

**DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS: REVISIÓN DE ALTERNATIVAS PARA
LA FABRICACIÓN DE NUEVOS TIPOS DE MATERIALES USADOS EN LA
INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS SÓLIDOS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)**

MARÍA PAZ GONZALEZ GOMEZ

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, junio de 2020

**DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS: REVISIÓN DE ALTERNATIVAS PARA
LA FABRICACIÓN DE NUEVOS TIPOS DE MATERIALES USADOS EN LA
INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS SÓLIDOS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)**

MARÍA PAZ GONZALEZ GOMEZ

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIERA QUÍMICA**

Director: ALEXANDER LUNA CORTES

Ingeniero químico Esp. MSc.

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Pamplona, junio de 2020

A Dios, Lilly y a Marthina, por siempre estar.

AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento de esta monografía va dirigido primero a Dios que es guía y apoyo fundamental frente a cualquier proyecto iniciado en mi vida, a Martha por poner cada día su empeño y corazón en hacerme brillar y a mis papás por creer en el proceso. De igual manera al ingeniero Raúl Romero, encargado de las practicas profesionales en la empresa Aguas Diamante del Cesar, quien fue la persona que sembró la semilla de la reutilización de polímeros en mí, y hoy puede ver el fruto de dicha siembra, a mi director de trabajo de grado el ingeniero químico MSc. Alexander Luna por la guía constante durante todo el estudio efectuado y, por último, pero no menos importante, a la Universidad de Pamplona y todo el cuerpo docente del programa de ingeniería química que han sido parte esencial de una formación profesional completa.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. JUSTIFICACIÓN	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo general	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3. GENERALIDADES	15
3.1 POLÍMEROS	15
3.2 POLIETILENO TEREFTALATO	17
4. ACTUALIDAD DEL RECICLAJE	19
4.1 DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS	19
4.2 RECICLAJE DEL POLIETILENO TEREFTALATO	21
4.3 REUTILIZACIÓN DE POLIETILENO TEREFTALATO; Error! Marcador no definido.	
5. PET USADO COMO MATERIA PRIMA EN LA ELABORACIÓN DE CEMENTO PLÁSTICO	24
6. PET Y RESIDUOS DE CONSTRUCCION: UNA NUEVA REVOLUCIÓN FRENTE A LOS MATERIALES “CONVENCIONALES”	29
7. CONCLUSIONES	34
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de densidad, porcentaje de humedad y límite de elasticidad de muestras de cemento plástico a diferentes concentraciones de adición de PET reciclado.	24
Tabla 2. Resultados de Gravedad específica y pH para mezclas a diferentes concentraciones de PET, RCA y CB. ^[83]	31
Tabla 3. Características de resistencia y propiedades de rigidez para mezclas a diferentes concentraciones de PET, RCA y CB. ^[83]	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gas etileno: ejemplo de monómero.....	15
Figura 2. Código de identificación de plásticos y resinas.....	16
Figura 3. Estructura ramificada y estructura lineal.....	17
Figura 4. Estructura química del polietileno tereftalato.....	17
Figura 5. Períodos de descomposición promedio para varios productos; "d" se refiere a días, "m" a meses, y "y" a años.....	20
Figura 6. Ciclo de vida del PET.....	21
Figura 7. Métodos utilizados en el reciclaje químico del PET.....	23
Figura 8. Comparación de la resistencia acústica de ladrillos de diferentes materiales sin revocar, revocados por una sola cara o por ambas.....	25
Figura 9. Resultado de prueba de resistencia a la compresión del bloque fabricado en la Universidad Laica Vicente Rocafructe.....	27
Figura 10. Comparación del peso específico de bloques fabricados a partir de diferentes materiales.....	27
Figura 11. Ladrillos y bloques fabricados a partir de PET reciclado en Colombia.....	28
Figura 12. Proporción del tipo de residuos sólidos generados en demoliciones de edificaciones estructuradas con ladrillo, marco y muro de corte.....	29
Figura 13. Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión no confinada para mezclas a diferentes concentraciones de PET, RCA y CB. ^[83]	32

GLOSARIO

- **ÁCIDO TEREFTALICO:** “Ácido aromático utilizado principalmente para la sinterización del polietileno tereftalato”. [1]
- **AGLUTINANTE:** “Material con la capacidad de unir fragmentos de uno o más materiales para generar compactación”. [2]
- **BAQUELITA:** “Resina termoplástica sintética obtenida a partir de la condensación del fenol con el formol”. [3]
- **BIODEGRADABLE:** “Significa ‘que puede ser desdoblado por seres vivos’ producto o sustancia que puede descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de agentes biológicos”. [4]
- **BLOQUE PARA CONSTRUCCIÓN:** “Bloque fabricado a partir de un mampuesto prefabricado utilizado en la construcción de muros y paredes”. [2]
- **CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA:** “Medida de facilidad en la que un material o medio permite el paso de agua por unidad de área transversal a la dirección del flujo”. [5]
- **DENSIDAD:** “La densidad de masa (ρ), se define como la masa de un sistema dividida por el volumen del mismo a una temperatura y presión determinadas, la medida de la densidad suministra una información global sobre la concentración de solutos”. [6]
- **DESECHO:** “Conjunto de cosas que se desechan de algo. Residuo del que se prescinde por no tener utilidad”. [7]
- **ENSAYO DE COMPRESIÓN:** “Ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión”. [8]

- **ESTRUCTURAS AMORFAS:** “Estructura cuyos átomos se encuentran desalineados aún en su estado sólido”. ^[9]
- **ESTRUCTURAS CRISTALINAS:** “Estructura cuyos átomos están dispuestos de manera regular y ordenada formando redes cristalinas”. ^[9]
- **ETILENGLICOL:** “Pertenciente al grupo de los dioles, en su forma pura es líquido, incoloro y transparente, se utiliza como compuesto fundamental para la sinterización de polietileno tereftalato”. ^[1]
- **FUERZAS INTERMOLECULARES:** “Interacciones existentes entre moléculas que se comportan de acuerdo a la naturaleza de dichas moléculas”. ^[3]
- **GAS DE EFECTO INVERNADERO:** “Principal causa del efecto invernadero. Gas atmosférico que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo, en la atmosfera terrestre los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido de nitrógeno y el ozono”. ^[10]
- **GRAVEDAD ESPECIFICA:** “Comparación de la densidad de una sustancia o material con la densidad del agua, es una unidad adimensional y numéricamente coincide con la densidad”. ^[1]
- **LÍMITE DE ELASTICIDAD:** “Mínima fuerza por unidad de sección capaz de producir en el sólido una cierta modificación permanente, si se aumenta gradualmente la fuerza exterior por encima del límite de elasticidad el sólido sigue deformándose hasta romperse”. ^[8]
- **MACROMOLÉCULAS:** “Para que una molécula de gran tamaño sea considerada polímero o macromolécula, además de cumplir la condición de estar formada por una serie de unidades pequeñas unidas secuencialmente, debe tener un peso molecular por encima de los 10.000 dalton”. ^[3]

- **MDD (DENSIDAD SECA MAXIMA):** “Mayor densidad que puede alcanzar un material al ser compactado a la humedad optima”. [8]
- **MONÓMERO:** “Del griego *monos*, simple, y *meros*, parte, molécula simple, de bajo peso molecular unida a otros monómeros con el fin de formar estructuras más grandes”. [11]
- **MORTERO:** “Mezcla de componentes inorgánicos, agregado áridos, agua y aditivos para generar compactación, se utilizan para elaborar elementos de construcción como ladrillos o bloques”. [2]
- **OMC (CONTENIDO OPTIMO DE HUMEDAD):** “Contenido de agua de un material o terreno que permite obtener una densidad máxima mediante su compactación”. [8]
- **PERMEABILIDAD:** “Capacidad de un material de permitir que en un tiempo dado lo atraviese una cantidad apreciable de un fluido sin que este afecte en ninguna medida su composición”. [1]
- **PESO ESPECÍFICO:** “Peso de un sistema dividido por el volumen del mismo, depende del valor de la aceleración de la gravedad en el lugar donde está ubicado el cuerpo”. [6]
- **PET (POLIETILENO TEREFTALATO):** “Poliéster termoplástico caracterizado por sus buenas propiedades de barrera física, química y de gases, ampliamente usado en aplicaciones industriales como envases, botellas de bebidas, herramientas eléctricas, artículos deportivos y fibras textiles”. [12]
- **pH:** “Indicador de potencial de hidrógenos, unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia”. [1]
- **PORCENTAJE DE HUMEDAD:** “Cantidad de agua presente en un material, expresada en porcentaje respecto a un determinado peso del material húmedo”. [9]

- **RECICLAJE:** “Someter un material usado a un proceso para que se pueda volver a utilizar. Someter repetidamente una materia a un mismo ciclo, para ampliar o incrementar los efectos de ésta”. ^[10]
- **RESIDUOS SÓLIDOS:** “Constitución de materiales desechados tras su vida útil y que por lo general por sí solos carecen de valor económico. Todos estos residuos sólidos, en su mayoría son susceptibles de reaprovecharse o transformarse con su correcto reciclado”. ^[7]
- **RESISTENCIA ACÚSTICA:** “También conocida como impedancia acústica, se define como la resistencia que ejerce un medio sobre las ondas sonoras que se intentan propagar a través de este”. ^[13]
- **REUTILIZACIÓN:** “Acción de volver a utilizar materiales desechados, dándoles el mismo uso, o procesarlos para que efectúen una labor diferente”. ^[10]
- **UCS (RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA):** “Medida de la resistencia de un material, esfuerzo de compresión axial máximo que puede tolerar una muestra de material cilíndrica recta bajo condiciones no confinadas”. ^[14]
- **VERTEDERO:** “Basureros, relleno sanitario, vertedero o tiradero hace referencia al lugar donde se vierten basuras, residuos o escombros”. ^[4]

INTRODUCCIÓN

La producción masiva de plásticos inició una revolución importante para la era industrializada, estos sobresalen entre otros materiales porque son livianos, económicos y tienen un proceso de producción sencillo, adicional a ello son duraderos y fáciles de moldear dependiendo de su uso comercial, lo anterior acarreó como consecuencia una producción masiva e incontrolada de plásticos que resultó en un problema ambiental representado en ecosistemas irrecuperables, y en un daño para la salud humana que a futuro también podría ser catastrófico ^{[15] [16] [17] [18]}.

En estudios realizados durante el año 2020 se estima que globalmente se producen alrededor de 300 millones de toneladas de plástico, de las cuales menos del 10% se recicla ^[19]. Según la *PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN* en Colombia se generan un millón de toneladas de residuos plásticos al año y el ciudadano promedio consume 24 kilos de plástico en dicha cantidad de tiempo, se torna preocupante el comunicado del Procurador, en el cual afirma que “el porcentaje de reciclaje de plástico a nivel nacional solo alcanza un 7%” ^[20], lo cual indica que el 93% restante de plástico termina acumulado en los rellenos sanitarios o depositado en las fuentes hídricas del país.

Chirayil et al. ^[21] en su trabajo orientado a la recuperación de materiales afirman que entre los tipos de plástico más comercializados mundialmente se encuentra el tereftalato de polietileno, más conocido por sus siglas en inglés PET, la visibilidad e importancia que en los últimos años se le ha dado a la investigación en pro del rehusó de este material es inevitable, el PET es un termoplástico que se puede sintetizar con alta precisión, tiene peso ligero y alta resistencia, todo esto lo hace apto para ser sometido a procesos de reutilización ^[22]; la sobreacumulación de PET posconsumo requiere de una solución urgente, la cual podría ser la reutilización de este como materia prima para la creación de nuevos materiales, dicho proceso conlleva un importante desafío de diseño y hoy la innovación en este sector industrial es una necesidad mundial ^[21].

En el presente trabajo se realizará una revisión de las posibles soluciones para la reutilización del polietileno tereftalato como materia prima utilizada para el reforzamiento polimérico en materiales de construcción, la implementación de este residuo, y las alternativas de tratamiento ejecutadas para su retorno a la vida útil dentro del sistema industrial.

1. JUSTIFICACIÓN

La problemática de la disposición de residuos sólidos en la actualidad es uno de los mayores retos ambientales a nivel global, Abdel-Shafy et al. ^[23] aseguran que “la acumulación incontrolada de residuos sólidos en vertederos genera una alteración irreparable a los ecosistemas” incluyendo la contaminación del aire, el agua y el suelo, lo cual representa una amenaza real para la vida humana y silvestre ^{[24] [25] [26]}.

El crecimiento exponencial de la población, el desplazamiento de las zonas rurales hacia las urbanas, la industrialización masiva y el consumismo innecesario han acelerado en gran medida la tasa, cantidad y calidad de los residuos sólidos generados, se calcula que el 56% de la basura se compone solo de plástico ^[27] reconocido por su muy baja biodegradabilidad, se estima que el tiempo de degradación total del PET supera los 100 años ^[28].

Entre los polímeros más comercializados en la actualidad se encuentra el PET ^[21] debido a su resistencia a la intemperie, alta durabilidad y su capacidad de ser incoloro e inodoro es un material idóneo como envase de alimentos, hoy en día aunque ya se están llevando a cabo campañas para la disminución de su consumo (como es el caso de la fabricación de carteras a partir de tela elaborada a base de polietileno tereftalato ^[29]) el daño ya está hecho, e igual, tan solo los fabricantes de bebidas siguen produciendo más de 500 mil millones de botellas de PET anuales a nivel global ^[30], por ello, se hace necesaria la ejecución de alternativas para la recuperación y reutilización sostenible de dicho polímero.

Buscar métodos alternativos para la reutilización de este material se ha convertido en un propósito de investigación con una muy alta demanda a nivel global, el uso del PET luego de su ciclo de vida útil (considerado muchas veces como “basura”) implementado como materia prima para la fabricación de un nuevo material, generaría no solo una disminución del impacto ambiental planteado por este residuo, sino que además a futuro se expresa como una mejora económica frente a la elaboración industrial del nuevo material.

Por todas estas razones, se realizará una revisión de procesos de reutilización de polietileno tereftalato en la industria de la construcción, que una sociedad interesada en el cuidado y recuperación del medio ambiente podría llevar a la realidad, incluyendo así dentro de cada estrategia las ventajas y desventajas de dicho proceder.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Utilizar los conceptos aprendidos en el diplomado “saneamiento ambiental” dictado por la institución *POLITÉCNICO DE SURAMÉRICA* para realizar un estudio enfocado en la revisión de los procesos más novedosos para la fabricación de nuevos tipos de materiales utilizados en la industria de la construcción mediante el tratamiento de residuos sólidos de tereftalato de polietileno.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar datos estadísticos confiables para exponer la problemática de la mala gestión de los residuos plásticos, y de la huella ambiental generada por este.
- Elaborar una revisión de las alternativas actuales, en las cuales mediante el reforzamiento polimérico en materiales de construcción se está ampliando el ciclo de vida útil del polietileno tereftalato.

3. GENERALIDADES

3.1 POLÍMEROS

En la actualidad sustancias como los polímeros son verdaderamente indispensables para la humanidad, forman parte esencial de materiales para vivienda, transporte, comunicación y casi todas las comodidades que hacen parte de la vida moderna. Hacia el año de 1930 la ciencia de los altos polímeros, denominada “ciencia de las macromoléculas” comenzó a surgir y todo el gran desarrollo de tecnología propuesto a partir de estos materiales vino después, hoy por hoy es un área todavía en constante redescubrimiento ^[31].

Los polímeros son macromoléculas constituidas por la repetición de pequeñas unidades químicas simples, llamadas monómeros, esta repetición puede ser dada en forma lineal o formando retículos tridimensionales, es muy interesante reconocer que los polímeros hacen parte de un grupo selecto de materiales que fueron ampliamente aplicados a escala industrial, sin antes tener conocimientos previos claros acerca de sus propiedades químicas o físicas ^[32].

La industria moderna del plástico empieza en las primeras décadas del siglo pasado con Leo Baekeland, químico belga que sintetiza el primer polímero sintético a partir de baquelita, abriendo paso a toda una nueva época de funcionalidades y manejos para este ^[33]. El plástico es ligero de fabricar a gran escala, duradero, de bajo costo, inodoro, versátil, maleable y fácil de moldear según el requerimiento necesario.

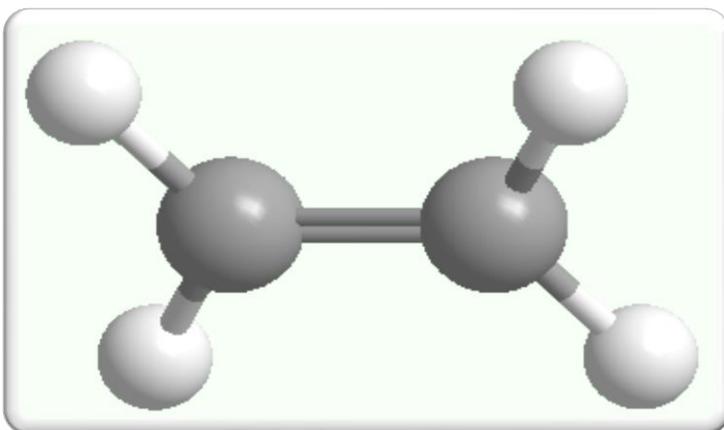


Figura 1. Gas etileno: ejemplo de monómero.

Según la Sociedad De La Industria De Plásticos (*Plastics Industry Association*) ^[34] existe una clasificación mundialmente conocida, denominada código de identificación de plásticos y

resinas, esta es utilizada internacionalmente en el sector industrial para distinguir la composición de resinas en los envases y otros productos plásticos con el fin de propiciar y dar más eficiencia al reciclaje.

En la figura 2 se representan los diferentes tipos de plásticos y sus ejemplos más conocidos, se identifican con un número del 1 al 7 ubicado en el interior del signo de reciclado, el número 1 indica polietileno tereftalato (PET), el 2 polietileno de alta densidad (HDPE), el 3 cloruro de polivinilo (PVC), el 4 hace referencia al polietileno de baja densidad (LDPE), el 5 al polipropileno (PP), el 6 al poliestireno (PS) y el número 7 indica que es una mezcla de diversos tipos de plástico ^[34].



Figura 2. Código de identificación de plásticos y resinas.

Fuente: Sociedad De La Industria De Plásticos ^[34].

Los polímeros generalmente se clasifican en termoplásticos y termofijos, que son sintetizados en procesos por polimerización ^[35], por adición ^[36] y por condensación ^[37]. Los materiales termoplásticos son polímeros que se encuentran unidos mediante fuerzas intermoleculares formando estructuras lineales o ramificadas como se observa en la figura 3, estos pueden adoptar dos tipos diferentes de estructuras en un mismo material, amorfas y cristalinas, una de sus cualidades más significativas es que se pueden calentar y remodelar por tiempo ilimitado, mientras que los termofijos se solidifican a una forma permanente y no se pueden remodelar, ni reprocesar debido a sus estructuras altamente entrecruzadas por enlaces covalentes. Los termoplásticos se pueden sintetizar con alta precisión y tienen características distintas como peso ligero y alta resistencia ^[22]. Los más comunes entre los termoplásticos son polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno tereftalato (PET) y polietileno de baja densidad (LDPE). El presente trabajo, se va a enfocar en la reutilización del polietileno tereftalato.

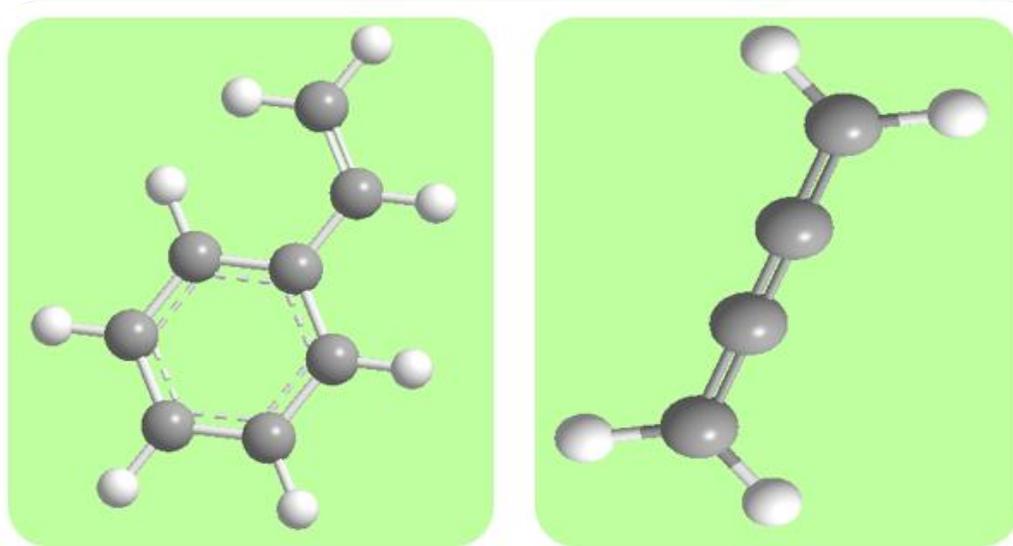


Figura 3. Estructura ramificada y estructura lineal.

3.2 POLIETILENO TEREFTALATO

El tereftalato de polietileno, poli tereftalato de etileno, polietilentereftalato o polietileno tereftalato, más conocido por sus siglas PET es un tipo de plástico perteneciente al grupo denominado poliésteres, es un polímero termoplástico mundialmente comercializado por sus camaleónicas ventajas, un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire, su fórmula química es $(C_{10}H_8O_4)_n$ y estructuralmente se observa cómo se representa en la figura 4 ^[38].

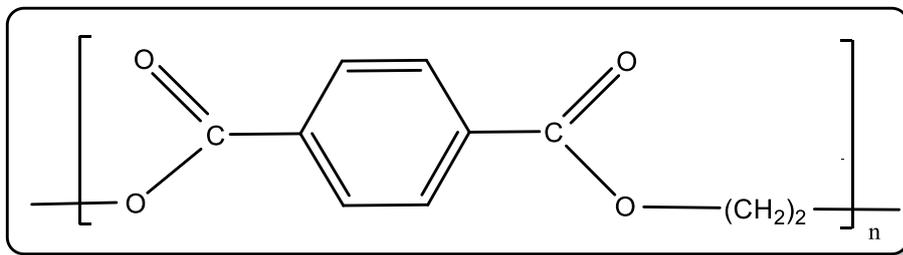


Figura 4. Estructura química del polietileno tereftalato.

El PET es un polímero con una muy elevada resistencia a la deformación térmica, presenta alta dureza y rigidez, por lo cual es resistente al desgaste, funciona como una excelente barrera contra los gases CO₂, O₂, la radiación UV y la humedad, además cuenta con una muy buena estabilidad dimensional ^[39], es estable a la intemperie ante temperaturas oscilantes entre los -

20°C hasta los 60°C ^[40] , puede ser transparente (APET, PET amorfo) o cristalino (CPET) y adicional es fisiológicamente inerte lo cual lo hace apto para estar en contacto con alimentos ^[41] , todo ello le ha otorgado su enorme posicionamiento como material base para los envases alimentarios.

Los envases hechos a partir de polietileno tereftalato generalmente se producen en máquinas con producción ininterrumpida y ciclos cortos, se elaboran utilizando una combinación entre etilenglicol con ácido tereftálico, con esto se forma una resina con la cual mediante un proceso de moldeo por inyección o extrusión se realiza la forma base, la cual se denomina preforma, luego esta se calienta en un horno a temperaturas aproximadas de 100°C, debido a este calentamiento la preforma se hace elástica, por medio de una máquina sopladora se estira y se sopla hasta que obtenga la forma deseada, para luego ser enfriada inmediatamente para asegurar que mantenga su forma ^[42] .

En la actualidad los residuos de PET generan uno de los problemas medioambientales más significativos a nivel mundial, por la mala gestión en el procesamiento de la disposición de residuos sólidos de este tipo.

4. ACTUALIDAD DEL RECICLAJE

4.1 DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Con el masivo desplazamiento de poblaciones hacia el área urbana los desechos urbanos, tanto de hogares, como comerciales han aumentado y esto ha generado como consecuencia un deterioro ambiental significativo a nivel de disposición de residuos ^[43]. En el programa de las Naciones Unidas para el desarrollo se encuentran los objetivos de desarrollo sostenible también conocidos por sus siglas ODS que son básicamente una iniciativa de las Naciones Unidas para que los países que hagan parte de ella encuentren acuerdos comunes para la sostenibilidad ambiental, económica y social, se hace especial énfasis en la buena disposición de residuos sólidos, durante todo su proceso, empezando por la educación en separación cuando se hace la captación de los residuos, hasta la disposición final de ellos, ya sea para su reutilización o para depositar en vertederos ^[44].

Los acontecimientos actuales hacen evidente que el crecimiento de la población urbana no va a disminuir en los próximos años, por ende, tampoco los desechos generados. Según Tan et al. ^[45] se han incrementado los desechos globales de 5.6 millones de toneladas registradas en 1997 hasta 7.65 millones de toneladas en el 2007, esto muestra un incremento aproximado del 28%, según la proyección registrada en dicho estudio para 2020 el incremento aumentara en un 30% ^[45], y se estima que para el 2025 esta cifra llegue a los 2.200 millones de toneladas ^[46]. Todo esto demuestra que la implementación de estrategias para la disminución de la disposición en vertederos de toda esta cantidad enorme de residuos generados sea ineludible, además se hace necesaria la implementación y maximización de tácticas reductoras de desechos sostenible en el tiempo.

Según Suthar et al. ^[47].se estima que en menos de una década en América Latina la producción de residuos sólidos crezca en un 66%, esto no es más que una consecuencia del crecimiento masivo de la población urbana en toda la región, solo para Latinoamérica se proyecta un crecimiento en la población entre los años del 2005 hasta el 2025 del 17% ^[47]. En estos países el problema de la contaminación empieza desde los hogares, muy pocas casas realizan el adecuado proceso de separación de sus propios desechos, y las empresas (aunque muchas estén reglamentadas) la mayoría de veces buscan la forma de obtener beneficios económicos por

encima de una gestión ambiental sostenible para el ecosistema que las rodea.

Es de conocimiento público que la gestión de residuos sólidos en la mayoría de ciudades en los países conocidos como países en desarrollo es totalmente insostenible, muchas veces por falta de educación o simplemente ahorro económico propio, los desechos sólidos de los hogares y las empresas son eliminados en áreas urbanas inadecuadas. Según los resultados del estudio de Padilla et al. [48] enfocado en la disposición de residuos sólidos en Colombia se hizo evidente el fallo en los niveles de educación respecto al tema ambiental, se mostró la necesidad del uso de la promoción de políticas de reciclaje que incluyeron el hecho de que el acceso a internet para la población vulnerable reforzaría actitudes necesarias hacia un mayor esfuerzo en la primera sección del proceso de disposición de residuos sólidos y se demostró la urgencia hacia la implementación de procesos de reutilización a escala industrial de residuos que se están convirtiendo directamente en desechos sin su debido aprovechamiento [48].

Entre los polímeros orgánicos más industrializados por el hombre, se encuentra el PET, cuando se usa como envase alimentario este material tiene una vida útil relativamente corta, el problema ambiental principal radica en que se puede conservar en el medio ambiente incluso durante siglos. Para hacer una comparación exacta del impacto ambiental que se puede generar con el uso desmedido de plástico se muestra en la figura 5 la comparación de diferentes materiales y su permanencia en el ecosistema [49].

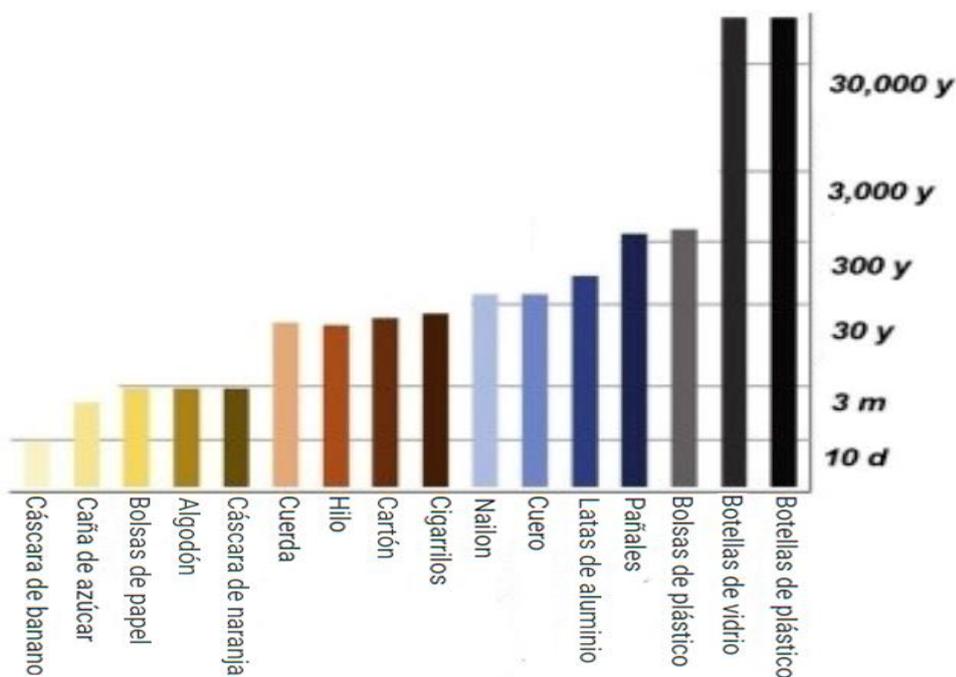


Figura 5. Períodos de descomposición promedio para varios productos; "d" se refiere a días, "m" a meses, y "y" a años.

Fuente: Datos recogidos de Chen et al. [49]

Se calcula que al menos 12 millones de toneladas de PET se generan actualmente en el mundo y que cada año tiene un aumento porcentual del 6% ^[50] esto genera la necesidad del implemento de estrategias sostenibles en el tiempo para mitigar el impacto ambiental tan grave generado hasta ahora y el que viene a futuro.

4.2 RECICLAJE DEL POLIETILENO TEREFALATO

Adicional a todos los beneficios del reciclaje del PET en cuanto a la disminución de la mala gestión de los residuos sólidos, una de las ventajas principales radica en que se genera un menor consumo de petróleo crudo virgen y gas natural, todo ello refuerza el esfuerzo realizado para la disminución de emisiones de carbono hacia la capa de ozono generadas por este proceso ^[51]. Sangwan et al. ^[52] realizaron una evaluación de impacto ambiental en la cual se comprobó que las emisiones de gases de efecto invernadero se disminuyeron hasta en un 82% si posterior a la vida útil del tereftalato de polietileno se encuentra una forma de reutilización para su reaparición como material rentable ^[52].



Figura 6. Ciclo de vida del PET.

Hamade et al. ^[53] en los resultados de su estudio publicado en el presente año afirman que la

reutilización de polietileno tereftalato genero un ahorro hasta de 1MJ por botella, a nivel macro esto se tradujo en un ahorro aproximado del 74% en la energía de producción utilizada y adicional a esto una disminución mundial de hasta el 182% de emisiones de dióxido de carbono producidas ^[53], según estimaciones realizadas, en el año 2020 se venderán aproximadamente medio billón de botellas de plástico en el mundo, la estimación para el 2021 es de aproximadamente 583.3 mil millones de botellas, a estas alarmantes estadísticas se le une el hecho que mil millones de botellas de PET de un solo uso producidas diariamente no se reutilizan ^[53].

Para el reciclaje del tereftalato de polietileno se utilizan diversos métodos entre los cuales sobresalen el reciclaje primario, mecánico, químico y cuaternario ^[54], el reciclaje primario es el que se lleva usando desde hace más tiempo, en este, básicamente el residuo pasa por un proceso de extrusión para luego ser mezclado con material virgen y producir productos finales de buena calidad, la desventaja más sobresaliente de este tipo de reciclaje es que los polímeros a reutilizar no deben tener ningún tipo de contaminación externa ^[55], en el reciclaje mecánico o secundario se realiza un proceso de molienda para generar productos finales de menor calidad, la ventaja de este tipo de recuperación es que incluye plásticos con algunos contaminantes ^[54], la finalidad primordial del proceso de reciclaje químico es “obtener porcentajes más altos del monómero con un tiempo de reacción más corto” ^[55], los procesos químicos para la despolimerización del PET más estudiados hasta el momento son la glicolisis ^[56], la metanólisis ^[57] y la hidrolisis ^[58] en la figura 7 se observa el proceso de estructuración química usando dichos procesos, cuando es demasiado complicado realizar procesos de recolección, separación o cuando los residuos a reciclar tienen contaminantes tóxicos o nocivos se utiliza el reciclaje cuaternario, en el cual se tratan los residuos mediante incineración, según Sandín ^[59] este proceso no entra dentro de la definición de reciclaje, debido a que los residuos se queman y ya no se puede reutilizar, aunque no está de más incluirlo dentro de la terminología.

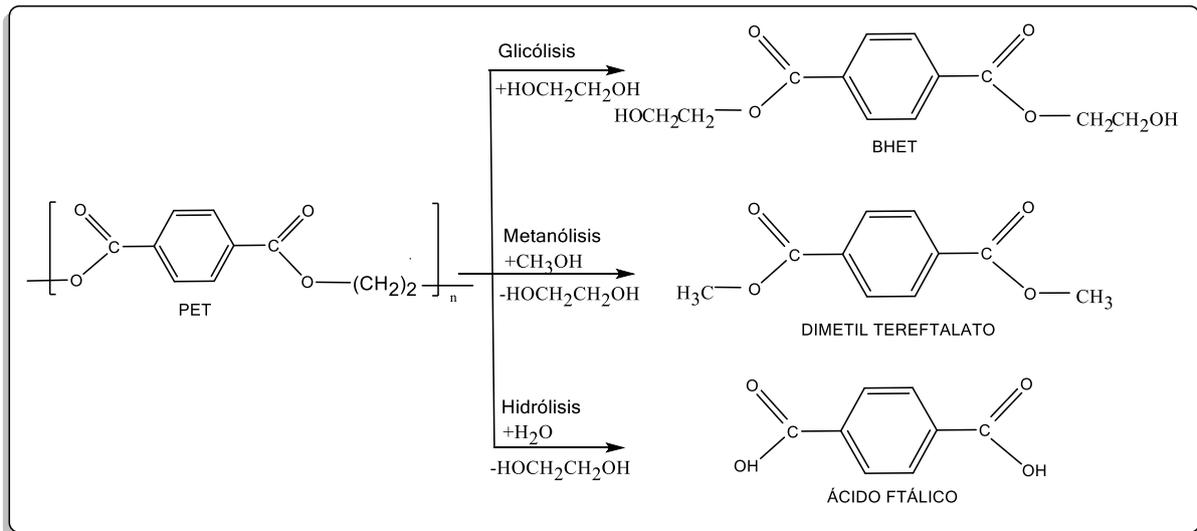


Figura 7. Métodos utilizados en el reciclaje químico del PET.

Fuente: adaptado de Tshifularo et al. ^[54]

El tereftalato de polietileno tiene características que lo hacen apto como reforzador en materiales de construcción tales como durabilidad, resistencia a la intemperie y a la corrosión, aislante térmico y de sonido, vida útil bastante larga, peso ligero ^[60] y obviamente el factor económico -en vista de que es un material reutilizado-, adicional a ello es importante destacar que es una efectiva barrera contra gases y olores ^[61]. A continuación, se describirán diversos trabajos enfocados en la reutilización de PET para la fabricación de un nuevo recurso para producir materiales, dándole así un valor agregado, entre los factores a evaluar se encuentran la reciclabilidad mecánica, el impacto ambiental generado durante el proceso de reutilización y el potencial de los materiales recuperados.

5. PET USADO COMO MATERIA PRIMA EN LA ELABORACIÓN DE CEMENTO PLÁSTICO

Patil ^[62] aseguró que para la próxima década, la sostenibilidad ambiental va a tener un enfoque primordial en la industria de la construcción, entre las estrategias investigativas más desarrolladas se encuentra la elaboración de cemento plástico, este tipo de aprovechamiento de desechos poliméricos se está convirtiendo en un tema sustancial de investigación como alternativa de eliminación de los desechos de concreto producidos en masa, se ha demostrado que el PET bajo procesos mecánicos específicos puede reducir el uso de concreto liviano y autocompactante, adicional a ello se puede usar como material de relleno inorgánico y como materia prima para la fabricación de materiales de construcción compuesto ^[62].

En la XIV Conferencia Mundial sobre Fabricación Sostenible (*Global Conference on Sustainable Manufacturing GCSM*) Jassim Ahmad ^[63] evaluó todo el proceso para el reciclaje de residuos de polietileno para producir cemento plástico, en el cual se reemplazaron los materiales áridos por el polímero reciclado, el autor realizó estudios experimentales de mezclas a diferentes concentraciones de PET reciclado y de mortero elaborado a base de cemento Portland y agua, la densidad, el porcentaje de humedad y el límite de elasticidad luego de un proceso de curado de 28 días se representan en la tabla 1, se encontró que la adición del PET en medida de fracción peso a peso del 10% o menos no generó una gran consecuencia en los estudios de caracterización mecánica del producto final ^[64], también se determinó que cuando dicha adición de plástico llega al 50% ^[60] se empezó a disminuir la densidad y la resistencia a la compresión del concreto y hay resultados que indicaron que se encuentran ventajas encontradas usando adición de polietileno tereftalato en concentraciones del 40% al 60% ^[65].

Tabla 1. Resultados de densidad, porcentaje de humedad y límite de elasticidad de muestras de cemento plástico a diferentes concentraciones de adición de PET reciclado. ^[63]

No. Muestra	PET reciclado %	Mortero de Cemento Portland %	Densidad g/cm ³	% Humedad	Límite de elasticidad N
1	15	85	1.458	11.600	1491
2	20	80	1.660	4.000	-
3	25	75	1.678	3.600	2352
4	30	70	1.972	3.790	1271
5	35	65	1.708	5.080	1103
6	40	60	1.662	10.730	571
7	50	50	1.537	5.040	-
8	60	40	1.375	5.420	788

A nivel latinoamericano la importancia de la producción de bloques y ladrillos utilizando PET reciclado como reemplazo de los elementos áridos ha tenido una gran relevancia, no solo por el hecho de la disminución de la huella ambiental, si no como una búsqueda constante de la fabricación de viviendas económicas para toda la población requerida, se presenta como una solución social frente a la problemática que como países en via de desarrollo se tiene actualmente.

Entre los trabajos más avanzados en pro de la construcción de viviendas usando bloques a partir de cemento plástico se encuentra el proyecto liderado por la Doctora y Magister en diseño arquitectónico Rosana Gaggino ^[66] que de la mano del Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) en Argentina, llevo a cabo el desarrollo de componentes de construcción livianos, de buena aislación térmica y acústica y resistencia mecánica suficiente utilizando polietileno triturado en mezclas de diferentes concentraciones de cemento, entre los resultados más notorios se encuentra una disminución económica en la fabricación total de la construcción, una edificación resistente y además ligera, los análisis también arrojaron resultados positivos en términos de la estabilidad del microclima en el interior de la vivienda, como se puede observar en la figura 8 no se generan grandes cambios en la resistencia acústica de los ladrillos fabricados a base de PET reciclado en comparación con ladrillos comunes o de cerámica, dentro de la figura también se tiene en cuenta la variable de las paredes revocadas del ladrillo ^[66].

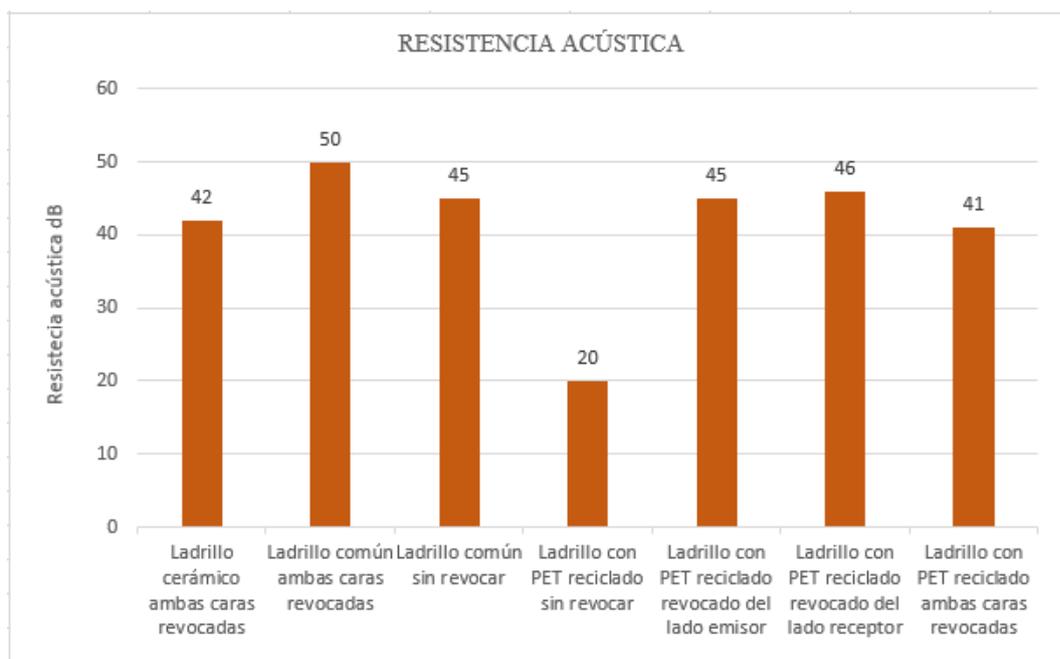


Figura 8. Comparación de la resistencia acústica de ladrillos de diferentes materiales sin revocar, revocados por una sola cara o por ambas.

Fuente: los valores de los ladrillos comunes y cerámicos fueron tomados de la norma IRAM 4044 ^[67],

y los valores de los ladrillos fabricados a partir de PET reciclado fueron obtenidos en el Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas de la Universidad Nacional de Córdoba ^[66].

En la Universidad Tecnológica de Panamá, en el año 2018 se planteó un proceso de fabricación de ladrillos de plástico fundido con virutas metálicas, bajo un procedimiento que consistía en la fundición de polietileno tereftalato a una temperatura aproximada de 70°C hasta 120°C, este se colocó en un molde al que gradualmente se le agregaron las virutas metálicas, para luego ser efectuado un proceso de compactación y curado, se realizaron pruebas de inducción eléctrica en las cuales la superficie del material fue sometida a una fuente de corriente directa de 12V, en vista de que no se encontró ningún valor crítico de conductividad eléctrica se logró confirmar las características aislantes del material, el producto final obtenido cumplía con las normas establecidas para elementos de construcción ^[68] ASTM C67 ^[69] y C56 ^[70].

Para evaluar la influencia de la adición de polietileno tereftalato reciclado en la fabricación de bloques para construcción en la Universidad Simón Bolívar de Cumaná, Venezuela, se realizó un proceso de molienda de PET utilizando para ello un molino mecánico de baja velocidad de giro, se prepararon mezclas de los materiales para la construcción de bloques de concreto a diferentes concentraciones, se determinó que el porcentaje peso a peso de concentración que mejores características tenía era 27% de adición de PET ^[71].

En la Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil en Ecuador se llevó a cabo el prototipo para un bloque liviano a partir de polímero reciclado para uso en la construcción de viviendas, se realizó siguiendo un proceso de captación y limpieza de la materia prima del cual se procedió a su posterior fundición en hornos a temperatura constante de 170°C durante 4 horas, el producto obtenido fue compactado y curado en agua, según el ensayo de resistencia a la compresión representado en la figura 9 se puede apreciar que a la máxima carga obtenida el bloque empieza a deformarse y en un proceso lento tiende a una deformación de 275mm, como se puede observar en la comparación representada en la figura 10 el peso específico de los bloques elaborados a partir de diferentes tipos de polímeros reciclado es menor a los fabricados a partir de mortero y hormigón común, adicionalmente se recalcó el hecho de que es un material que no genera desperdicios al momento de realizar el levantamiento de paredes en obras, lo cual creó un ahorro económico ya que no hay desperdicio de materiales ^[72].

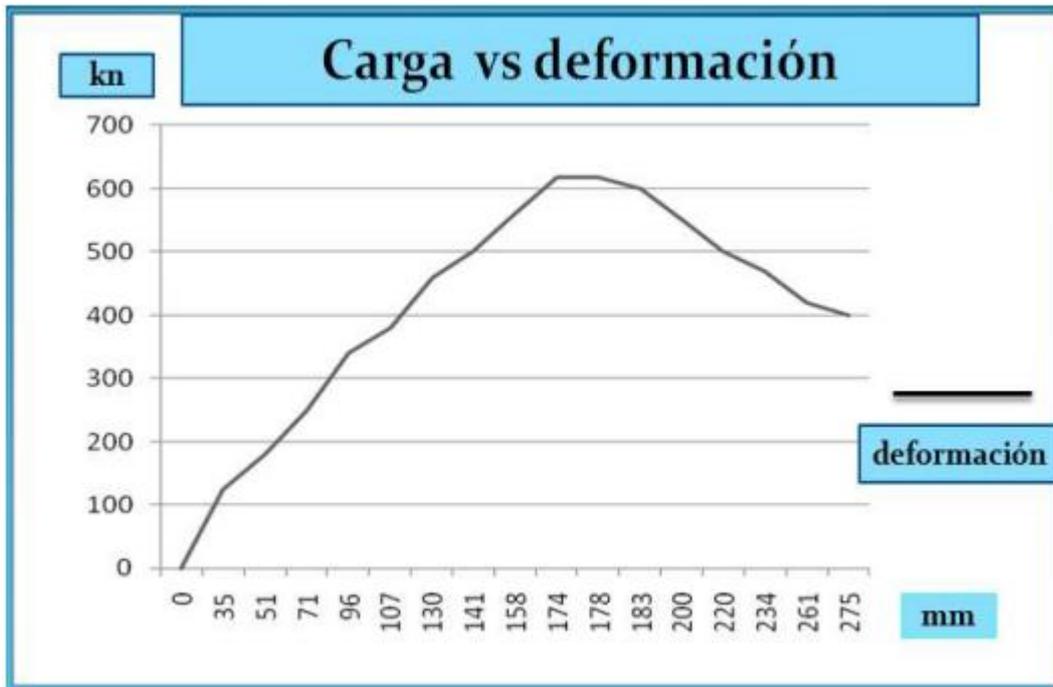


Figura 9. Resultado de prueba de resistencia a la compresión del bloque fabricado en la Universidad Laica Vicente Rocafuerte.

Fuente: los valores utilizados en la gráfica fueron obtenidos de la investigación de Pin ^[72].

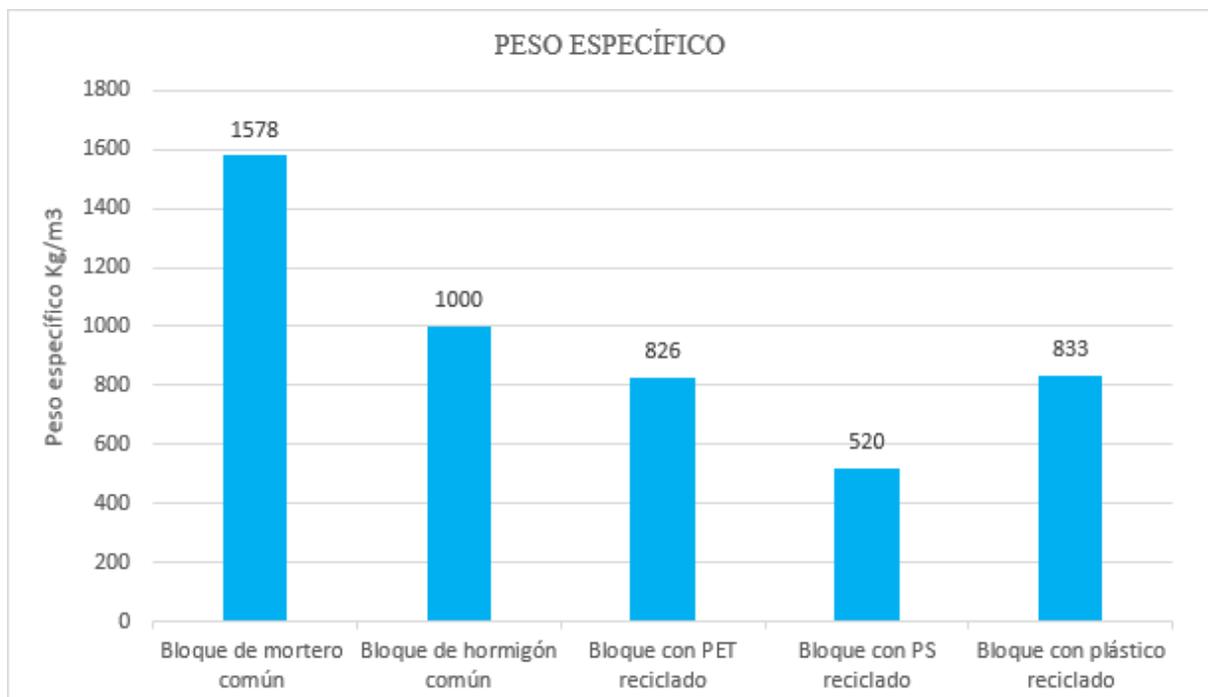


Figura 10. Comparación del peso específico de bloques fabricados a partir de diferentes materiales.

Fuente: los valores de los bloques de mortero y hormigón común fueron tomados del trabajo de Chamorro ^[73], y los valores de los bloques fabricados a partir de polímero reciclado fueron obtenidos

en la Universidad Laica Vicente Roca fuerte ^[72].

A nivel nacional se realizaron proyectos en función de la utilización de polietileno tereftalato para la construcción de bloques, en los cuales se encontraron excelentes resultados para el producto final, entre los trabajos más completos se encuentra el planteamiento y la propuesta de un ladrillo ecológico a base de PET, en la Universidad Católica de Manizales ^[74] y un proyecto enfocado en la factibilidad económica de la fabricación de dichos bloques llevado a cabo en la Universidad Católica de Colombia ^[75].



Figura 11. Ladrillos y bloques fabricados a partir de PET reciclado en Colombia.

Fuente: La primera imagen se obtuvo de la sección de resultados del trabajo experimental de Pareja et al. ^[74], la segunda imagen es el resultado del estudio de elaboración de bloques de Piñeros ^[75].

Todo lo anterior indica que ya se cuenta con la base experimental sólida necesaria para la fabricación industrial de bloques a partir de polietileno tereftalato reciclado, no se encuentran más que excelentes resultados arrojados en su utilización y las desventajas son pocas y no muy diferentes a las presentadas cuando se utilizan materiales convencionales, en Latinoamérica y específicamente en un país como Colombia es necesaria la disminución de la huella ambiental que se está generando, como país se tienen que proteger ecosistemas enteros de la mala disposición de residuos sólidos, se necesita una cultura de reciclaje comprometida a perseguir una solución que ya se encontró, adicional se precisa la validación de que cada hogar colombiano cuente con la posibilidad de tener vivienda. Se hace necesaria la conversión del proceso a gran escala, por lo cual se necesitan personas dispuestas a invertir recursos y tiempo en un proceso que contribuye a un formidable apoyo al medio ambiente y que adicional acerca a que como nación cada vez más se cuente con comportamientos de una sociedad capaz de brindarle calidad de vida a todos sus participantes.

6. PET Y RESIDUOS DE CONSTRUCCION: UNA NUEVA REVOLUCIÓN FRENTE A LOS MATERIALES “CONVENCIONALES”

Los residuos que se forman durante la demolición de edificaciones se conocen como residuos de construcción, se estima que más del 80% de los desechos generados durante demoliciones son concreto, polvo, desechos de ladrillos, azulejos y materiales de decoración [76], en la figura 12 se representa de forma gráfica la proporción de residuos generados en las demoliciones por unidad de área para edificaciones con tres diferentes formas estructurales de edificación: estructuras de ladrillo, estructuras de marco rígido y estructuras de muro de corte.

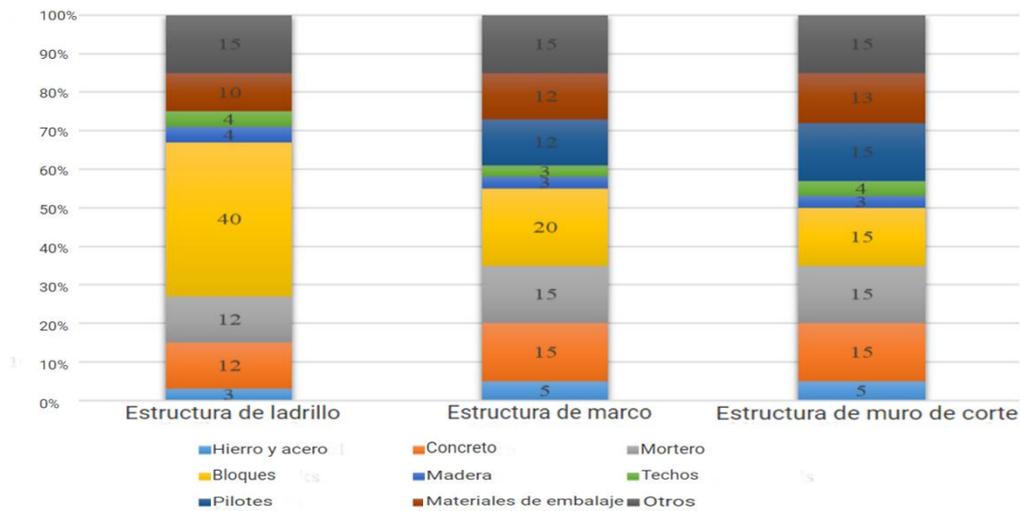


Figura 12. Proporción del tipo de residuos sólidos generados en demoliciones de edificaciones estructuradas con ladrillo, marco y muro de corte.

Fuente: Datos tomados del trabajo de Sarhan et al. [76]

A nivel mundial la disposición de dichos residuos se efectúa por medio de rellenos sanitarios, como solución inmediata este proceder es simple, conveniente y de bajo costo, se demostró que cuando no se establecen vertederos realmente especializados en apilar residuos provenientes de construcción, se ocupó demasiado terreno y se empezó a generar contaminación visual en cuanto al aspecto del ecosistema usado, adicional a ello los desechos se acumularon en el aire y dichas partículas de polvo suspendidas afectaron directamente la calidad del aire [77] y por consecuencia la salud de los seres vivos, después de los años estos residuos enterrados en el suelo afectaron la calidad de este y su productividad quedó disminuida en gran manera [78], luego de una acumulación a largo plazo las sustancias nocivas generadas por los residuos de construcción se infiltraron a las fuentes de agua subterráneas cercanas a los vertederos causando así una grave contaminación a nivel acuífero [79].

Todos estos problemas ecológicos y ambientales desarrollados tanto a corto como a largo plazo, han creado un problema actual que requiere una solución urgente, a nivel de construcción urbana, se necesitan procedimientos que incluyan dentro de los procesos generales la realización de un buen trabajo en la captación de la basura generada, la evaluación ambiental pertinente, y el rehusó de dichos residuos ^[80].

Arulrajah et al. ^[81] ejecutaron un procedimiento para la fabricación de material de construcción a partir de mezclas de partículas de PET molido no mayores a 5 mm -para reducir el área superficial débil ocasionada por las partículas de polietileno grandes- ^[81] evaluado con diferentes concentraciones de ladrillo triturado, al cual se le llama CB por sus siglas en inglés y de agregado de concreto reciclado, conocido como RCA, se utilizó cemento Portland como aglutinante y se secó el producto obtenido en un horno a 104°C durante 24 horas, para luego pasar por un proceso de curado y de secado de 7 y 28 días, se realizaron mezclas a diferentes porcentajes de concentración de ambos materiales ^[82].

La gravedad específica y el pH para las mezclas optimas en concentración peso a peso de 3% y 5% para el polietileno tereftalato reciclado y 97% y 95% para el RCA y el CB, respectivamente ^[82], se muestran en la tabla 2, se puede observar que la gravedad especifica del RCA fue ligeramente mayor que la del CB, y que el PET arrojó un valor aún más bajo, como una derivación del remplazo de materiales áridos por PET las mezclas que lo incluían reportaron un valor de la gravedad especifica más bajo; en las pruebas de pH realizadas se mostró un aumento en el pH debido a la naturaleza alcalina del cemento, se recalcó que la razón por la cual el valor del PET puro fue ligeramente alcalino y no ácido ^[83] como se esperaba se debió a que la mayoría de estos contenedores eran usados para agua mineral, jugo de manzana y aceite de oliva, y estos residuos modificaron el valor resultante del pH del PET al 100%, se demuestra que en concentraciones de estas mezclas el material resultante se puede utilizar para construcción de edificaciones e incluso en la elaboración de bases y subbases para pavimento ^[84].

Tabla 2. Resultados de Gravedad específica y pH para mezclas a diferentes concentraciones de PET, RCA y CB. ^[82]

<i>Mezcla</i>	<i>Gravedad específica</i>	<i>pH</i>
<i>100% RCA</i>	2.65	12.15
<i>3%PET+97%RCA</i>	2.61	12.19
<i>5%PET+95%RCA</i>	2.56	12.23
<i>100% CB</i>	2.62	11.83
<i>3%PET+97%CB</i>	2.58	11.91
<i>5%PET+95%CB</i>	2.56	11.89
<i>PET</i>	1.37	8.33

Las características de resistencia y propiedades de rigidez de mezclas de PET estabilizado con RCA y CB se tabulan en la tabla 3, para el caso de las mezclas que incluyen RCA los valores de densidad seca máxima (MDD) se disminuyeron debido a las partículas de madera presentes en dicho agregado, por otro lado el CB contiene partículas de menor dimensión lo cual generó una mayor compactación que resultó en un aumento en los niveles de MDD y un menor valor en los resultados del contenido óptimo de humedad (OMC) en vista de que por la alta compactación se generan menos espacios entre las partículas, en la tabla 3 también se representan los resultados de pruebas realizadas de resistencia a la compresión no confinada (UCS) que fueron tomados promediando el valor de tres muestras diarias por ciclo de curado, en la tabla 3 se observan los valores para un ciclo de curado de 28 días, y en la figura 13 se representa la comparación del cambio de UCS de un ciclo de curado de 7 días versus un ciclo de curado de 28 días, todas las mezclas con inclusión de valores de 3% y 5% de PET generaron valores de UCS por encima de los 1.2 MPa, lo que supero el requisito para su utilización en material de construcción ^[85] evidentemente dicho agregado de PET si genero una disminución para UCS, pero todavía se incluye dentro del rango necesario, este mismo comportamiento ocurre para la utilización de polímeros de HDPE y LDPE reciclados ^[85].

Tabla 3. Características de resistencia y propiedades de rigidez para mezclas a diferentes concentraciones de PET, RCA y CB. [82]

<i>Mezcla</i>	<i>MDD</i> <i>Mg/m³</i>	<i>OMC</i> <i>%</i>	<i>UCS</i> <i>MPa</i>
100% RCA	1.98	11.7	4.48
3%PET+97%RCA	1.93	12.6	2.14
5%PET+95%RCA	1.88	12.9	1.55
100% CB	2.02	10.3	5.49
3%PET+97%CB	1.93	11.2	3.13
5%PET+95%CB	1.88	11.3	2.73

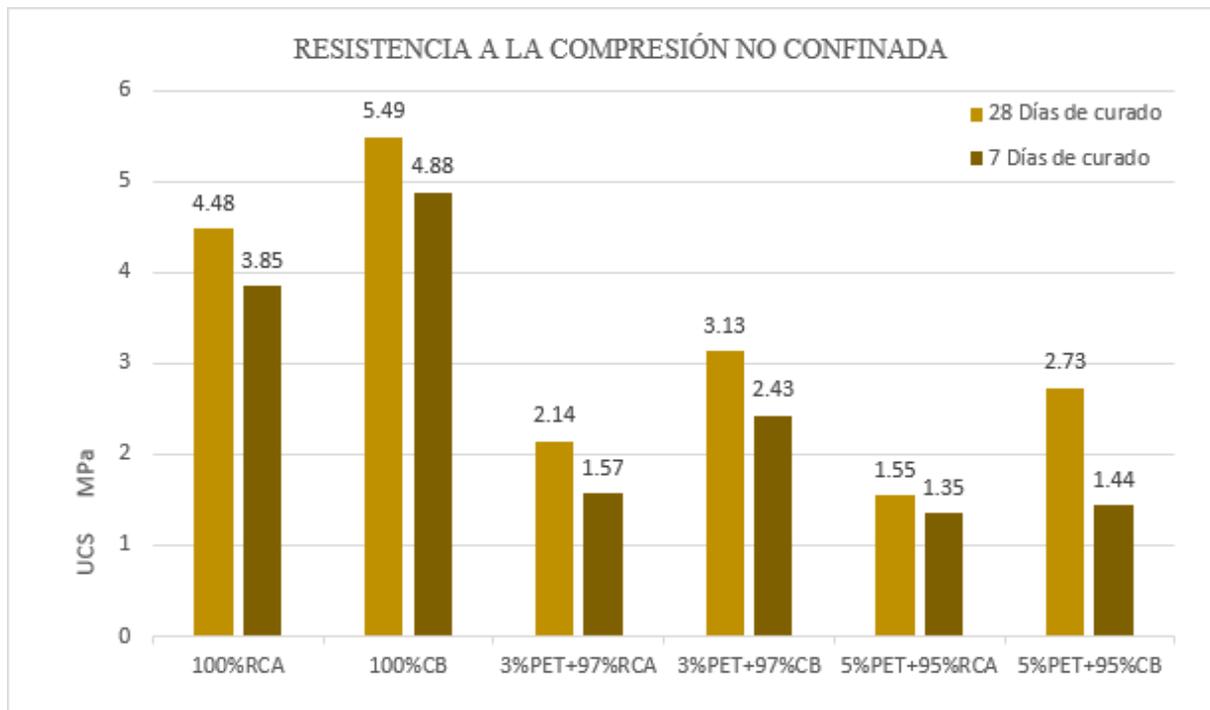


Figura 13. Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión no confinada para mezclas a diferentes concentraciones de PET, RCA y CB. [82]

Los diferentes valores de porcentajes de concentraciones peso a peso de las mezclas de polietileno tereftalato y de desechos de demolición para su posterior uso en materiales de

construcción fueron evaluadas en su totalidad por Perera et al. ^[82] dentro de los estudios realizados por los investigadores se encuentra el factor relevante que implica que el tamaño de partícula para materiales de demolición, no debe ser mayor a 20mm, la absorción de agua de la mezcla seleccionada como “ideal” demostró un valor promedio al 8%, la conductividad hidráulica se determinó por el método de carga constante y se obtuvieron valores iguales o incluso menores al rango permitido (107m/s) ^[82], en contenidos de 3% y 5% de PET se obtuvieron materiales para construcción con alta permeabilidad, los valores de pérdida por abrasión se efectuaron siguiendo las reglamentaciones de la norma ASTM C131 ^[86] y los resultados encontrados se encuentra dentro de los rangos recomendados ^[82].

Se necesita la realización de investigaciones experimentales a futuro en las cuales se evalúen los porcentajes ideales de las mezclas obtenidas, pero con diferentes tipos de aglutinante, ya que hasta el momento dentro de las investigaciones aprobadas por revistas científicas solo se encuentran estudios que realizan procedimientos utilizando cemento Portland como aglutinante, y este factor pueden generar diversos cambios en los resultados encontrados.

Los resultados demostrados en los procedimientos realizados conforman una estructura teórica sólida para que a futuro cercano se realicen los debidos estudios de la utilización de polietileno tereftalato y residuos de construcción con diferentes variables, estos métodos se podrían llevar a la realidad a gran escala basándose en dichas investigaciones. La ejecución de procesos mecánicos y químicos para la producción de materiales utilizables a escala industrial usando, no solo uno, sino dos tipos de residuos que de otra forma hubieran sido procesados mediante la disposición de residuos sólidos en relleno sanitario, representa ventajas a nivel ambiental incalculables, y la huella ambiental es algo que claramente a nivel global se está intentando disminuir, la utilización del conocimiento en pro de un beneficio para el bien común solo atrae más recursos, tanto monetarios, como humanos para expandir dicho aprovechamiento.

7. CONCLUSIONES

- Dentro de la evaluación estadística presentada se encontró que a nivel mundial el 56% de la basura se compone solo de plástico, por ello, la inadecuada disposición de residuos sólidos poliméricos es una problemática a la cual se le debe brindar estrategias de solución sostenibles en el tiempo, la situación a nivel nacional se torna todavía más grave, en Colombia menos del 10% del plástico comercializado se recicla, el resto simplemente se está depositando en rellenos sanitarios.
- La reutilización de polietileno tereftalato generaría una disminución en los procedimientos de disposición final de sólidos, esto representaría un ahorro para las entidades gubernamentales; el peso unitario de una pieza de construcción fabricada a base de PET es más alto que el peso unitario de una pieza elaborada con materiales convencionales, pero se debe tener en cuenta que a nivel general si se figura un ahorro económico, ya que se utilizan la mitad de ladrillos elaborados con PET para construir una edificación, una pared de espesor de quince centímetros elaborada con ladrillos fabricados a partir de PET genera la misma aislación térmica que una pared de treinta centímetros hecha con ladrillos de mortero común, además la construcción es mucho más liviana, por lo cual, los cimientos requeridos son más pequeños.
- A nivel latinoamericano se cuenta con una base sólida experimental para el procesamiento de cemento plástico, la resistencia acústica de un ladrillo de PET revocado por ambas caras es de 41 dB, lo cual no difiere mucho de los valores de resistencia acústica arrojados por ladrillos cerámicos (42 dB) y comunes (50 dB) revocados por ambas caras.
- Un bloque elaborado a partir de PET reciclado tiene un peso específico promedio de 833 Kg/m^3 , que es un 48% menos de lo que pesa un bloque fabricado con mortero común (1578 Kg/m^3), estos valores apoyan el escalamiento a nivel industrial para la ejecución de procesos de reforzamiento polimérico en materiales de construcción usando para ello polietileno tereftalato reciclado.
- Los procesos de reutilización de residuos de demolición no se han experimentado en Colombia, para futuros trabajos se espera la ejecución experimental de dicha implementación en el territorio nacional, como cuidado fundamental de la biodiversidad de la cual se debe responsabilizar toda una Nación, y de una prevención al desbordamiento de rellenos sanitarios.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brown, G.H., Salle, E.M. (2000). *Química Cuantitativa*, Barcelona, España: Editorial REVERTÉ, S.A.
2. Zanni, E. (2008). *Patología de La Construcción y Restauro de Obras de Arquitectura*, Cordoba, Argentina: Editorial BRUJAS.
3. Ramos Castellanos, P. (2003). *Residuos: Alternativas de Gestión*, Salamanca, España: Ediciones Universidad de Salamanca.
4. Audesirk, T., Audesirk, G., Byers, B.E. (2004). *Biology: Life on Earth*, Ciudad de Mexico: PRENTICE HALL INC.
5. Millar, A.A. *Manejo de Agua y Producción Química*, Chile: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
6. Fuentes, A., Castiñeiras, L., Queraltó, C. (1998). *Bioquímica y Patología Molecular*, Barcelona, España: Editorial REVERTÉ, S.A.
7. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (03 de septiembre del 2018). Conceptos básicos de reciclaje. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/>
8. Burbano de Ercilla, S., Burbano García, E., Gracia Muñoz, C. *Física General*, Madrid, España: Editorial TÉBARK S.L.
9. Hougen, O.A., Watson, K.M., Ragatz, R.A. *Principios de Los Procesos Químicos*, Tomo I, Barcelona, España: Editorial REVERTÉ.
10. Rosendo Ramos, D. *Conceptos Básicos Del Reciclaje 1era ed*, España: WANCEULEN EDITORIAL S.L.
11. Bueche, F. *Ciencias Físicas* 4th edición, Barcelona, España: Editorial REVERTÉ, S.A.
12. Akshay, E.M., Palaniappan, R., Sowmya, C.F., Rasana, N., Jayanarayanan, K. (2020) Properties of Blends from Polypropylene and Recycled. *Mater Today Proceedings*, 24:359-368.
13. Rougeron, C. *Aislamiento Acústico y Térmico En La Construcción*, Barcelona, España: Editores técnicos asociados S.A.
14. Ramsey, M. *Glossary Oilfield 1st ed*, Texas, USA: Texas Drilling Associates.
15. Allen, R.D. (2019). Waste PET: A Renewable Resource. *Joule*, 3(4):910.
16. Beaumont, N.J., Aanesen ,M., Austen, M.C. (2019). Global ecological, social and economic impacts of marine plastic. *Mar Pollution Bulletin*, 142:189-195.
17. Weiskopf, S.R., Rubenstein, M.A., Crozier, L.G. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the

- United States. *Science of the Total Environment*, 137:72-82.
18. Zambrano-Monserrate, M.A., Ruano, M.A. (2020). Estimating the damage cost of plastic waste in Galapagos Islands: A contingent valuation approach. *Marine Policy*, 117:103933.
 19. Satya, S.K., Sreekanth, P.S.R. (2020). An experimental study on recycled polypropylene and high-density polyethylene and evaluation of their mechanical properties. *Mater Today Proceedings*, 20(4):1-5.
 20. Procuraduría General de la Nación. (03 de abril del 2019). Colombia genera tonelada de plástico al año. Recuperado de: <https://www.procuraduria.gov.co/portal/>
 21. Chirayil, C.J., Mishra, R.K., Thomas, S. (2019). Materials Recovery, Direct Reuse and Incineration of PET Bottles. *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles*, 19:37-60.
 22. Grumezescu, V., Grumezescu, A.M. (2017). *Materials for biomedical engineering: Inorganic micro and nanostructures*, Romania: Editorial Biomedical.
 23. Abdel-Shafy, H.I., Mansour, M.S.M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4):1275-1290.
 24. Chae, Y., An, Y.J. (2018). Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review. *Environmental Pollution*, 240:387-395.
 25. Nwafor, N.A., Walker, T.R. (2020) Resources , Conservation & Recycling Rethinking marine insurance and plastic pollution : food for thought. *Resources, Conservation & Recycling*, 161:104950.
 26. Rani, A., Negi, S., Hussain, A., Kumar, S. (2019). Treatment of urban municipal landfill leachate utilizing garbage enzyme. *Bioresource Technology*, 297:122437.
 27. Gu, F., Guo, J., Zhang, W., Summers, P.A., Hall, P. (2017). From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of the Total Environment*, 601:1192-1207.
 28. Isabel, M., Prieto, A., Saldaña, F.L., María P, Arias. (2018). Estudio técnico-económico para un plan de negocio en la producción de filamento tipo PET. *Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz*, 350:1-12.
 29. Lucia, C., Liñan, T. (2019). Estudio de prefactibilidad para la producción de carteras con diseños personalizados elaboradas a base de tela de poliéster (PET). *Universidad San Ignacio Loyola*, 19(1):1-157.
 30. Greenpeace. (Febrero del 2019). Datos sobre la producción de plásticos. Recuperado de: <https://es.greenpeace.org/>
 31. Billmeyer, F.W. (2014). *Ciencia de Los Polímeros 4th ed*, España: Editorial REVERTÉ.

32. Zhang, H., Tumarkin, E., Sullan, R.M.A., Walker, G.C., Kumacheva, E. (2017). Exploring Microfluidic Routes to Microgels of Biological Polymers. *Macromolecular Rapid Communications*, 28(5):527-538.
33. Baekeland, L.H. (1909). Original papers: The synthesis, constitution, and uses of bakelite. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1(3):149-161.
34. Wang, Z., Peng, B., Huang, Y., Sun, G. (2019). Classification for plastic bottles recycling based on image recognition. *Waste Management*, 88:170-181.
35. Patel, Y.S., Patel, H.S. (2017). Thermoplastic-thermosetting merged polyimides via furan-maleimide Diels – Alder polymerization. *Arabian Journal of Chemistry*, 10:1373-1380.
36. Torr, A.M., Mart, M. (2015). Addition of rosin acid during thermoplastic polyurethane synthesis to improve its immediate adhesion to PVC. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 25:31-38.
37. Bakkali-hassani, C., Planes, M., Roos, K., Wirotius, A., Ibarboure, E. (2018). Synthesis of polyamide 6 with aramid units by combination of anionic ring- opening and condensation reactions. *European Polymer Journal*, 102:231-237.
38. Lopez Carrasquero, F. (2014). *Fundamentos de Polímeros 2nd ed*, Merida: Universidad de los Andes.
39. Akshaya, E.M., Palaniappan, R., Sowmya, C.F., Rasana, N., Jayanarayanan, K. (2020). Properties of Blends from Polypropylene and Recycled Polyethylene Terephthalate using a Compatibilizer. *Mater Today Proceedings*, 24:359-368.
40. Parolini, M., Ferrario, C., Felice, B. (2020). Interactive effects between sinking polyethylene terephthalate (PET) microplastics deriving from water bottles and a benthic grazer. *Journal of Hazardous Materials*, 398:122848.
41. Galo, G., Lima, M., Bachmann, L. (2018). Use of polyethylene terephthalate as a prosthetic component in the prosthesis on an overdenture implant. *Materials Science & Engineering*, 99:1341-1349.
42. Barbaran, S., Cabanillas, M., Paredes, H.J., Rubio Rodriguez, L.E., Alvarez, Y., Quezada Medardo, A. (2018). Biodegradación de polietileno tereftalato (PET) por acción de Pseudomona aeruginosa, en condiciones de laboratorio. *Universidad César Vallejo*, 34:53.
43. Oteng-Ababio, M., Owusu-Sekyere, E., Amoah, S.T. (2017). Landfill externalities and property values dilemma—emerging insights from three Ghanaian cities. *Journal of Contemporary African Studies*, 35(3):349-369.

44. Objetivos de Desarrollo Sostenible PNUD. (Junio del 2016). Objetivos medioambientales para los países pertenecientes a la ONU. Recuperado de: <https://www.undp.org>
45. Tan, S.T., Ho, W.S., Hashim, H., Lim, J.S., Lee, C.T. (2015). Waste Management Pinch Analysis (WAMPA) with Economic Assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 45:145-150.
46. Maskey, B. (2018). Determinants of Household Waste Segregation in Gorkha Municipality, Nepal. *Journal of Sustainable Development*, 11(1):1-15.
47. Suthar, S., Singh, P. (2015). Household solid waste generation and composition in different family size and socio-economic groups: A case study. *Sustainable Cities and Society*, 14(4):56-63.
48. Padilla, A.J., Trujillo, J.C. (2018). Waste disposal and households' heterogeneity. Identifying factors shaping attitudes towards source-separated recycling in Bogotá, Colombia. *Waste Management*, 74:16-33.
49. Chen, X., Yan, N. (2020). A brief overview of renewable plastics. *Mater Today Sustainable*, 7:100031.
50. Briassoulis, D., Pikasi, A., Hiskakis, M. (2020). Recirculation potential of post-consumer industrial bio-based plastics through mechanical recycling Techno-economic sustainability criteria and indicators. *Polymer Degradation and Stability*, 6:109217.
51. Benavides, P.T., Dunn, J.B., Han, J., Bidy, M., Markham, J. (2018). Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled, and Bio-Derived PET Bottles. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(8):9725-9733.
52. Sangwan, S.K., Choudhary, K., Batra, C. (2018). Environmental impact assessment of a ceramic tile supply chain – a case study. *International Journal of Sustainable engineering*, 11(3):211-216.
53. Hamade, R., Hadchiti, R., Ammouri, A. (2020). Making Environmental Case Case for Reusable Reusable PET PET Bottles Bottles. *Procedia Manufacturing*, 43:201-207.
54. Tshifularo, C.A., Patnaik, A. (2020). Recycling of Plastics into Textile Raw Materials and Products. *Sustainable Technologies for Fashion and Textiles*, 11:311-326.
55. Al-sabagh, A.M., Yehia, F.Z., Eshaq, G., Rabie, A.M., Elmetwally AE. (2016). Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1):53-64.
56. Esquer, R., García, J.J. (2019). Metal-catalysed Poly (Ethylene) terephthalate and polyurethane degradations by glycolysis. *Journal of Organometallic Chemistry*,

- 902:120972.
57. Han, M., (2019). Depolymerization of PET Bottle via Methanolysis and Hydrolysis. *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles*, 19:85-108.
 58. Chen, M., Lai, C., Chen, H. (2019). Preparation of long-chain branched polyethylene terephthalates (PETs), and crystallization behaviors , thermal characteristics , and hydrolysis resistance of their biaxially stretching films. *Journal of Physical and Chemistry Solids*, 129:354-367.
 59. Sandin, G., Peters, G.M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling e A review. *Journal of Cleaner Production*, 184:353-365.
 60. Gug, J.I., Cacciola, D., Sobkowicz, M.J. (2015). Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. *Waste Management*, 35:283-292.
 61. Franco-Urquiza, E.A., Maspoch, M. (2017). Evaluación de las propiedades mecánicas en mezclas de Poliestireno/Polietileno. *Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, 114(08222).
 62. Patil, P.S. (2015). Behavior of concrete which is partially replaced with waste plastic. *International Journal of Innovate Technology and Exploring Engineering*, 11(4).
 63. Jassim, A.K. (2017). Recycling of Polyethylene Waste to Produce Plastic Cement. *Procedia Manufacturing*, 8:635-642.
 64. Kang, D.H., Auras, R., Singh, J. (2016). Life cycle assessment of non-alcoholic single-serve polyethylene terephthalate beverage bottles in the state of California. *Resources Conservation & Recycling*, 116:45-52.
 65. Oliveux, G., Dandy, L.O., Leek, G.A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72:61-99.
 66. Gaggino, R. (2015). Emprendimiento de fabricación de ladrillos con plástico. *Revista Invi*, 23(63).
 67. IRAM 4044: Acústica. Protección contra el ruido en edificios. Requisitos de aislamiento acústico mínimo. Método de medición y clasificación. Cerramientos y aberturas, verticales y horizontales, 2015.
 68. Madrid, J., Bolobosky, M. (2018). Manufacture of bricks based on PET polymers and metal chips. *Universidad Tecnológica de Panamá*, 4:33-38.
 69. ASTM C67-07: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

70. ASTM C56 - 13: Standard Specification for Structural Clay Nonloadbearing Tile, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
71. Garcia, S., Bracho, N. (2019). Study of the effect of adding plastic residues in the manufacture of concrete hollow blocks. *Revista Latinoamericana de Metalurgia de Materiales*, 16:55-59.
72. Pin Parrales, J.H. (2019). Prototipo para un bloque de encastre en base de PET para aplicación en una vivienda planta baja. *Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil*, 1-98.
73. Chamorro, H. (2006). *Funciones De Las Paredes 1st ed.* Argentina: Editorial EL POLITÉCNICO.
74. Rojas Trejos, D., Lopez Pareja, J.D. (2019). Planteamiento y propuesta de un ladrillo ecológico a base de PET. *Universidad Católica de Manizales*, 1-120.
75. Piñeros Moreno, M.E., Herrera Muriel, D. (2018). Proyecto de factibilidad económica para la fabricación de bloques con agregados de plástico reciclado (PET), aplicados en la construcción de vivienda. *Universidad Católica de Colombia*, 1-118.
76. Sarhan, S., Pasquire, C., Manu, E., King, A. (2017). Contractual governance as a source of institutionalised waste in construction: A review, implications, and road map for future research directions. *International Journal of Managing Projects in Business*, 10(3):550-577.
77. Bogush, A.A., Stegemann, J.A., Zhou, Q. (2019). Co-processing of raw and washed air pollution control residues from energy-from-waste facilities in the cement kiln. *Journal of Cleaner Production*, 254:119924.
78. Han, I., Wee, G.N., No, J.H., Lee, T.K. (2018). Pollution level and reusability of the waste soil generated from demolition of a rural railway. *Environmental Pollution*, 240:867-874.
79. Kong, L., Ma, B. (2020). Evaluation of environmental impact of construction waste disposal based on fuzzy set analysis. *Environmental Technology & Innovation*, 19:100877.
80. Ding, Z., Zhu, M., Tam, V.W.Y., Yi, G., Tran, C.N.N. (2018). A system dynamics-based environmental benefit assessment model of construction waste reduction management at the design and construction stages. *Journal of Cleaner Production*, 176:676-692.
81. Arulrajah, A., Yaghoubi, E., Wong, Y.C., Horpibulsuk, S. (2017). Recycled plastic granules and demolition wastes as construction materials: Resilient moduli and strength characteristics. *Construction and Building Materials*, 147:639-647.

82. Perera, S., Arulrajah ,A., Wong, Y.C., Horpibulsuk, S., Maghool, F. (2019). Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials. *Construction and Building Materials*, 221:200-209.
83. Saha, G. (2015). *Basic of PET Imaging: Physics, Chemistry, and Regulations 4th ed.* USA: Editorial Springer Science & Business Media.
84. Arulrajah, A., Perera, S., Wong, Y.C., Horpibulsuk, S., Maghool, F. (2020). Stiffness and flexural strength evaluation of cement stabilized PET blends with demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 239:117819.
86. ASTM C131-03: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Coarse Aggregate of Small Size by Impact Abrasion on Machine in Los Angeles ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.