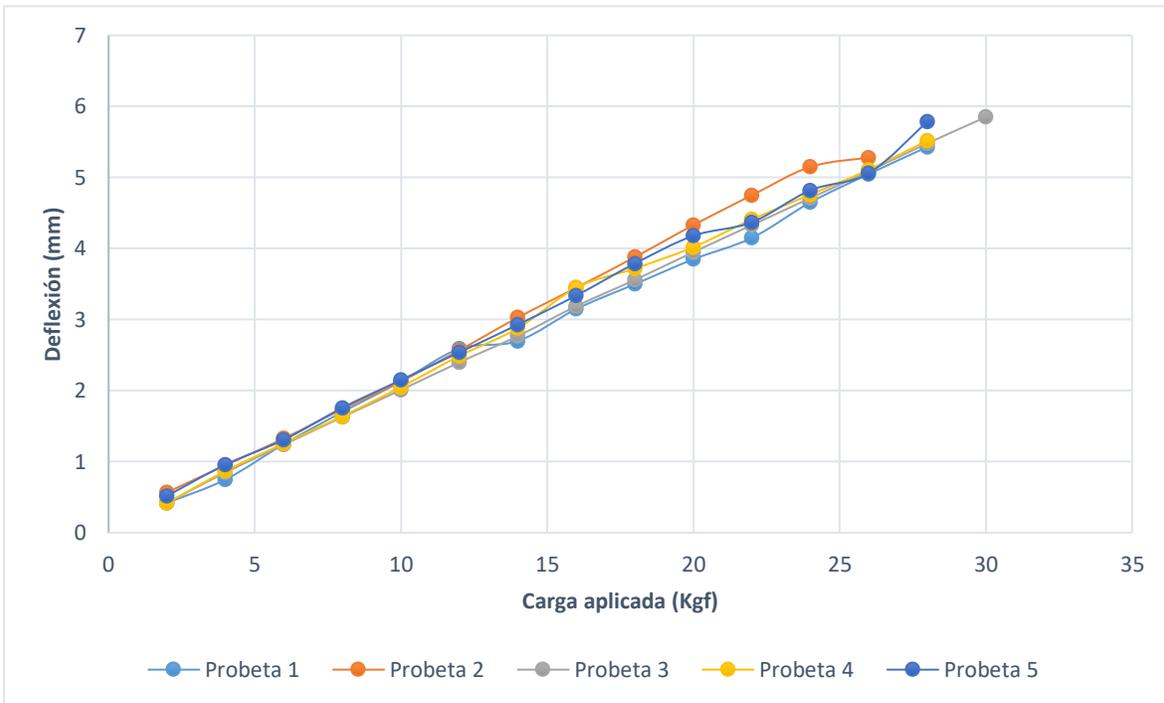


Fig. 35. Gráfico de Carga/Deformación de conjunto de probetas

En la figura 35 de la gráfica conjunta de las 5 probetas ensayadas se puede apreciar un comportamiento uniforme en su deflexión, así como en la carga aplicada necesaria para el inicio de la deformación de las mismas y una carga aplicada máxima similar para las 5 probetas al momento de la falla.

De acuerdo a la ecuación (3) mencionada en el capítulo 3.7, la resistencia a la flexión soportada por cada probeta fue calculada, los resultados nos arrojan la siguiente tabla:

Tabla 7. Resultados de resistencia a la flexión de probetas ensayadas

# Probeta	Carga máxima al momento de la falla (kgf)	Distancia entre los apoyos (cm)	Ancho de la probeta (cm)	Espesor de la probeta (cm)	Resistencia a la flexión de la probeta de PET (Kg/cm ²)
1	28.125	18.00	4.954	0.74	139.961
2	25.006	18.00	4.96	0.739	124.626
3	30.739	18.00	4.93	0.706	168.876
4	28.785	18.00	4.952	0.75	139.507
5	29.565	18.00	5.015	0.685	169.613
				Promedio =	148.517

La ecuación (4) citada en el capítulo 3.7.1 nos describe el método para calcular la tensión máxima soportada por las probetas de PET ensayadas. Estos cálculos son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 8. Resultados de Deformación máxima en probetas de PET ensayadas.

	Deflexión máxima en el centro de la viga	Distancia entre los apoyos	Espesor de la probeta	Tensión máxima de la probeta
# Probeta	(mm)	(mm)	(mm)	(mm/mm)
1	5.43	180.00	7.40	0.00541
2	5.28	180.00	7.39	0.00525
3	5.85	180.00	7.09	0.00558
4	5.52	180.00	7.50	0.00557
5	5.79	180.00	6.85	0.00534
			Promedio =	0.00543

5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos muestran un material sustentable con propiedades aplicables de un elemento con posibilidades de ser un sustituto potencial en la industria de la construcción de los paneles comúnmente utilizados, como lo pueden ser los paneles de yeso.

La finalidad de que este panel experimental no contara con adición de ningún otro material responde a la posibilidad de su reciclaje una vez que se haya cumplido su vida útil o que, por cuestiones ajenas a él, el panel sufra algún desperfecto que lo lleve a su rotura, ya sea por manejo de mano de obra o por su traslado. Siendo el proceso de reciclaje, el mismo que el utilizado en esta investigación, pasando por procesar el material para que tenga una terminación molida, consecuentemente termofusionarlo de la misma forma que lo descrito en el capítulo 3 de esta investigación y después disponerlo en un molde para su formación.

El PET molido no mostró ningún inconveniente al momento de fusionarlo por base de calor. El único punto a tomar en cuenta en este proceso es que la norma ASTM D6272 para pruebas a flexión de este tipo de materiales dicta que para plásticos termofusionados y/o moldeados no podrán ser ensayados aquellos que presenten agrietamientos o burbujas de aire en su interior. Es por ello que se comprobó que un tiempo estándar promedio para un estado óptimo de este material que no presente burbujas de aire en su interior quedó fijado en 7 horas de procesamiento térmico a una temperatura estable de 275°C.

Las densidades obtenidas de estas muestras detallan una disminución depreciable en comparación con la información técnica del PET virgen, esto puede deberse al proceso que tuvo este PET antes de su reciclaje, porque cabe mencionar que el material utilizado en esta investigación fue homogéneo, pero de segundo uso.

Cabe mencionar que en experimentaciones preliminares a este proyecto se intentó realizar probetas a partir de dos o más polímeros diferentes, teniendo malos

resultados. Esto se debió a la gran diferencia entre los puntos de fusión de los diversos polímeros. El polímero que mejor pudo haber sido combinado con el PET para la fabricación de probetas fue el Acrilonitrilo butadieno estireno, por sus siglas en inglés ABS, el cual también tiene propiedades mecánicas muy buenas y gran resistencia a los impactos, la diferencia de los puntos de fusión de ambos materiales es de 22°C lo que lo hacía el mejor prospecto. Desafortunadamente el resultado fue un panel muy poroso que no presentaba una estructura muy rígida para ensayar.

De cualquier forma, los paneles fabricados con PET mostraron una estructura sólida, capaces de flexionarse moderadamente antes de su rotura, lo cual le brinda buenas características físicas y mecánicas contra impactos, a los cuales estaría propenso de recibir en su uso diario para el uso para el que fue diseñado.

No obstante, este material para su uso como panel utilizado en muros divisorios aún le quedan temas por ser estudiados.

Trabajos por realizar:

Debido a que en este documento de tesis se abarca solo algunas variables mecánicas del material se considera que restan algunos trabajos por realizar, tales como:

- Evaluar la transferencia de calor de dicho panel en su uso como muro divisorio.
- Evaluar la transmisión acústica del panel.
- Evaluar la viabilidad económica del desarrollo de estos paneles, dado que el PET es un material relativamente de bajo costo y de fácil obtención, pero su procesamiento térmico puede ser razón del incremento de su costo.
- Realizar un muro a escala utilizando este panel para evaluar su comportamiento una vez instalado.

6 REFERENCIAS

Anon., 2003. Avoidance of waste: beneficial use of industrial by-products as constituents of concrete (The third information sheet prepared by the environmental working party of the concrete society's material group). *Concrete* 37 (5), 43–45.

Bangkok Metropolitan Administration, 2005. Bangkok State of the Environment, Environmental Quality Management and Control Division, Office of the Permanent Secretary for the Bangkok Metropolitan Administration, Bangkok, Thailand.

Choi, Y.W., Moon, D.J., Chung, J.S., Cho, S.K., 2005. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research* 35, 776–781.

Escalón, Edith (s.f). Botellas desechables, problemas permanentes. Recuperado de http://www.uv.mx/cienciauv/blog/botellas_desechables/

García Linán, Salvador (Julio 2015). Contaminación por el plástico. Recuperado de <http://www.elfinanciero.com.mx/opinion/contaminacion-por-el-plastico.html>

Hassani, A., Ganjidoust, H., Maghanaki, A.A., 2005. Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management & Research* 23, 322–327.

Jo, B.W., Park, S.K., Kim, C.H., 2006. Mechanical properties of polyester polymer concrete using recycled polyethylene terephthalate. *ACI Structural Journal* 103, 219–225.

Kim JJ, Park CG, Lee SiW, Lee SaW, Won JP. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites Part B: Eng* 2007;39:442–50.

Kim SB, Yi NH, Kim HY, Kim J, Song Y. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cem Concr Compos* 2010;32:232–40.

Marzouk, O.Y., Dheilily, R.M., Queneudec, M., 2007. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management* 27, 310–318.

Navarrete, Carlos (Mayo 2010). Contaminación por PET en México. Recuperado de <http://cambiomedioambiental.blogspot.mx/2010/05/contaminacion-por-pet-en-mexico.html>

Ochi T, Okubo S, Fukui K., 2007. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cem Concr Compos* 2007;29:448–55.

Plastic Intelligence Unit, 2007. Plastics Consumption in Thailand. Available:

<http://plastic.oie.go.th/SizingThaiMarket.aspx>.EN 13432, 2000. Packaging_Requirements for Packaging Recoverable through Composting and Biodegradation_ Test Scheme and Evaluation Criteria for the Final Acceptance of Packaging.

Raju, Sharma (Marzo 2015). Use of different forms of waste plastic in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 473 – 482. Recuperado de [www.elsevier.com/ locate/jclepro](http://www.elsevier.com/locate/jclepro)

Rebeiz, K.S., 1996. Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste. *Construction and Building Materials* 10 (3), 215–220.

Statista, 2014. Production of Plastics Worldwide from 1950 to 2013. Available. <http://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>.

Silva DA, Betioli AM, Gleize PJP, Roman HR, Gómez LA, Ribeiro JLD. Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cem Concr Res* 2004;35:1741–6.