



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**CARACTERIZACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO
PORTLAND CONTENIENDO AGREGADO FINO DE PET
(tereftalato de polietileno)**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

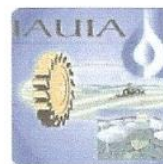
Presenta:

Marcelino Benito Vásquez López

DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Bajo la supervisión de:
Dr. Martín Hidalgo Reyes

Chapingo, Estado de México, Enero de 2019

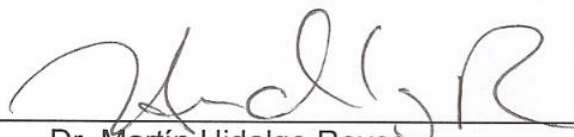


**CARACTERIZACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO PORTLAND
CONTENIENDO AGREGADO FINO DE PET
(Tereftalato de polietileno)**

Tesis realizada por **Marcelino Benito Vásquez López** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

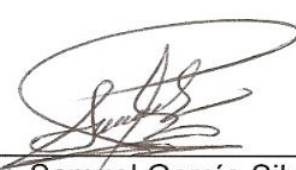
DIRECTOR: _____


Dr. Martín Hidalgo Reyes

CO-DIRECTOR: _____


Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

ASESOR: _____


Dr. Samuel García Silva

CONTENIDO GENERAL

CONTENIDO GENERAL	III
ÍNDICE DE CUADROS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
Agradecimientos	VIII
Dedicatoria.....	IX
Datos biográficos	X
RESUMEN GENERAL	XI
GENERAL ABSTRACT	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Justificación de la investigación.....	4
1.2. Hipótesis.....	5
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivo específicos	5
1.4. Organización de la tesis	6
1.5. Literatura citada	7
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1. Plásticos	9
2.2. PET (Tereftalato de Polietileno).....	9
2.3. Antecedentes del PET	10
2.4. Consumo del PET	10
2.5. Producción de botellas de PET	11
2.6. Reciclaje del PET	12

2.6.1. Métodos físicos	12
2.6.2. Método químico	13
2.6.3. Método termomecánico	13
2.6.4. Alternativa de uso del PET	13
2.6.5. Estudios sobre el uso del PET en materiales a base de cemento....	14
2.7. Literatura citada	18
CAPÍTULO 3. ARTÍCULO CIENTÍFICO	21
3.1. Resumen	21
3.2. Introducción	22
3.3. Materiales y método	24
3.3.1. Materiales	24
3.3.2. Método	27
3.3.3. Granulometría de los materiales	27
3.3.4. Preparación de morteros y elaboración de especímenes.....	28
3.3.5. Caracterización reológica de las mezclas	30
3.3.6. Caracterización de los morteros en estado endurecido.....	31
3.3.7. Velocidad de pulso ultrasónico	31
3.3.8. Resistencia a la compresión.....	32
3.3.9. Módulo de elasticidad.....	33
3.3.10. Resistencia a la flexión.....	34
3.3.11. Absorción capilar	35
3.3.12. Microscopía electrónica de barrido.....	36
3.4. Resultados y discusión	36
3.4.1. Reología de las mezclas de mortero en estado fresco.....	36
3.4.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)	39

3.4.3. Resistencia a la compresión.....	41
3.4.4. Módulo de elasticidad.....	42
3.4.5. Resistencia a la flexión.....	44
3.4.6. Absorción capilar.....	45
3.4.7. Microscopía electrónica de barrido.....	47
3.5. Conclusiones	51
3.6. Recomendaciones.....	52
3.7. Agradecimientos.....	52
3.8. Literatura citada.....	53
ANEXO 1	56
Equipo utilizado y pruebas realizadas	56

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 3

Cuadro 1. Composición química del cemento Portland utilizado.	25
Cuadro 2. Proporciones en peso de materiales utilizados	29
Cuadro 3. Cantidad y tipo de especímenes.	29

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Composición global de residuos sólidos.	1
---	---

CAPÍTULO 3

Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento general para la caracterización de mortero.	26
Figura 2. Partículas de PET	27
Figura 3. Curva granulométrica del agregado fino	28
Figura 4. Elaboración de especímenes de mortero.....	30
Figura 5. Medición de velocidad de pulso ultrasónico.....	32
Figura 6. Ensayo de resistencia a la compresión.....	32
Figura 7. Ensayo de resistencia a la flexión	34
Figura 8. Prueba de absorción capilar-esquema.....	35
Figura 9. Curvas de flujo de los morteros	37
Figura 10. Propiedades reológicas de la mezcla de mortero	38
Figura 11. Velocidad de pulso ultrasónico en función de los días de curado... ..	39
Figura 12. Velocidad de pulso ultrasónico experimental en función del porcentaje de PET	41
Figura 13. Resistencia a la compresión	42
Figura 14. Módulos de elasticidad.....	43
Figura 15. Resistencia a la flexión con respecto al porcentaje de PET.....	44
Figura 16. Absorción capilar-Comportamiento del agua absorbida.....	46
Figura 17. Imágenes de SEM de partículas de PET sin triturar	47
Figura 18. Imágenes de SEM de partículas de PET triturado	48
Figura 19. SEM-Espectros	49

ANEXOS

Figura 1. Licuadora International LI-12.	56
Figura 2. Partículas de PET	56
Figura 3. Tamizador Tyler RX-29	57
Figura 4. Engrasado de moldes.	57
Figura 5. Proceso de curado de los especímenes.	57
Figura 6. Reómetro Physica MCR 301 (Anton Paar).	57
Figura 7. Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.	57
Figura 8. Ensayo de resistencia a la compresión.....	57
Figura 9. Espécimen cúbico fracturado.....	57
Figura 10. Ensayo de resistencia a la flexión.	57
Figura 11. Ensayo de absorción capilar de agua.	57
Figura 12. Microscopio electrónico de barrido JSM-IT300LV (JEOL).	57
Figura 13. Imagen de electrones retrodispersados.	57

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por la oportunidad de estudiar y formarme académicamente desde la carrera hasta la maestría.

Al programa de posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral de Agua (IAUIA) por haberme brindado las herramientas, asesorías y conocimiento para reforzar mi formación académica y pertenecer a su programa educativo.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) IPN UNIDAD Oaxaca, por brindarme el espacio, equipo, conocimiento y apoyo de los profesores durante mi estancia profesional y en la realización de mi trabajo de investigación.

Prisciliano Cano agradece a la SIP del IPN por financiar el proyecto con clave 20180029 dentro del cual se desarrolló el presente trabajo, así como al CONACyT por financiar el proyecto CB clave 239727.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca para la realización de mi maestría.

Al Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita del CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, por su ayuda económica en la compra de materiales, por sus conocimientos, asesorías, consejos y sugerencias para la realización del presente trabajo de tesis.

Al Dr. Martín Hidalgo Reyes por aceptar la dirección de mi proyecto de investigación y de las sugerencias recibidas para mejorar mi trabajo de tesis.

Al M. en C. Frank Manuel León Martínez del CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, por brindarme sus conocimientos y apoyo en las pruebas realizadas en este trabajo.

Al Dr. Samuel García Silva por sus sugerencias y conocimientos recibidos para mejorar mi trabajo de tesis.

Al M. en C. Samuel Ramírez Arellanes por sus conocimientos y apoyo durante la realización de diferentes prácticas en laboratorio para la realización de mi tesis.

DEDICATORIA

A Dios por mantenerme firme aquí con salud y muchas ganas de triunfar siendo un refugio constante en mi vida.

A mi mamá la señora Domitila Virginia López Silva por todo el amor, cariño, comprensión, sabiduría y consejos que siempre me ha brindado y ser un motor para mí vida y siempre seguir adelante.

A mi papá el señor Cristino Benito Vásquez por ser un ejemplo de carácter y perseverancia en mi vida, con sus consejos alentadores que me motivaron a nunca rendirme y seguir adelante.

A mis hermanos Magdaleno y Beatriz por darme buenos consejos, apoyarme y nunca abandonarme siempre juntos, los quiero chicos.

A Erika Padilla con su enorme ayuda y consejos que me motivaron a seguir adelante y luchar por mis sueños.

A Ana Laura, Alejandro, Belén, Liz, Ana y Artemio que siempre confiaron en mí y me brindaron su ayuda pero sobre todo sus enormes consejos atinados y estar conmigo siempre, los quiero.

DATOS BIOGRÁFICOS

Marcelino Benito Vásquez López, originario de la comunidad llamada Guadalupe Buenavista en el municipio de Santa María Yucuhiti, ubicada en el estado de Oaxaca. Realizó sus estudios de primaria en la escuela “Justo Sierra” durante los años 1997-2003 en su localidad, posteriormente en la misma cursó la secundaria “Flechador del Sol” en los años 2003-2006, después se trasladó a su municipio y cursó la preparatoria durante los años 2006-2009. En el 2010 fue aceptado por la Universidad Autónoma Chapingo y cursó un año de propedéutico, de ahí le llamó la atención la ingeniería, en especial la mecánica agrícola y los sistemas de automatización, de los años 2011-2015 cursó la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola en el cual tuvo muchas actividades, realizó su servicio social en diferentes áreas de aprendizaje, como en la instalación de biodigestores, casas adobe, estufas ecológicas y huertos familiares en la sierra norte de Puebla, Veracruz y el estado de Michoacán, posteriormente realizó su estancia de la licenciatura en el estado de Aguascalientes México, siendo parte importante de la empresa “BISON” en el diseño de maquinaria agrícola e implementos. En el año de 2016 recibió su título y cédula profesional que lo acredita como ingeniero mecánico agrícola y después le surgió el interés de realizar una maestría para reforzar sus conocimientos, fue aceptado en el posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua de esta Universidad, en las cuales realizó logros importantes como realización de un calentador solar casero usando tubos de cobre, también fue al país de Costa Rica como ponente de su trabajo de tesis titulado “Caracterización de mortero de cemento portland conteniendo agregado fino de PET (tereftalato de polietileno)” misma que llevó a cabo en su estancia profesional de la maestría en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) IPN unidad Oaxaca.

CARACTERIZACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO PORTLAND CONTENIENDO AGREGADO FINO DE PET (Tereftalato de polietileno)

RESUMEN GENERAL

Los envases de tereftalato de polietileno (PET) de desecho normalmente se disponen en el medio ambiente, generando problemas de contaminación. Buscando reutilizar este material, el objetivo de este trabajo fue caracterizar mortero de cemento Portland conteniendo partículas de PET como parte parcial del agregado fino natural, en proporciones volumétricas de 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, y 20 %. La relación a/c utilizada en las mezclas fue de 0.55 con partículas de PET triturado con tamaños menores a 4.75 mm, excepto el control. Se fabricaron especímenes de mortero cúbicos (5 cm x 5 cm x 5 cm), cilíndricos (5 cm x 10 cm) y prismáticos cuadrangulares (4 cm x 4 cm x 16 cm). Se evaluaron propiedades reológicas en estado fresco, así como las mecánicas y de durabilidad de mortero en estado endurecido. Los resultados indican que las mezclas mantienen sus propiedades de trabajabilidad con proporciones <15 % de sustitución con respecto al control, debido a los valores similares del esfuerzo de fluencia e índice de consistencia. Con relación a las propiedades mecánicas, a medida que se incrementa la cantidad de PET se observa una disminución de la velocidad de pulso ultrasónico, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión. Sin embargo, la absorción de agua aumentó en los morteros conteniendo PET. Finalmente, el análisis de microscopía electrónica de barrido demostró que existe unión en resistencia mecánica del PET con la mezcla de mortero debido a la rugosidad del agregado, producto del proceso de triturado.

Palabras clave: Mortero, mezclas, PET, sustitución, propiedades.

Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Marcelino Benito Vásquez López

Director de Tesis: Dr. Martín Hidalgo Reyes

Co-Director de Tesis: Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

CHARACTERIZATION OF PORTLAND CEMENT MORTAR CONTAINING ADDED FINE PET (Polyethylene terephthalate)

GENERAL ABSTRACT

Polyethylene terephthalate (PET) packaging are normally disposed in the environment, generating pollution problems. Looking for reusing this material, the objective of this work was to characterize Portland cement mortar containing PET particles as part of the natural fine aggregate, in volumetric proportions of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. The a/c ratio used in the mixtures was of 0.55 with PET particles crushed with sizes less than 4.75 mm, except the control. Cubic mortar specimens (5 cm x 5 cm x 5 cm), cylindrical (5 cm x 10 cm) and quadrangular binoculars (4 cm x 4 cm x 16 cm) were manufactured. For this purpose, specimens were made in the form of cubes (5 cm x 5 cm), cylinders (5 cm x 10 cm) and prisms (4 cm x 4 cm x 16 cm). The rheological properties in the fresh state were evaluated, as well as the mechanical and durability properties of mortar in a hardened state. The results indicate that the mixtures maintain their workability properties with proportions <15% of substitution with regarding control, due to the similar values of the yield stress and consistency index. In relation to the mechanical properties, as the amount of PET increases, a decrease in the ultrasonic pulse rate, the compressive strength, the modulus of elasticity and the resistance to bending is observed. However, water absorption increased in mortars containing PET. Finally, the scanning electron microscopy analysis showed that there is a union in the mechanical strength of the PET with the mortar mixture due to the roughness of the aggregate, product of the crushing process.

Key words: Mortar, mixtures, PET, substitution, properties.

Master of Science Thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Marcelino Benito Vázquez López

Advisors: Dr. Martín Hidalgo Reyes, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

A partir del siglo XXI, los plásticos se han convertido en una parte esencial de nuestras vidas, a tal grado que nos encontramos inmersos con el uso de plásticos, en este caso del Tereftalato de Polietileno (PET) que normalmente se usa para la fabricación de botellas de agua y refrescos, sin embargo esto acarrea fuentes de contaminación y van en aumento.

En la Figura 1 se puede observar que el plástico representa el 10 % de residuos sólidos urbanos a nivel global, por encima de otros materiales como vidrio y metal, aunque los papeles, residuos orgánicos y otros son los principales, con mayor porcentaje de desechos. Desde el año 2000, los residuos plásticos aumentaron mucho más que el resto y se espera que siga creciendo a un ritmo elevado con las nuevas dependencias que se tienen a los plásticos en la vida cotidiana (Moreno-Pérez, 2012). En un principio se fabricaron con la idea de ser aprovechados en la comercialización de los productos consumibles por los seres vivos, pero ahora cada día contribuyen a una mayor acumulación de producto de desecho.

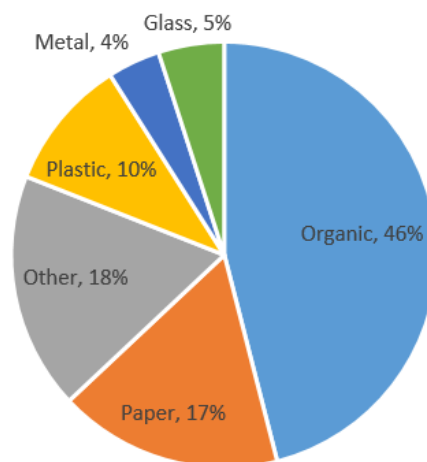


Figura 1. Composición global de residuos sólidos.

Fuente: Hoornweg & Bhada (2012)

Fue hasta este siglo cuando surgen diferentes ideas de reutilización del PET para disminuir el incremento de la contaminación en hábitat terrestre y marino, situación que afecta directamente al planeta por descuido o falta de conocimientos en el proceso de reciclado, anteriormente la mentalidad era usar y tirar, con un solo uso de diferentes productos hechos a base de PET. Ahora con las nuevas ideas y tecnologías innovadoras, se extiende la vida útil del PET, ya que después de consumirse y desecharse, se puede procesar y reutilizarlo como nueva materia prima (Coelho et al., 2011).

El PET es un material que pertenece al grupo de los poliésteres cuya materia prima es el petróleo, fue desarrollado en forma de fibras sintéticas en 1941 por los científicos británicos Whinfield y Dickson en busca de un sustituto del algodón y fue hasta la década de los 70 cuando se empezaron a usar como envases debido a sus características como baja densidad, transparencia, durabilidad y además, es fácil de transportar ya que es más liviano que otros materiales y también cumple con características y normas para envasar alimentos y bebidas (Coelho et al., 2011).

Los plásticos tienen beneficios sustanciales en términos de su bajo peso, durabilidad y menor costo en comparación con muchos otros tipos de material (Andrady & Neal, 2009; Thompson et al., 2009). La producción de polímeros en todo el mundo se estimó en 260 millones de toneladas métricas por año para el 2007 (PlasticsEurope, 2008).

De esta producción, aproximadamente el 50 % de los plásticos son utilizados y desechados después de haber sido utilizados una sola vez, tales como envases, acolchados agrícolas, artículos de consumo desechable, tubos, revestimientos de cable, materiales estructurales, dispositivos electrónicos, mobiliario y vehículos (PlasticsEurope, 2006). Cabe señalar que Estados Unidos es el principal consumidor de botellas de PET, seguido de China y México; en 2007 el consumo mundial de botellas de PET fue de 15 millones de toneladas, lo que representó el 8% de la producción mundial de plástico (Shen et al., 2010).

Actualmente existe un grave problema ambiental con los plásticos PET, ya que se requieren aproximadamente entre 100 a 1000 años para degradarse (Silva et al., 2005). Esto significa que las botellas de PET ocupan una fracción importante del espacio del relleno sanitario que ya está lleno y es escaso (Arena et al., 2003). Por su parte, el reciclaje del PET se realiza en cuatro fases, las cuales son: recolección, separación, transformación-fabricación y comercialización (Shen et al., 2010).

Una forma adicional para combatir la contaminación por PET es usarlos en materiales para construcción, por ejemplo: Albano et al. (2009) investigaron el comportamiento mecánico de morteros conteniendo partículas de desecho de PET. Los resultados mostraron una disminución en la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad.

Por su parte, Akçaözoğlu et al. (2010) examinaron el efecto de usar partículas de desecho de PET como agregado en morteros en diferentes mezclas. Los resultados mostraron que los morteros obtenidos se pueden considerar en la categoría de concreto estructural ligero, en términos de peso unitario y propiedades de resistencia mecánica.

De la misma manera Hannawi et al. (2010) utilizaron policarbonato reciclado (PC) y PET en concreto. También observaron reducción del módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión a medida que aumentó la cantidad de PET.

La siguiente investigación tiene como propósito reutilizar PET reciclado y contribuir en la disminución de la contaminación, generado fuentes de empleo, en cada uno de los procesos de reciclado, específicamente usar el PET en diferentes proporciones volumétricas de 5 % al 20 % respecto al control, sustituyendo al agregado natural (arena), con la finalidad de que en un futuro el PET pueda incorporarse en áreas de la ingeniería y construcción que ayuden en la reducción de costos y tener un uso para el desecho del PET que se consume.

1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Actualmente, el problema de la contaminación es muy fuerte en todo el mundo, es visible en los desechos presentes en el medio marino y terrestre. Los envases plásticos de PET son tirados de forma irresponsable en los canales de riego, ríos, arroyos, zanjas, brechas, barrancas, campo abierto y en otros casos son quemados o enterrados e incluso se llegan a reutilizar sin pasar por un proceso de lavado adecuado. Esto forma parte de un gran problema ambiental ya que el PET tarda cientos de años para degradarse, si a esto se suma la falta de conocimiento ecológico, da como resultado una contaminación excesiva y un desperdicio de material.

Mirando hacia las próximas décadas, parece inevitable que la humanidad se vuelva más dependiente de los plásticos; por lo tanto, se examinan posibles soluciones para la gestión de residuos plásticos que pueden ser recuperados en otros nuevos productos. Además de impulsar el reciclaje nacional del PET evitando su acumulación en los rellenos sanitarios o en cualquier otro lugar y disminuyendo así su cantidad, creando fuentes de empleo en procesos de reciclado, dando una reutilización particular de este material reduciendo su tamaño y utilizado como sustituto de agregado fino natural para nuevo mortero y ser utilizado en el área de construcción e ingeniería.

1.2. HIPÓTESIS

Al sustituir agregado natural (arena) por partículas de PET triturado con tamaños menores a 4.75 mm en diferentes proporciones volumétricas de sustitución del 5 %, 10 %, 15 % y 20 % con respecto al control en las muestras de mortero, se mejoran las características físicas, mecánicas y reológicas de la mezcla.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia que tiene el PET en mezclas de mortero, al sustituir el agregado fino natural, con diferentes porcentajes volumétricos, usando partículas de tamaño menores de 4.75 mm. Considerando las propiedades físicas, reológicas, mecánicas y de durabilidad de los morteros obtenidos.

1.3.2. Objetivo específicos

- Obtener PET triturado con granulometría similar a la arena natural.
- Determinar las propiedades físicas de los agregados naturales y el PET.
- Elaborar especímenes con distintas mezclas de mortero conteniendo varios porcentajes de PET en sustitución de agregado fino natural.
- Determinar las propiedades reológicas en estado fresco de la mezcla (revenimiento de materiales, curvas de flujo, viscosidad).
- Determinar las propiedades mecánicas en estado endurecido (velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad, absorción capilar y microscopía electrónica de barrido).

1.4. Organización de la tesis

Esta tesis está organizada en tres capítulos, incluyendo el presente (capítulo uno) donde se establece la introducción general, la justificación de la investigación, hipótesis y los objetivos del trabajo. En el capítulo dos se presenta una revisión de la literatura y en el capítulo tres se detalla el trabajo realizado en formato artículo que próximamente será enviado a una revista científica y finalmente se presenta un título de anexos de algunos equipos utilizados y pruebas realizadas durante el trascurso del trabajo de tesis.

1.5. LITERATURA CITADA

- Akçaözoğlu, S., Duran-Atış, C., & Akçaözoğlu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*. 30(2), 285–290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., & Gutiérrez, A. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*. 29(10), 2707–2716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>
- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 364(1526), 1977–1984. doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- Arena, U., Mastellone, M. L., & Perugini, F. (2003). Life cycle assessment of a plastic packaging recycling system. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 8(2), 92–98. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02978432>
- Coelho, T. M., Castro, R., & Gobbo Jr, J. A. (2011). PET containers in Brazil : Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. *Resources, Conservation & Recycling*. 55(3), 291–299. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.010>
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*. 30(11), 2312–2320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>
- Hoorweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a Waste, A Global Review of Solid Waste Management. Washinton USA. Recuperado de: https://siteresources.worldbank.org/Inturbandevlopment/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf
- Moreno-Pérez, S. (2012). Reporte CESOP, Residuos sólidos urbanos en México (Vol. 51). México, D.F. Recuperado de: <http://www3.diputados.gob.mx/camara/content/download/274147/851591/file/Reporte-51-Residuso-solidos-urbanos-Mexico.pdf>
- PlasticsEurope. (2006). The Compelling Facts About Plastics. An analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe. Association of plastics manufacturers. Brussels, Belgium. Recuperado de: https://www.plasticseurope.org/application/files/2815/1689/9283/2006compelling_fact_PubJan2008.pdf
- PlasticsEurope. (2008). The compelling facts about plastics 2007. An analysis of plastics production, demand and recovery for 2007 in Europe. Annual book of ASTM standards. Brussels, Belgium. Recuperado de: https://www.plasticseurope.org/application/files/1515/1689/9283/2007CompellingFacts_PubOct2008.pdf
- Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Open-loop recycling : A LCA case study of PET bottle to fibre recycling. *Resources, Conservation & Recycling*. 55(1), 34–52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.014>

- Silva, D. A., Betioli, A. M., Gleize, P. J. P., Roman, H. R., Gómez, L. A., & Ribeiro, J. L. D. (2005). Degradation of recycled PET fibers in portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 35(9), 1741–1746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.040>
- Thompson, R. C., Swan, S. H., Moore, C. J., & Vom-Saal, F. S. (2009). Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 364(1526), 1973–1976. doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Plásticos

Los plásticos son sustancias orgánicas de alto peso molecular que se sintetizan generalmente a partir de compuestos de bajo peso molecular y se caracterizan por tener mayor resistencia y densidad, que sirven para aislamiento térmico, eléctrico y resistente a los ácidos (Cristán-Frías et al., 2003). Para el caso particular, el aumento de la producción de PET ha planteado un gran desafío ambiental, ya que se produce a partir de combustibles fósiles (petróleo crudo o gasolina) y demora en degradarse más de 100 años, eso conlleva a una contaminación excesiva del medio ambiente (Arena et al., 2003; Cristán-Frías et al., 2003; Silva et al., 2005). Los plásticos a su vez se dividen en dos grupos dependiendo de su comportamiento al calor: termoplásticos y termoestables, el primero se reblandece al calentarse y al enfriarse se vuelve sólido, el segundo al calentarse se vuelve sólido y difícil de regresar a su estado inicial, generalmente es más resistente que los termoplásticos (Cristán-Frías et al., 2003; Muñoz, 2012). Adicionalmente, existe un tercer grupo de plásticos llamados elastómeros, que son materiales elásticos tipo caucho que tienen la capacidad y resistencia de ser estiradas (Cristán-Frías et al., 2003).

2.2. PET (Tereftalato de Polietileno)

El PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol, esto da lugar a la formación de gránulos o pellets color blanco que se utilizan para fabricar principalmente envases. El PET es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire, además el PET es un plástico de alta calidad que se identifica con el número uno, o las siglas “PET” rodeado de tres flechas en el fondo de los envases fabricados con este material (Muñoz, 2012).

2.3. Antecedentes del PET

El PET fue patentado por John Rex Whinfield y James Tennant Dickson en 1941 partiendo de ácidos aromáticos y desarrollaron poliésteres saturados con punto de fusión más alto dentro de los cuales se encuentra el PET. En 1973 la industria del plástico buscaba desarrollar un material irrompible, ligero y transparente para comercializar líquidos. Los primeros envases de PET aparecieron en el mercado alrededor del año 1977 convirtiéndose en el envase ideal para la distribución moderna de bebidas y agua embotellada (Delgadillo, 2008; Muñoz, 2012).

2.4. Consumo del PET

México es el principal consumidor de refrescos en el mundo con un consumo per cápita de aproximadamente 163 litros por año, también es líder en el consumo per cápita de agua embotellada (Delgadillo, 2008). Debido a estos consumos se genera una contaminación por la falta de reciclaje de botellas de PET, sin embargo este material puede ser reciclado generando un negocio en la recolección de botellas de PET.

En 2005, aproximadamente el 70% de la producción de PET se utilizó para fabricar fibra y el 30% para botellas (Shen et al., 2010). Esta tendencia es variada, ya que el sector de bebidas embotelladas ha crecido más rápidamente que cualquier otra aplicación de PET (Sinha et al., 2010).

Es importante señalar que el PET, una vez producido no representa un riesgo directo para el medio ambiente por sí solo, sino que aumenta significativamente la cantidad de desechos acumulados en los vertederos, hábitat terrestre y marino (Foolmaun & Ramjeawon, 2013).

En 2011, México tenía 112 336 538 habitantes que produjeron alrededor de 41 mil toneladas de desechos, lo que significó que se generaron 112 toneladas por día en todo el país (SEMARNART, 2012). Esta cantidad de basura colocó a México como el décimo productor mundial de residuos sólidos urbanos (Gasnier & Derbez-Portales, 2008). La generación de residuos per cápita fue de 0,870 kg

por día (Armijo De Vega, 2006). Sin embargo, hay variaciones dentro del país que oscilan entre 0,680 kg en la parte sur del país y 1,40 kg en la Ciudad de México (SEMARNART, 2012).

La mitad de los residuos nacionales que se generan provienen de la parte central del país, mientras que la parte sur contribuye menos a la generación de residuos. La generación de residuos por estado sobresalen solo algunos y representan el 53.7% de la generación nacional de residuos, estos estados son Ciudad de México, Estado de México, Jalisco, Veracruz, Guanajuato, Tamaulipas y Nuevo León (SEMARNART, 2012).

La industria de los termoplásticos en México tiene una participación importante en la producción de envases; en el año 2,000 se usaron 3.2 millones de toneladas de plástico, de las cuales 413 mil toneladas fueron para la producción de PET. Además de que el PET tiene baja permeabilidad a gases, los envases son ligeros, transparentes, resistentes a impactos y no alteran las propiedades de su contenido y no son tóxicos; por ello el PET ha desplazado a otros materiales y su demanda va en aumento (Kint & Muñoz, 1999).

2.5. Producción de botellas de PET

Una vez que se produce PET, se transforma en diferentes productos mediante diversos procesos tal es el caso de las botellas de PET, cuya producción consta principalmente de tres etapas: Primero el polímero se sintetiza a partir de petróleo crudo, luego se usan moldes de inyección pequeños y densos como preformas, finalmente las botellas se forman mediante moldeo por estirado y soplado de estas preformas (Chipech et al., 2009). Una vez terminado el producto, las botellas salen a la comercialización para el consumidor final, quienes lo usan una sola vez provocando un aumento en la contaminación.

2.6. Reciclaje del PET

Se han desarrollado diferentes tecnologías para reciclar este material, la principal ventaja del PET es ser 100% reciclable; ya sea en una ruta de reciclaje de circuito cerrado o en una abierta (Nakatani et al., 2010).

El reciclaje en circuito abierto, también llamado reciclaje mecánico, se refiere a un proceso en el que un producto se compone de un tipo de material y se transforma mediante técnicas de reciclaje en otro producto (Coelho et al., 2011). En el caso de las botellas de PET, éstas se transforman en fibras de poliéster, láminas, cintas de sujeción, cerdas de escobas, cepillos, etc. Este reciclaje convierte las escamas de PET en una diversidad de productos mediante extrusión por fusión y existen dos formas de producir fibras recicladas: una es extruir directamente las escamas de PET en fibras y la otra es transformar las escamas de PET en gránulos de PET y luego extruirlas en forma de fibras (Shen et al., 2010).

El reciclaje en circuito cerrado, también llamado reciclaje químico, se refiere a un proceso en el que los desechos o subproductos de un producto se utilizan para fabricar el mismo producto una vez más. Teóricamente, el reciclaje en circuito cerrado podría usarse en la creación de nuevos productos sin tener que usar materiales vírgenes (Coelho et al., 2011).

El reciclaje comprende la reintroducción de material usado y extiende la vida útil del material, ya que una vez que se consume y se desecha, se puede procesar en nueva materia prima (Coelho et al., 2011). El reciclaje de PET se ha convertido en una industria bien fundada en todo el mundo, dado que la mayor parte de la basura PET está compuesta por botellas de PET (Izabal-Noguera, 2013).

2.6.1. Métodos físicos

Los métodos mecánicos son los más simples, los costos también son bajos y por lo tanto el valor del producto también (Mata-Espinosa, 2009). En Europa el PET reciclado se utiliza para rellenar sacos para dormir y juguetes suaves,

representando un uso del 75 % del PET recuperado, también se utiliza el PET reciclado para fabricar chamarras, bufandas, partes automotrices y muebles, se utiliza diferente porcentaje de PET en la fabricación de cada uno de los productos (Krzan et al., 2006). El uso más reciente del reciclado de PET, es como material de reemplazo en mezclas de asfalto, para su uso en la construcción de carreteras, de esta forma se reduce el efecto ambiental que causan los desechos de PET (Hassani et al., 2005).

2.6.2. Método químico

Los métodos químicos son más complicados y costosos por su proceso de recolección, porque los plásticos son convertidos a sus monómeros básicos, los cuales pueden ser reutilizados nuevamente; los métodos más comunes son glicólisis y metanólisis. (Krzan et al., 2006).

2.6.3. Método termomecánico

Se basan en el refundido de desechos termoplásticos para obtener una regranulación, así, el regranulado obtenido puede utilizarse como producto principal en la producción de fibra o la industria del plástico, además el método termomecánico es el más común para reciclar desechos de botellas fabricadas con PET y consta principalmente de un proceso de re-extrusión con varios pasos, agrupados en: cortado, compactación, secado y expulsión (Mata-Espinosa, 2009).

2.6.4. Alternativa de uso del PET

El consumo de productos embotellados ha ocasionado muchos problemas de contaminación, día a día hay un aumento de residuos sólidos (plástico) en México y en todo el mundo incrementando su acumulación en vertederos a cielo abierto y rellenos sanitarios. En la sociedad actual, existe una tendencia a la generación de desechos plásticos a partir del consumo de botellas de refrescos, botellas de agua, envases de alimentos que están hechos en su mayoría de PET. Afortunadamente existen varios métodos para desechar estos materiales, como

el relleno del terreno, la incineración de PET o el reciclaje; pero el mayor inconveniente es su alto volumen de producción (Williams, 1998; Girija et al., 2005). A través de la incineración se puede aprovechar el valor calórico de estos materiales, pero su combustión produce gases que podrían ser peligrosos para la salud humana. Otro problema que enfrentan estos desechos es su lenta degradación. Si bien estas alternativas son factibles, el reciclaje aparece como la mejor solución para eliminar los desechos de PET, debido a sus ventajas económicas y ecológicas. Por lo tanto, la reutilización de los residuos de PET parece ser una solución óptima; reutilizando el material para producir compuestos con otros materiales, por ejemplo concreto y mortero a base de cemento en el área de construcción e ingeniería.

2.6.5. Estudios sobre el uso del PET en materiales a base de cemento

Albano et al. (2009) estudiaron el comportamiento mecánico del concreto usando PET reciclado, variando la relación agua cemento de 0.50 y 0.60 con contenido de PET en 10 % y 20 % de sustitución respecto al volumen, se usaron partículas de PET con tamaños de 0.26 cm y 1.14 cm, cemento portland, agregado fino (arena de río), y agregado grueso (piedra triturada), todas en diferentes proporciones con el aumento de PET en cada muestra, también elaboraron especímenes de concreto, losas y cilindros con dimensiones de 200 mm x 200 mm x 50 mm y 150 mm x 300 mm que posteriormente fueron curadas en un tanque de agua a 25 °C durante 7, 14, 28 y 60 días después del desmolde, mismas que sirvieron para evaluar las propiedades del concreto fresco y endurecido. Además se estudiaron las reacciones de la degradación térmica del PET en el concreto, ya que las mezclas fueron expuestas a temperaturas de 200 °C, 400 °C y 600 °C. Los resultados obtenidos indicaron que el concreto combinado con PET a medida que aumenta el volumen de sustitución y tamaño de partículas de PET, hubo una disminución en la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad. Esto debido a la inclusión del PET que implicó defectos en las estructuras interna del concreto. Utilizando una sustitución del 10 % y comparado a la de 20 %, presentó mejores propiedades

mecánicas con menos cavidades en los especímenes. Respecto a las pruebas no destructivas, el porcentaje de absorción de agua en las mezclas de concreto-PET aumentan con la relación agua cemento y el contenido con el tamaño de las partículas PET, ya que aumenta la porosidad debido a la menor trabajabilidad encontrada, cabe mencionar que la velocidad de pulso ultrasónico tuvo una disminución a mayor porosidad ya que esta acelera la propagación de las ondas ultrasónicas.

Por otro lado, Akçaözöglü et al. (2010) investigaron el efecto que tiene la utilización de residuos triturados de botellas de tereftalato de polietileno (PET) en mortero como agregado liviano. La investigación se llevó a cabo en dos grupos de mortero: una hecha únicamente con agregados de PET y la otra con agregados de PET y arena juntos. Además, la escoria de un alto horno también se utilizó como reemplazo del cemento en masa con una relación del 50% para reducir la cantidad de cemento utilizado y proporcionar ahorros. También se utilizó aglutinante de agua (w / b) y PET-aglutinante (PET / b), las proporciones utilizadas en las mezclas fueron de 0,45 y 0,50, respectivamente. El tamaño de los gránulos de PET utilizados en la preparación de mezclas de mortero se encontraba entre 0 y 4 mm. Los resultados del estudio de laboratorio y las pruebas realizadas demostraron que el mortero que contiene solo agregado de PET, mortero que contiene PET y agregado de arena, y morteros modificados con escoria como reemplazo de cemento pueden ser usados en la categoría estructural de concreto liviano en términos de peso unitario y propiedades de resistencia. Por lo tanto, se concluyó que existe un potencial para el uso de gránulos de PET triturados como agregado en la producción de concreto estructural liviano. El uso de gránulos de PET triturados de desecho tiene bajo peso, lo cual redujo el peso unitario del concreto, lo que da como resultado una reducción en el peso muerto de un elemento estructural de un edificio.

Además, también se concluyó que el uso de desechos industriales como gránulos de PET y escoria de un alto horno en concreto, proporciona algunas ventajas, es decir, la reducción en el uso de los recursos naturales, la eliminación de desechos, prevención de la contaminación ambiental y ahorro de energía.

Hannawi et al. (2010) estudiaron los agregados plásticos no biodegradables hechos de policarbonato (PC) y tereftalato de polietileno (PET), dichos residuos se utilizaron como reemplazo parcial de los agregados naturales del mortero en diferentes fracciones volumétricas de arena: 3 %, 10 %, 20 % y 50 % por el mismo volumen de plástico. Investigaron las propiedades físicas y mecánicas de los especímenes dando como resultado la viabilidad de reutilización de residuos PC y PET como sustitutos de arena en materiales cementosos. Hubo disminución de la resistencia a la compresión, una reducción del peso específico del cemento, los factores de resistencia a la flexión aumentan significativamente al aumentar la fracción de volumen del PET y agregados PC, por lo tanto, la adición de estos materiales en cemento lo hacen buen absorbente de energía que ayudarán a estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos o de impacto.

Saikia & De Brito (2014) evaluaron los efectos del tamaño y la forma del tereftalato de polietileno (PET) como agregado ligero y sustituto de agregado natural en mezclas de concreto con proporciones volumétricas de 5 %, 10 % y 15 % con formas y tamaños diferentes de partículas. Los resultados indican que la caída de concreto fresco aumenta ligeramente con la incorporación de PET. La resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad disminuyen con la incorporación de PET, esto es debido a la forma, tamaño y textura que tienen.

Los resultados obtenidos en las investigaciones anteriores indicaron que el PET puede ser utilizado como sustituto de agregado natural para ciertas características, es decir, los especímenes absorbieron gran cantidad de agua, esto ocurrió por los poros de tamaño mayor que se tuvieron gracias al PET triturado inmerso dentro del material, también sirvió como aislante térmico y se

obtuvo una estructura liviana de los especímenes de acuerdo a la disminución del peso. Los especímenes tuvieron disminución de propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad, esto ocurrió por el tamaño de PET que se agregaron en las respectivas mezclas, sin embargo no se ha hecho una Microscopía Electrónica de Barrido para ver la estructura interna del espécimen y observar la relación cemento-PET, al igual no se ha estudiado las propiedades de la mezcla en estado fresco como son: reología y sus características de revenimiento de materiales, viscosidad y curvas de flujo. El presente trabajo pretende realizar diferentes pruebas para determinar las propiedades reológicas de las mezclas de mortero, propiedades físicas y mecánicas de los especímenes, con tamaño de partículas de PET menores a los de literatura para definir las futuras aplicaciones del PET como buen sustituto del agregado natural.

2.7. LITERATURA CITADA

- Akçaözoğlu, S., Duran-Atış, C., & Akçaözoğlu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*. 30(2), 285–290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., & Gutiérrez, A. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*. 29(10), 2707–2716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>
- Arena, U., Mastellone, M. L., & Perugini, F. (2003). Life cycle assessment of a plastic packaging recycling system. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 8(2), 92–98. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02978432>
- Armijo De Vega, C. (2006). Waste management in Mexico : key variables in play the case of the Autonomous University of Baja California. (Tesis de Doctorado, Erasmus University Rotterdam , Rotterdam, Holanda). Consultada en: https://repub.eur.nl/pub/8039/Whole_document.pdf
- Chipech, A. R., Barrios-Flores, A. S., Montalvo-Dzul, N. M., & López-Cerna, D. M. (2009). Propuesta del reciclaje del plástico PET (Tereftalato de polietileno) en Puerto Morelos, Quintana Roo. (Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Culhuacán). Consultada en: <https://docplayer.es/storage/65/54297169/1549785456/9p8uHPB0g2c79si2YKyQQA/54297169.pdf>
- Coelho, T. M., Castro, R., & Gobbo Jr, J. A. (2011). PET containers in Brazil : Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. *Resources, Conservation & Recycling*. 55(3), 291–299. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.010>
- Cristán-Frías, A., Ize, I., & Gavilán, A. (2003). La situación de los envases de plástico en México. *Gaceta Ecológica*. 69, 67–82. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906905.pdf>
- Delgadillo, L. (2008). Reciclados Plásticos. (Tesis de Licenciatura, Universidad Regiomontana, Monterrey, N.L. México). Consultada en: <http://www.ur.mx/LinkClick.aspx?fileticket=SG8mzttLMI8=&tabid=2636&mid=7302>
- Foolmaun, R. K., & Ramjeawon, T. (2013). Life cycle sustainability assessments (LCSA) of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *Environment, Development and Sustainability*. 15(3), 783–806. doi: <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9406-0>
- Gasnier, A., & Derbez-Portales, L. E. (2008). PETSTAR : Adding value to the chain of recycling and improving the scavengers working conditions. Large National Company. New York, USA. Recuperado de: http://growinginclusivemarkets.org/media/cases/Mexico_Petstar_2008.pdf

- Girija, B. G., Sailaja, R. R. N., & Madras, G. (2005). Thermal degradation and mechanical properties of PET blends. *Polymer Degradation and Stability*. 90(1), 147–153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.03.003>
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*. 30(11), 2312–2320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>
- 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(4), 322–327. doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X05056739>
- Izábal-Noguera, D. (2013). Life cycle assessment of PET bottle recycling : a case study for Mexico. (Tesis de Maestría, Vienna School of International Studies, Viena, Austria). Consultada en: <https://pdfs.semanticscholar.org/3b8b/62ad6c13f5f56d3e432c33888251213a4afd.pdf>
- Kint, D., & Muñoz-Guerra, S. (1999). A review on the potential biodegradability of poly (ethylene terephthalate). *Polymer International*. 48(5), 346–352. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0126\(199905\)48:5%3C346::AID-PI156%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0126(199905)48:5%3C346::AID-PI156%3E3.0.CO;2-N)
- Krzan, A., Hemjinda, S., Miertus, S., Corti, A., & Chiellini, E. (2006). Standardization and certification in the area of environmentally degradable plastics. *Polymer Degradation and Stability*. 91(12), 2819–2833. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.04.034>
- Mata-Espinosa, M. Á. (2009). Evaluación de envases de polietilentereftalato como fuente de fibra en dietas para ovinos. (Tesis de Doctorado, Colegio de Postgraduados Campus Montecillos, Texcoco, Estado de México).
- Muñoz, L. P. (2012). Estudio del uso del polietileno tereftalato (PET) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.). Consultada en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/2514/1/TESIS.pdf>
- Nakatani, J., Fujii, M., Moriguchi, Y., & Hirao, M. (2010). Life-cycle assessment of domestic and transboundary recycling of post-consumer PET bottles. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 15(6), 590–597. doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0189-y>
- SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. México, D.F. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf

- Saikia, N., & De Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*. 52, 236–244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Open-loop recycling : A LCA case study of PET bottle to fibre recycling. *Resources, Conservation & Recycling*. 55(1), 34–52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.014>
- Silva, D. A., Betioli, A. M., Gleize, P. J. P., Roman, H. R., Gómez, L. A., & Ribeiro, J. L. D. (2005). Degradation of recycled PET fibers in portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 35(9), 1741–1746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.040>
- Sinha, V., Patel, M. R., & Patel, J. V. (2010). PET waste management by chemical recycling : a review. *Journal of Polymers and the Environment*. 18(1), 8–25. doi: <https://doi.org/10.1007/s10924-008-0106-7>
- Williams, P. T. (1998). *Waste treatment and disposal*. J. Wiley & L. Sons. West Sussex, England. Recuperado de: http://www.znrfak.ni.ac.rs/serbian/010-studije/oas-3-2/predmeti/III_godina/316-komunalni_sistemi_i_zivotna_sredina/seminarski_radovi/2014/S105 - S150.pdf

CAPÍTULO 3. ARTÍCULO CIENTÍFICO

CARACTERIZACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO PORTLAND CONTENIENDO AGREGADO FINO DE PET (Tereftalato de polietileno)

Marcelino Benito Vásquez-López^{1, 2}, P. F. de J. Cano-Barrita^{1,*},
Frank Manuel León-Martínez¹, Martín Hidalgo-Reyes²

¹ Instituto Politécnico Nacional-CIIDIR Unidad Oaxaca, Hornos No. 1003, Colonia Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México, C.P. 71230

² Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, México, C.P. 56230

*Autor de correspondencia

3.1. RESUMEN

Los envases desechados de tereftalato de polietileno (PET) generalmente se disponen en basureros a cielo abierto, generando problemas de contaminación. El objetivo de este trabajo fue reutilizar este material en mezclas de mortero de cemento Portland conteniendo partículas de PET como reemplazo parcial de parte del agregado fino natural. La relación agua/cemento en peso utilizada en las mezclas fue de 0.55 y las partículas de PET se obtuvieron de envases PET triturado hasta obtener tamaños menores a 4.75 mm. Se prepararon morteros utilizando partículas de PET en proporciones volumétricas de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de sustitución de arena de río. Se elaboraron especímenes cúbicos (5 cm), cilíndricos (5 cm de diámetro x 10 cm de altura) y prismáticos cuadrangulares (4 cm x 4 cm x 16 cm de altura). Se evaluaron sus propiedades reológicas de los morteros en estado fresco, así como las propiedades mecánicas y de durabilidad en estado endurecido. Los resultados indican que las mezclas mantienen su trabajabilidad a proporciones < 15 % de sustitución de PET con respecto al espécimen control, ya que poseen un esfuerzo de fluencia e índice de consistencia similares. Con relación a las propiedades mecánicas, a medida que se incrementó la cantidad de PET se observó una disminución considerable de la velocidad de pulso ultrasónico, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión. Sin embargo, la absorción de agua aumentó en los morteros conteniendo PET. Finalmente, el análisis de microscopía electrónica de barrido demostró que existe una buena unión del PET con la mezcla de mortero debido a la rugosidad del agregado, producto del proceso de triturado del PET.

Palabras clave: Mortero, cemento Portland, PET, sustitución, propiedades.

3.2. INTRODUCCIÓN

Los plásticos tienen beneficios sustanciales en términos de su bajo peso, durabilidad y menor costo en comparación con muchos otros tipos de material (Andrady & Neal, 2009; Thompson et al., 2009). Con ello, la producción de polímeros en todo el mundo se estima en 260 millones de toneladas métricas por año para el 2007 (PlasticsEurope, 2008). A causa de toda esta producción y disposición final inadecuada, la contaminación del medio ambiente y los problemas asociados a la vida silvestre son visibles especialmente en la acumulación de plástico en el hábitat terrestre y marino (Gregory, 2009). De esta contaminación, aproximadamente el 50 % de los plásticos son usados y desechados después de haber sido utilizados una sola vez, tales como envases, acolchados agrícolas, artículos de consumo desechable, tubos, revestimientos de cable, materiales estructurales, dispositivos electrónicos, mobiliario y vehículos (PlasticsEurope, 2006). Ahora estamos inmersos en un grave problema ambiental con los plásticos PET, ya que le toma aproximadamente entre 100 a 1000 años para degradarse (Silva et al., 2005). La reducción de este contaminante es cualquier medida que reduzca el volumen de desechos plásticos producidos, siendo el reciclaje una alternativa que permita elaborar nuevos productos (Abdel-Bary et al., 1998). El reciclaje del PET se realiza en cuatro fases, las cuales son: recolección, separación, transformación-fabricación y comercialización (Shent et al., 1999).

Otra forma de combatir la contaminación por PET es usarlos en materiales para construcción, por ejemplo: Albano et al. (2009) investigaron el comportamiento mecánico de morteros conteniendo partículas de desecho de PET, en los cuales realizaron sustituciones volumétricas de agregado natural por PET del 10 % y 20 %, con tamaño promedio de las partículas de PET de 2.6 mm y 11.4 mm. Los resultados mostraron una disminución en la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad.

Por su parte, Akçaözoğlu et al. (2010) sustituyeron agregado natural por partículas de PET de tamaño menor de 4 mm en un 50 % y 100 % respecto al peso. Los resultados mostraron que los morteros obtenidos se pueden considerar en la categoría de concreto estructural ligero, en términos de peso unitario y propiedades de resistencia mecánica. Además, la reducción de peso muerto de un edificio reduciría el riesgo sísmico, debido a que a una menor masa de una estructura, menor el efecto de los sismos.

Por su parte, Rahmani et al. (2013) evaluaron los efectos de la sustitución de arena por partículas de PET en 5 %, 10 % y 15 % con respecto al volumen total, en especímenes cúbicos y cilíndricos de concreto con relaciones agua/cemento de 0.42 y 0.54. Ellos observaron que a mayor cantidad de PET menor fue su trabajabilidad, esto a causa de la fricción entre partículas de PET, así mismo menor fue la densidad del espécimen. También el módulo de elasticidad, la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión disminuyeron con el incremento de PET. La resistencia a la flexión mostró un incremento con un 5 % de PET, disminuyendo para porcentajes mayores al 10 %.

De la misma manera Hannawi et al. (2010) utilizaron policarbonato reciclado (PC) y PET en concreto, con reemplazo parcial de agregados naturales en fracciones de volumen de 3 %, 10 %, 20 % y 50 %. El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) mostró una cohesión débil entre los agregados plásticos y la matriz. También observaron reducción del módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión a medida que aumentó la cantidad de PET. Comparado con el PET, el PC tuvo mejores resultados en todas las pruebas con un 5 % de incremento, debido al tamaño menor de partículas que se utilizó de 5 mm en promedio.

Marzouk et al. (2007) utilizaron partículas de desecho de PET con un tamaño máximo de 5 mm como agregados en el concreto. Los resultados indicaron que cuando la cantidad de PET aumenta de 0 a 5 % en volumen, la resistencia de las muestras disminuye un 8 % respecto al control.

Si la cantidad de agregados de PET reemplazados excede el 50 %, las propiedades mecánicas de las muestras disminuyen significativamente en un 40 %.

Con base en la información anteriormente descrita, el objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia que tiene el PET al sustituir el agregado fino natural en mezclas de mortero, con diferentes porcentajes volumétricos usando partículas de tamaño menores de 4.75 mm. Tomando en consideración propiedades físicas, reológicas, mecánicas y de durabilidad de los morteros, los cuales tendrían aplicaciones futuras en materiales para construcción.

La reutilización de PET en un material de construcción tiene como ventajas: la disminución de la disposición de este material en el medio ambiente, además de incentivar la recolección de envases, generando a su vez fuentes de empleo, así como la inmovilización del PET en una matriz cementante. La elaboración de elementos constructivos está en función de las propiedades observadas por estas combinaciones, que en principio podrían servir de elementos aligerados con baja resistencia. Además, la reología de los morteros con PET no ha sido estudiada, por lo que es importante conocer su comportamiento durante el flujo, que finalmente impactará en la trabajabilidad del material.

3.3. MATERIALES Y MÉTODO

3.3.1. Materiales

Los materiales utilizados fueron cemento Portland ordinario 30RS (Holcim, Apasco), cuya composición química se muestra en el cuadro 1.

El agregado fino natural fue arena de río, con un módulo de finura de 2.6, absorción de 2.3 % y una densidad de 2.6 g/cm³. El PET utilizado fue de color cristal transparente, fue adquirido de un proveedor nacional en forma de hojuelas de tamaño máximo 2 cm, con una densidad de 1.3 g/cm³ y una absorción de ~0 %.

Cuadro 1. Composición química del cemento Portland utilizado.

Óxido	% en peso
SiO ₂	21.07
Al ₂ O ₃	3.69
Fe ₂ O ₃	4.5
CaO	61.93
TiO ₂	0.97
P ₂ O ₅	0.1
MgO	1.83
MnO	0.08
Na ₂ O	0.09
K ₂ O	0.3
PPI a 1000 °C	4.38

La parte experimental del trabajo de investigación fue realizada por partes, las cuales fueron: adquisición de materiales, preparación del PET, elaboración de muestras y realización de las pruebas. La Figura 1 muestra un diagrama general del procedimiento experimental realizado.

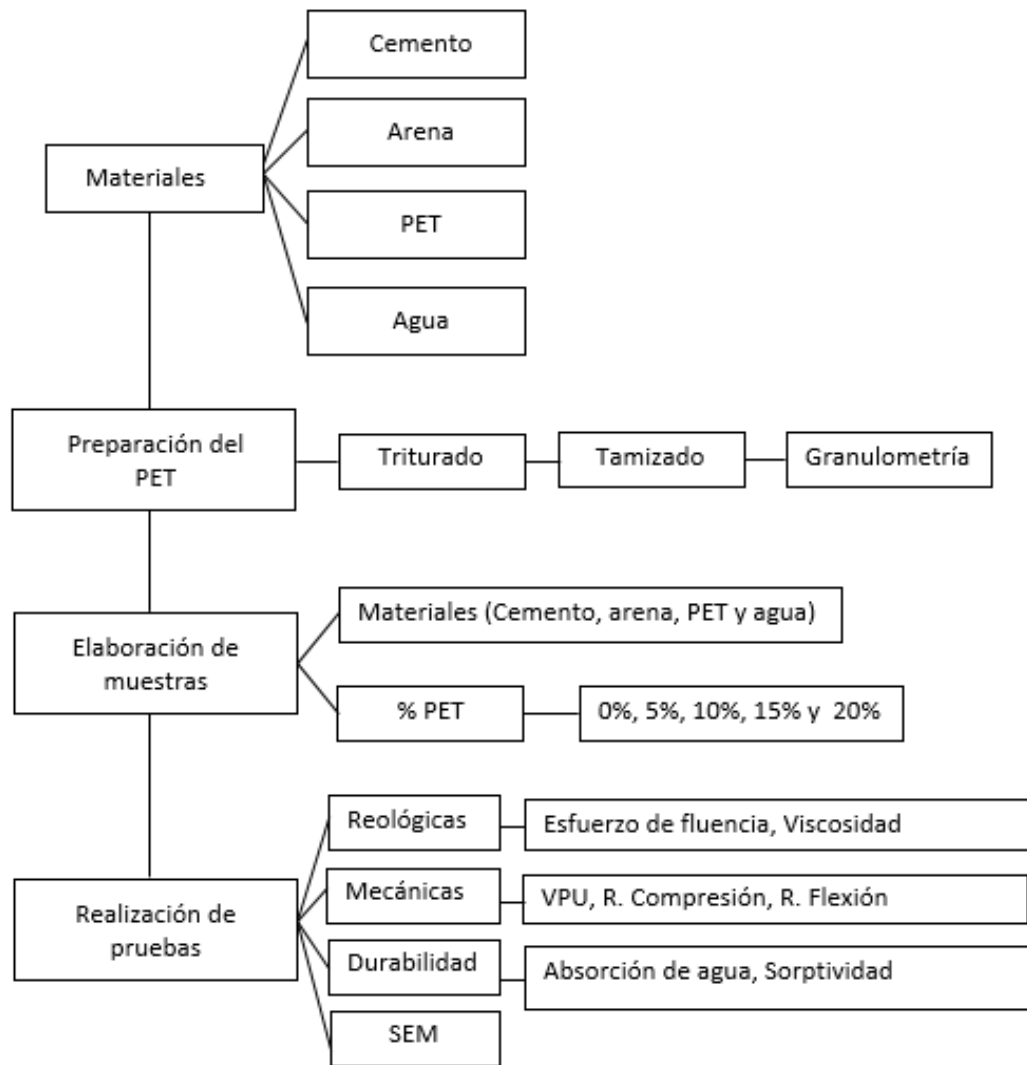


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento general para la caracterización de los morteros.

3.3.2. Método

Se utilizó una licuadora industrial INTERNATIONAL LI-12 para reducir el tamaño inicial de las partículas de PET > 10 mm a un tamaño menor de 4.75 mm (Figura 2).

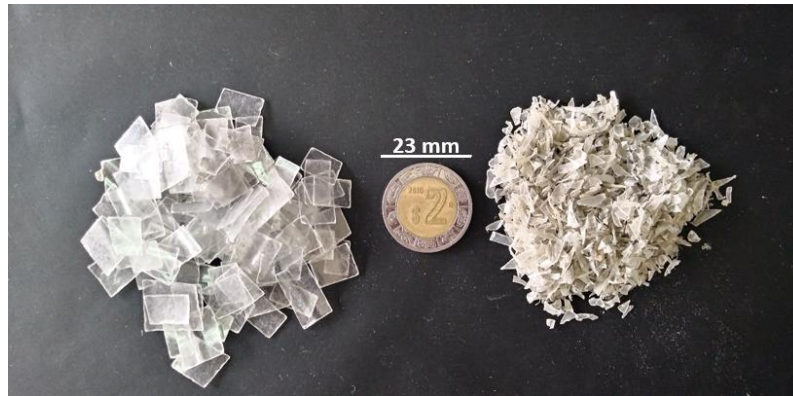


Figura 2. Partículas de PET. Antes y después del proceso de triturado utilizando una licuadora industrial.

3.3.3. Granulometría de los materiales

Se determinaron las curvas granulométricas del agregado fino y del PET (Figura 3) basados en la Norma ASTM C33 (2003). Se observa que la arena tuvo una mejor distribución granulométrica, ya que la curva se ubica dentro de los límites de la norma ASTM C33, comparada con las partículas de PET, las cuales contienen un bajo porcentaje de partículas finas.

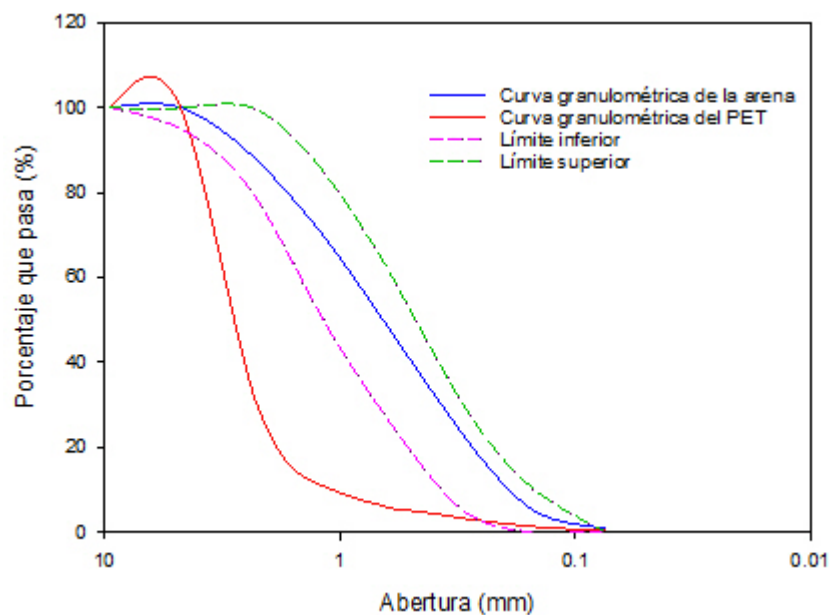


Figura 3. Curva granulométrica del agregado fino natural y del PET triturado.

3.3.4. Preparación de morteros y elaboración de especímenes

Las proporciones utilizadas para la elaboración de los morteros se indican en el cuadro 2, considerando un volumen total de mortero a preparar de 7.7 L. El diseño de las mezclas de mortero se basó en el trabajo de Hannawi et al. (2010). El mortero control fue denominado M0, y los morteros con 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de PET de sustitución en volumen reemplazando agregado fino natural son denominados como M1, M2, M3 y M4, respectivamente.

La elaboración de los morteros se realizó de acuerdo con la norma ASTM C305 (2015). Se utilizó una mezcladora ECONOMIRUGO 4561 con movimiento planetario. Se agregó el cemento y la arena y se mezcló en seco durante 2 minutos para homogenizar, después se añadió el agua de mezclado. El material adherido a las paredes del contenedor se removió para que se mezclara con el resto del mortero. El tiempo aproximado de cada mezcla desde el inicio hasta que ya se retiró del contenedor fue de 5 minutos.

Cuadro 2. Proporciones en peso de materiales utilizados para elaborar 7.7 L de cada mezcla de mortero.

Mezcla	Cemento (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	PET (kg)	Total (kg)
M0	3.94	2.23	11.55	0	17.72
M1	3.94	2.22	10.97	0.289	17.41
M2	3.94	2.21	10.40	0.578	17.12
M3	3.94	2.19	9.82	0.866	16.81
M4	3.94	2.18	9.24	1.155	16.51

Con los materiales mezclados se colaron especímenes de distintas formas y tamaños. La cantidad y tipo de especímenes elaborados para las distintas pruebas realizadas se muestran en el cuadro 3. Los moldes se llenaron en dos capas y se vibraron durante 5 segundos (Figura 4a), después se enrasaron en la parte superior (Figura 4b).

Cuadro 3. Cantidad y tipo de especímenes de mortero elaborados.

Muestras	% PET	Cubos (5 cm por lado)	Cilindros (5 cm ϕ y 10 cm de altura)	Prismas (4 cm x 4 cm x 16 cm)
M0	0	12	6	6
M1	5	12	6	6
M2	10	12	6	6
M3	15	12	6	6
M4	20	12	6	6



a)

b)

Figura 4. Elaboración de especímenes de mortero, a) Vibrado de moldes en dos capas de llenado, b) Llenado completo y enrasado de los moldes.

Una vez terminado el llenado de los moldes, se cubrieron con bolsas de plástico para evitar la pérdida de agua por evaporación. Los especímenes se desmoldaron 24 horas después y se curaron en húmedo dentro de una solución de hidróxido de calcio saturada (2 g/L) hasta la edad de prueba.

Los cubos se utilizaron para las pruebas de resistencia a la compresión a 26 y 56 días de edad. Se elaboraron tres cubos por cada porcentaje de PET y para las dos edades de prueba, obteniendo un total de 30 especímenes cúbicos. Para la prueba de absorción de agua a 56 días de edad también se utilizaron cubos por triplicado por cada nivel de porcentaje de PET, con un total de 15 especímenes. No fue posible utilizar los cilindros para las pruebas de módulo de elasticidad a 39 y 56 días debido a la falta de anillos para medir la deformación de manera precisa. Finalmente se utilizaron los especímenes prismáticos, por triplicado, para evaluar resistencia a la flexión a 39 y 56 días, con un total de 30 especímenes.

3.3.5. Caracterización reológica de las mezclas

Se preparó un volumen de 0.55 L de mortero por cada mezcla, ya que el contenedor del reómetro utilizado requiere 0.50 L de muestra para utilizar el sistema de medición de esferas. Se utilizó un reómetro Physica MCR 301 (Anton Paar, Gaz, Austria) con una geometría de esfera de 8 mm de diámetro para

obtener las curvas de flujo a 25 °C. Los datos obtenidos se ajustaron al modelo de flujo de Bingham (Yahia & Khayat, 2001), determinándose los parámetros reológicos de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica de las mezclas de mortero.

El modelo de flujo de Bingham se expresa por la ecuación 1:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \quad 1)$$

donde:

τ = esfuerzo cortante (Pa)

τ_0 = esfuerzo de fluencia (Pa)

μ_p = viscosidad plástica (cP)

γ = velocidad de corte (s⁻¹)

3.3.6. Caracterización de los morteros en estado endurecido

3.3.7. Velocidad de pulso ultrasónico

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se realizó de acuerdo con la norma ASTM C597 (2008). Consistió en medir el tiempo que demora un pulso ultrasónico en recorrer la distancia entre un transductor emisor Tx y un transductor receptor Rx, ambos acoplados a la muestra en estudio. Conociendo la distancia entre los transductores y el tiempo que toma al pulso ultrasónico recorrerla, se calculó la velocidad de pulso ultrasónico.

Se utilizó un equipo PUNDIT 58-E4800 (CONTROLS, Milán, Italia), con transductores a una frecuencia de 54 kHz (Figura 5). Como acoplador se utilizó vaselina en ambas caras del espécimen donde se colocaron los transductores. Se registró el tiempo de tránsito en microsegundos. El espesor de la muestra (distancia de separación entre los transductores) se midió con un vernier en tres puntos y se promedió. Las mediciones en los mismos especímenes se realizaron a edades de 1, 3, 7, 14, 21, 26 y 56 días.



Figura 5. Medición de velocidad de pulso ultrasónico colocando los transductores en dos caras opuestas del espécimen.

3.3.8. Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó de acuerdo con la norma ASTM C109 (2010). Consistió en colocar el espécimen cúbico de 5 cm x 5 cm en la máquina de compresión ELVEC E-654 con capacidad de 120 toneladas (Elvec S.A. de C.V., Ciudad de México, México). La aplicación de la carga se realizó manualmente y se tomó la lectura cuando ocurrió la falla del espécimen (Figura 6), lo cual se observó cuando la aguja indicadora del manómetro disminuía drásticamente el valor de carga.

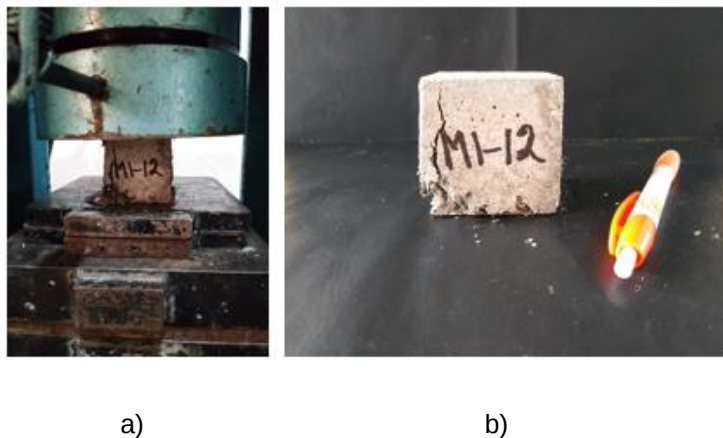


Figura 6. Ensayo de resistencia a la compresión a) Resistencia a la compresión en un espécimen cúbico de mortero, b) Especimen fracturado después de la falla.

El ensayo se realizó para todos los especímenes de mortero a 26 y 56 días de edad, midiendo antes de la prueba el peso y las dimensiones de cada cubo para determinar su densidad y el área sujeta a compresión ($\approx 2500 \text{ mm}^2$). La resistencia a la compresión se obtuvo dividiendo la carga a la falla entre el área del espécimen transversal a la carga aplicada.

3.3.9. Módulo de elasticidad

Debido a problemas experimentales para determinar el módulo de elasticidad en los cilindros de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, el módulo de elasticidad se estimó con base en dos métodos. El primero se basó en las NTCDF (2004) y el segundo a partir de la velocidad de pulso ultrasónico de acuerdo con la norma ASTM C597 (2008).

El módulo de elasticidad basado en la NTCDF se calculó de acuerdo con la ecuación 2:

$$E_c = 14000 f_c^{\frac{1}{2}} \quad 2)$$

donde:

E_c = módulo de elasticidad estático (kg/cm^2)

f_c = resistencia a la compresión (kg/cm^2)

La determinación del módulo de elasticidad dinámico a partir de la velocidad de pulso ultrasónico, se realizó con la ecuación 3:

$$E = \frac{\rho(1+\mu)(1-2\mu)V^2}{(1-\mu)} \quad 3)$$

donde:

E = módulo de elasticidad dinámico (Pa)

ρ = densidad (kg/m^3)

V = velocidad de pulso ultrasónico (m/s)

μ = relación de Poisson ≈ 0.18

Para este último método se determinó la densidad de los morteros, la cual fue de 2.3 g/cm^3 , 2.2 g/cm^3 , 2.1 g/cm^3 , 2.0 g/cm^3 y 1.9 g/cm^3 para las muestras M0, M1, M2, M3 y M4, respectivamente.

3.3.10. Resistencia a la flexión

El ensayo de resistencia a la flexión se realizó de acuerdo con la norma ASTM C293 (2002), el cual consistió en colocar el espécimen prismático cuadrangular de $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ en una máquina GEOTEST Modelo S5830, con un punto de carga a la mitad de la longitud y dos apoyos en la parte inferior (Figura 7). Se colocó un anillo de carga con capacidad máxima de 2658 kg para registrar su deformación y finalmente con la curva de calibración del anillo, conocer la carga aplicada al espécimen.

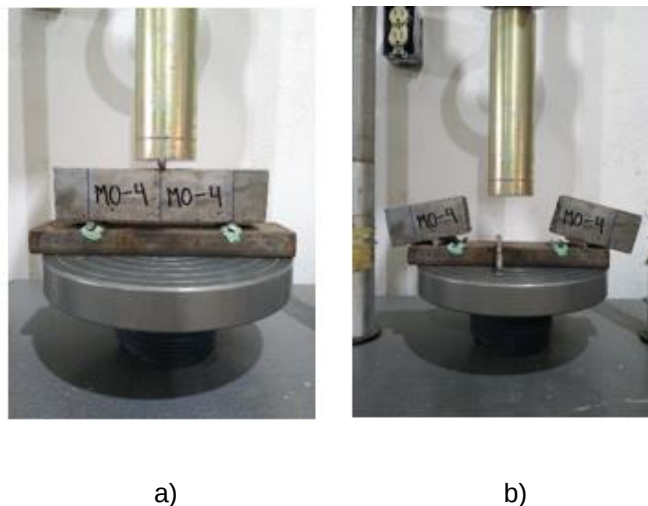


Figura 7. Resistencia a la flexión, a) Carga de flexión ejercida sobre el espécimen prismático con tres puntos de carga: central superior y dos en los extremos inferiores, b) Especimen fracturado después de la carga aplicada.

La prueba se realizó en las muestras M0-M4 a 39 y 56 días de edad, se tomó las distancias entre apoyos, longitud, ancho, profundidad y peso de cada espécimen, así como también las deformaciones del anillo de carga, las cuales fueron convertidas después a valores de carga aplicada sobre el espécimen.

3.3.11. Absorción capilar

El ensayo de absorción capilar se realizó de acuerdo con la norma ASTM C1585 (2013). Primero se retiraron los especímenes cúbicos del curado en húmedo a los 56 días y se secaron durante 24 horas en un horno a temperatura de 80 °C. Esta temperatura se eligió para reducir el micro-agrietamiento producido cuando se realiza el secado a 105 °C. Una vez que los especímenes se enfriaron, se les aplicó en cuatro caras resina epoxi 105 (Gougeon Brothers, Inc., Bay City, Michigan, USA), con catalizador 206 (endurecedor lento) en una proporción de 2:1, dejando libres dos caras opuestas. Se curó la resina durante un día a temperatura ambiente de laboratorio. Finalmente se colocó en un recipiente todos los especímenes y se agregó agua destilada, de manera que la base de los especímenes estuviera sumergida de 2 a 3 mm en el agua (Figura 8).

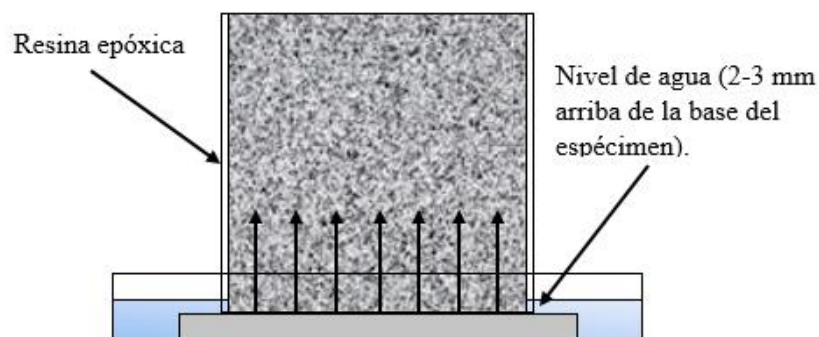


Figura 8. Absorción capilar de agua en los especímenes de mortero.

Se midió la ganancia de masa de los especímenes a 5, 10, 15, 30, 60, 240, 480, 1440 y 2880 minutos. En cada medición se retiraba el espécimen del contacto con agua, se eliminaba el exceso de agua con un paño húmedo, se pesaba en una báscula digital con precisión de 0.01 g e inmediatamente se regresaba el espécimen al contacto con agua para continuar con la absorción capilar. Con esta información se determinó la sorptividad (Hall, 1989) de los morteros, la cual es la capacidad de un material poroso de absorber un fluido a través de capilaridad y está expresada por la ecuación 4. La sorptividad se considera un indicativo de la durabilidad del concreto (Basheer et al., 2001; Hall, 1989).

$$i = St^{\frac{1}{2}} + A \quad 4)$$

donde:

i = volumen de agua absorbida por unidad de sección transversal, (mm^3/mm^2)

S = sorptividad, ($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$)

t = tiempo, (min)

A = intersección de la recta con el eje de las ordenadas, (mm^3/mm^2)

3.3.12. Microscopía electrónica de barrido

Para realizar esta caracterización se utilizaron los especímenes fracturados en pruebas de flexión, se recortó 1 cm en la zona fracturada solamente de la muestra M2 con 10 % de PET. También se analizó la superficie de partículas de PET sin triturar. Se obtuvieron imágenes con un microscopio electrónico de barrido JSM-IT300LV (JEOL Ltd. Akishima, Japón) con diferentes resoluciones. El objetivo fue observar la interface PET-pasta de cemento, así como la textura de la superficie y la forma de las partículas de PET.

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Reología de las mezclas de mortero en estado fresco

La Figura 9 muestra las curvas de flujo de los morteros, en las cuales se observa que, a una misma velocidad de corte, los morteros con mayor porcentaje de PET, presentaron un mayor esfuerzo cortante, lo cual implica una menor trabajabilidad del material. También se observa que el esfuerzo cortante se incrementa conforme aumenta la concentración de PET en los morteros. Por ejemplo: a la velocidad de 10 s^{-1} se observa un valor de esfuerzo de 80 Pa y 170 Pa para M0 y M4 respectivamente, es decir se duplicó el esfuerzo cortante necesario en M4 con respecto a M0. Sin embargo, las diferencias entre las muestras de M1, M2 y M3 no son notables entre sí a esa misma velocidad de corte, pero si con respecto a la muestra control.

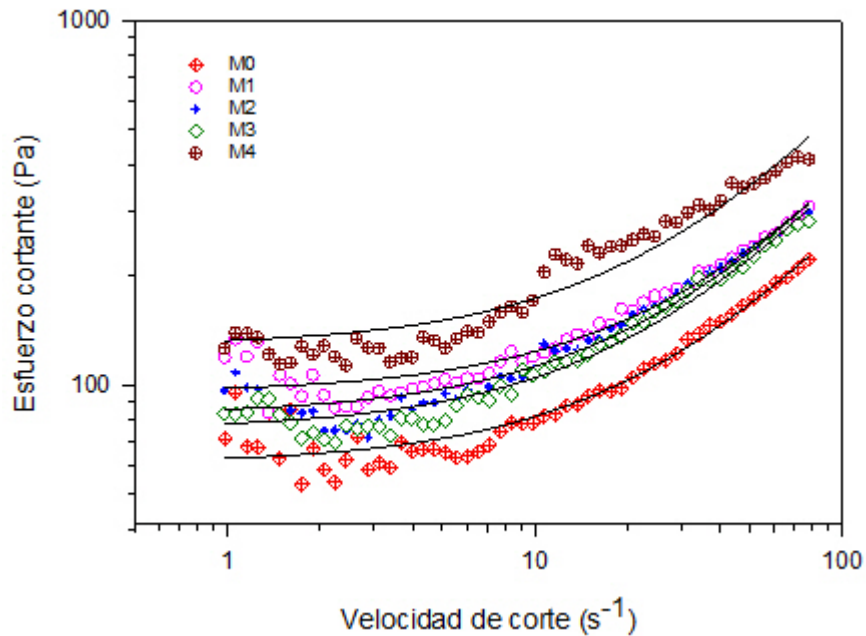
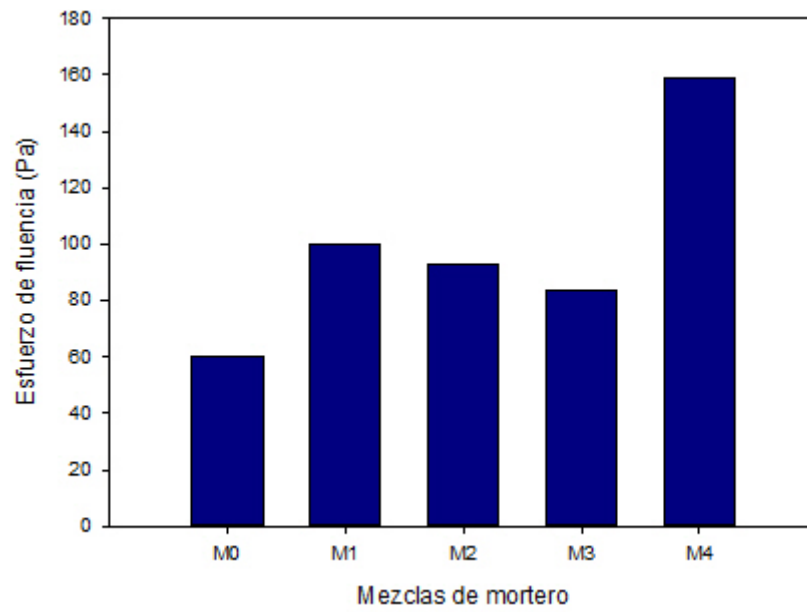


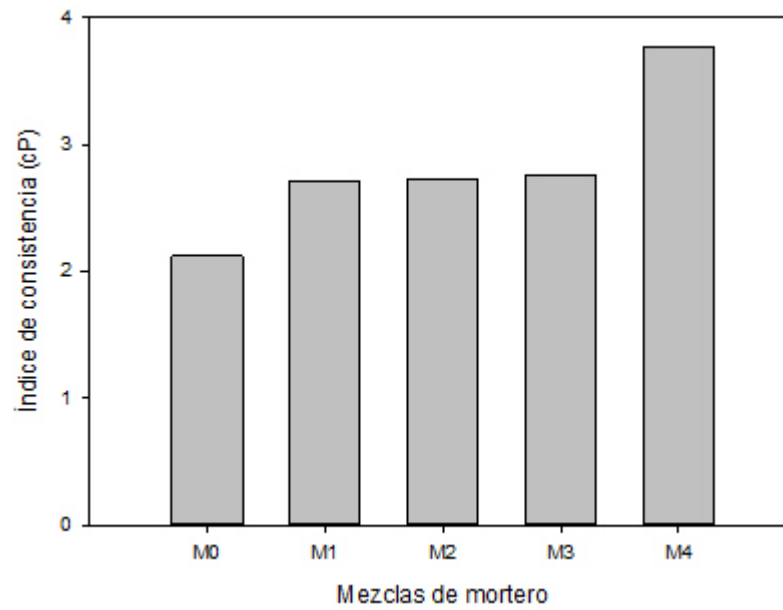
Figura 9. Curvas de flujo de los morteros control y los que contienen distintos reemplazos de agregado fino por PET triturado. Las líneas continuas representan los ajustes de los datos al modelo de flujo Bingham.

Existen dos factores que afectan el comportamiento de flujo de suspensiones de partículas: la fracción de volumen de partículas sólidas en la suspensión y la medida en que las partículas interaccionan en la mezcla; también la forma del agregado tiene un efecto importante en la reología de mezclas (Struble et al., 1998).

La Figura 10a muestra el esfuerzo de fluencia de Bingham (en Pa) que necesitan las mezclas de mortero para iniciar el flujo. Se observa un incremento mayor a 2 veces el valor de esfuerzo de fluencia de M0 con respecto a la mezcla M4, la cual contiene un mayor porcentaje de PET. La mezcla M4 se volvió considerablemente menos trabajable, lo cual se explica por el incremento en su esfuerzo de fluencia. Por lo tanto, las mezclas M1, M2 y M3 son más factibles de elaborarse ya que presentan incrementos menores al 53 %. La Figura 10b muestra el índice de consistencia de las mezclas, se observa un incremento aproximado de 2 veces para la muestra M4 con respecto a la muestra control, por el notable aumento del PET, que produjo una mezcla más viscosa y menos trabajable.



a)



b)

Figura 10. Propiedades reológicas de la mezcla de mortero de acuerdo con el modelo Bingham, a) Esfuerzo de fluencia, b) Viscosidad plástica.

3.4.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

La Figura 11 muestra que la velocidad de pulso ultrasónico, en función de la edad de los morteros, tuvo un incremento de 17 %, 20 %, 22 %, 25 % y 25 % a 56 días de edad con respecto al valor inicial para las muestras M0, M1, M2, M3 y M4, respectivamente, debido a la hidratación del cemento. Los cambios físicos y químicos ocurridos en los especímenes durante la hidratación producen una reducción de la porosidad que se traduce en incremento de la densidad de la pasta de cemento, así como incremento del módulo de elasticidad. Estos factores (densidad y módulo de elasticidad) influyen principalmente en la VPU (Malhotra & Carino, 1991) como se indica en la Ecuación 3.

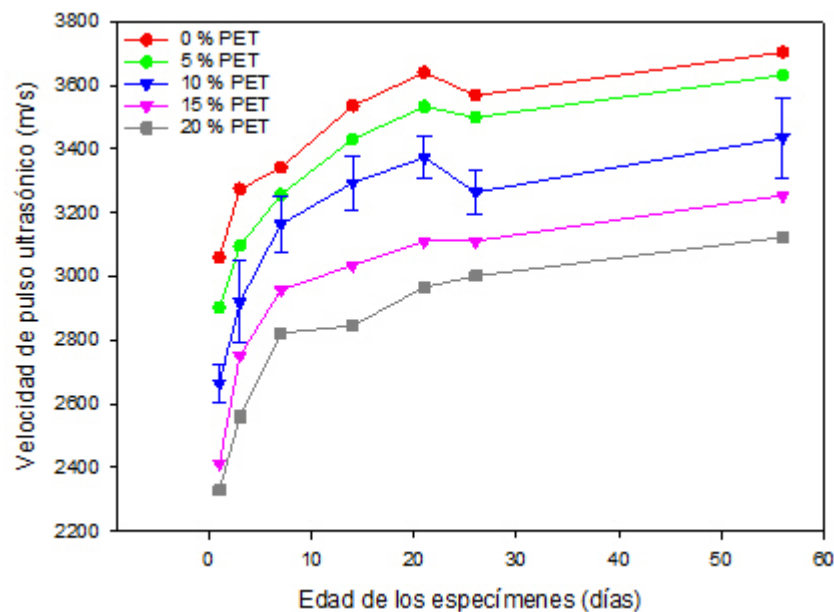


Figura 11. Velocidad de pulso ultrasónico en función de los días de curado de especímenes de mortero con diferentes porcentajes de sustitución de arena natural por PET. Las barras de error mostradas para la mezcla M2 representan $\pm$ una desviación estándar típica.

La Figura 12 presenta las VPU experimentales obtenidas en los especímenes cúbicos a la edad de 56 días, así como las VPU calculadas a partir de la ley de las mezclas expresada por la ecuación 5.

$$VPU = \left(\frac{E_P}{\rho_P} (\%P) + \frac{E_M}{\rho_M} (\%M) \right) \quad 5)$$

donde:

VPU = velocidad de pulso ultrasónico (m/s)

E_P = módulo de elasticidad del PET (2.8×10^9 Pa)

E_M = módulo de elasticidad del mortero control a 56 días de edad (2.71×10^{10} Pa)

ρ_P = densidad del PET (1300 kg/m^3)

ρ_M = densidad del mortero (2300 kg/m^3)

%P = porcentaje de sustitución de PET en cada muestra

%M = porcentaje de mortero en cada muestra

Para el primer método, se observa una reducción lineal del VPU con un aumento en el contenido de PET. La reducción máxima en la VPU fue del 15 % comparando la mezcla M0 (control) y la M4. En el segundo método se observa una reducción máxima del 8.5 % comparando la M0 y la M4. Se realizó una prueba *t student* de los dos conjuntos de datos utilizados (métodos 1 y 2), en donde no hay una diferencia significativamente entre los dos grupos, es decir que no hay interacción mecánica ni química entre el PET y el mortero, a pesar de que se incrementó la rugosidad de la superficie de las partículas de PET, como se mencionará en la sección 3.7.

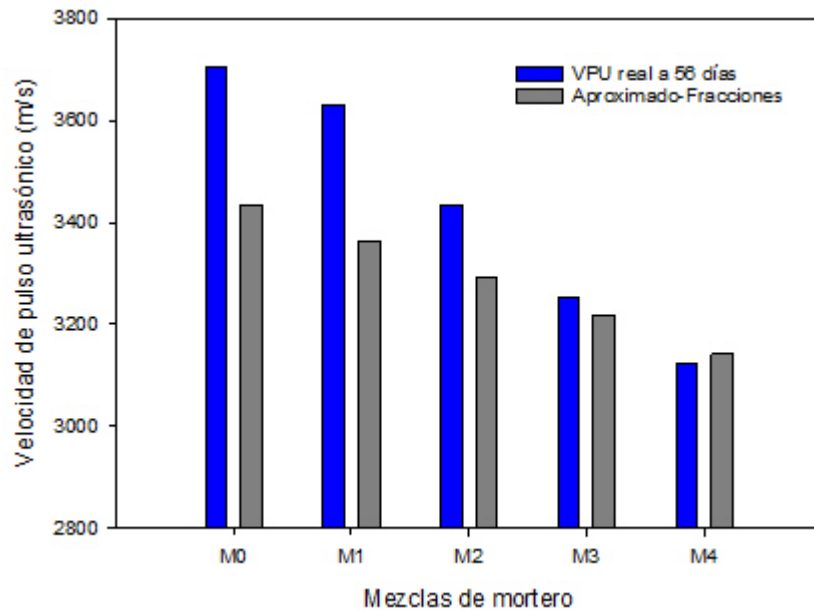


Figura 12. Velocidad de pulso ultrasónico experimental en función del porcentaje de PET en mortero y obtenido a partir de la ley de las mezclas.

Por su parte, Albano et al. (2009) observaron que al agregar PET redujo la VPU del concreto en un 8.6 % y 14 % respecto al control utilizando 10 % y 20 % de sustitución con partículas de tamaño de 2.6 mm, ya que a mayor cantidad de PET en el concreto se disminuye la velocidad de propagación de la onda ultrasónica. Un comportamiento similar fue observado por Rahmani et al. (2013), cuando sustituyeron arena por PET en un porcentaje máximo de sustitución del 15 %. Observaron a 7, 14 y 28 días de edad una disminución de VPU del 9 %, 7 % y 3 % respecto al control. Los autores concluyeron que dichos concretos podían ser utilizados como material estructural absorbente de sonido.

3.4.3. Resistencia a la compresión

La Figura 13 muestra la resistencia a la compresión de los morteros a 26 días y 56 días de edad de los especímenes. A medida que aumenta la edad y la cantidad de PET, disminuye la resistencia a la compresión de los morteros. Existe una disminución final de la resistencia a la compresión del mortero M4 del 53 %

y 56 % respecto al control M0 a 26 días y 56 días, respectivamente. La resistencia a la compresión a 28 días de edad fue similar a la de 60 días de curado, pues el concreto alcanza entre el 75-80 % de su resistencia final a los 28 días (Neville, 1981). Se puede observar una dependencia lineal inversa del valor de resistencia con respecto al incremento de sustitución de PET en el mortero. La reducción de resistencia a la compresión debido a la adición de PET se atribuye a la pobre unión entre la matriz y los agregados ligeros (Hannawi et al., 2010; Saikia & De Brito, 2014).

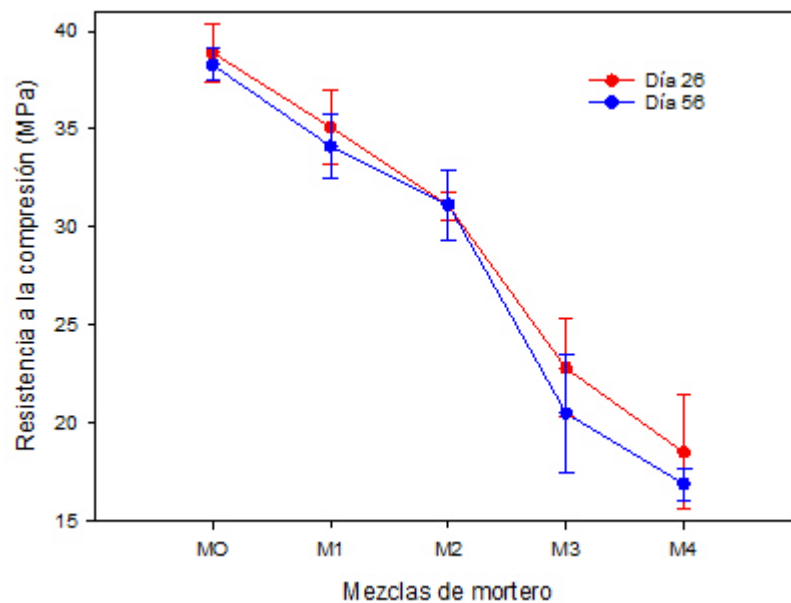


Figura 13. Resistencia a la compresión de los morteros a los 26 y 56 días de edad. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.

3.4.4. Módulo de elasticidad

La Figura 14 muestra el módulo de elasticidad calculado usando la Norma Técnica Complementaria del Distrito Federal (NTCDF, 2004) y usando la velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Para la NTCDF se observa que a 26 días y 56 días de edad de los especímenes existe una disminución final del 31 % y 33 % de la M4 respecto al control M0. Como se espera, el comportamiento del módulo de elasticidad calculado por medio de las NTCDF es similar al observado

en la resistencia a la compresión. También se observa el mismo comportamiento en el módulo de elasticidad dinámico estimado a partir de la VPU. Se sabe que el concreto con menor resistencia a la compresión tienen valores más bajos de módulo de elasticidad (Saikia & De Brito, 2014).

Albano et al. (2009) observaron que para una mezcla con sustitución del 20 % de PET con tamaño 11.4 mm con una relación agua/cemento de 0.60 obtuvieron un módulo de elasticidad que disminuye un 51 % respecto al control, esto debido al tamaño de partícula y mayor porcentaje de sustitución. Considerando el módulo de elasticidad dinámico a 56 días de edad, se observa una disminución final del mortero M4 del 37 % con respecto al control M0. La reducción en el módulo de elasticidad se debe en parte a la disminución de la densidad del mortero por la inclusión del PET, que disminuye la velocidad de propagación de la onda ultrasónica (Marzouk et al., 2007).

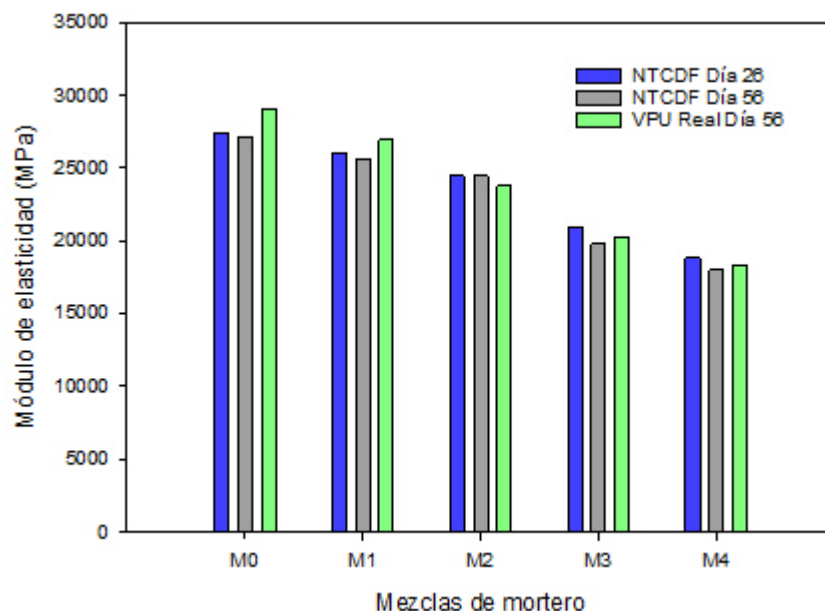


Figura 14. Módulos de elasticidad. Estática calculada con base en la NTCDF a 26 y 56 días de edad (color azul y gris). El color verde representa el módulo de elasticidad dinámico estimado a partir de la VPU obtenido a 56 días de edad.

3.4.5. Resistencia a la flexión

La Figura 15 muestra el módulo de ruptura de los morteros. A 39 días y 56 días de edad de los especímenes existió disminución de la resistencia final de M4 del 35 % y 39 % respecto al control M0 con aumento en la cantidad de PET. Para la resistencia a la flexión hubo una caída menos drástica que en la prueba de resistencia a la compresión, debido a la forma prismática del espécimen y el acomodo alargado que tuvieron las partículas de PET, mismas que opusieron resistencia en la parte fracturada con un esfuerzo de tensión. La alta respuesta al esfuerzo de tracción claramente superior de las tiras horizontales podría tener que ver con la orientación de las cadenas del polímero, que se encuentra condicionadas por el modo de fabricación de las botellas (Greciano, 2018).

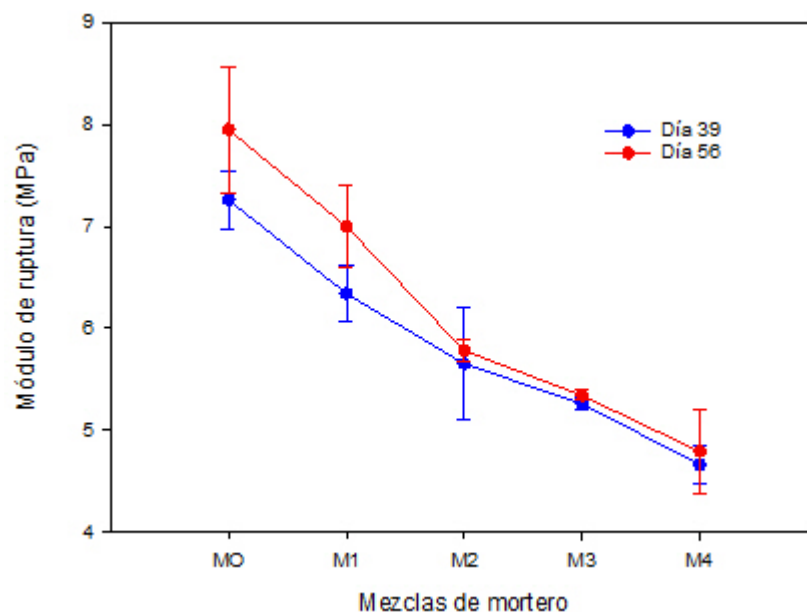


Figura 15. Resistencia a la flexión con respecto al porcentaje de PET en cada muestra.

En sus estudios, Rahmani et al. (2013) observaron que cuando la cantidad de partículas de PET aumentan, la resistencia a la flexión tiene una tendencia creciente al principio. Con 5 % de sustitución da como resultado un aumento de 7.5 % respecto al control, pero tiene una disminución final del 13% respecto al control a medida que aumentó el porcentaje de PET.

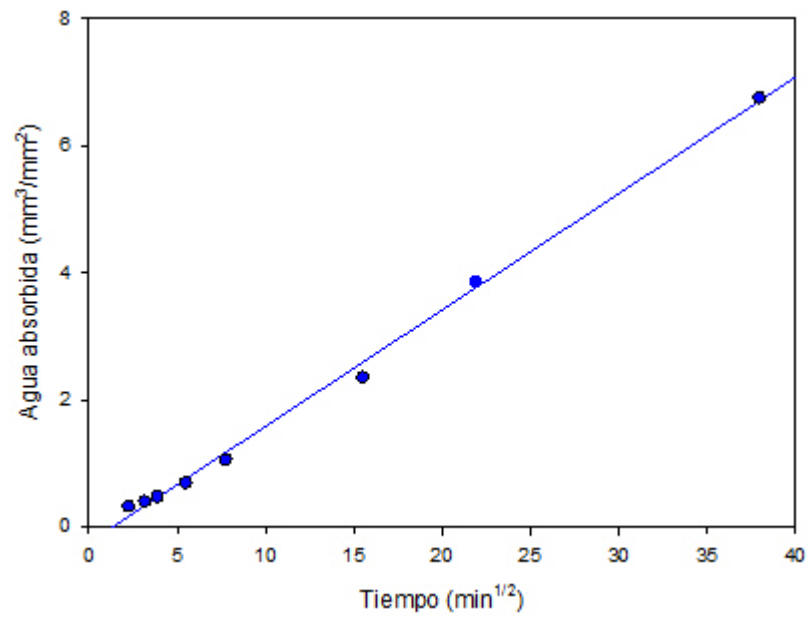
La pérdida de resistencia a la compresión y reducción en el módulo de elasticidad tiende a disminuir la resistencia a la flexión (Saikia & De Brito, 2014).

Por su parte, Hannawi et al. (2010) observaron una disminución final de resistencia a la flexión usando tres tamaños de partícula: 5 mm, 2 mm y 1 mm con relación agua/cemento de 0.50, y diferentes volúmenes de sustitución de agregado fino por agregado ligero PET: 2 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 %. Obtuvieron resultados iniciales de 4 % de incremento de la resistencia a la flexión en 5 % y 10 % de sustitución, después tuvo una disminución del 10 % y 30 % respecto a las sustituciones del 10 % y 20 %. Sakr & El-hakim (2005) indicaron que las variaciones en las propiedades analizadas pueden atribuirse a la textura del PET, ya que tiene una forma plana y lisa que son muy diferentes al agregado fino natural que es redonda y rígida.

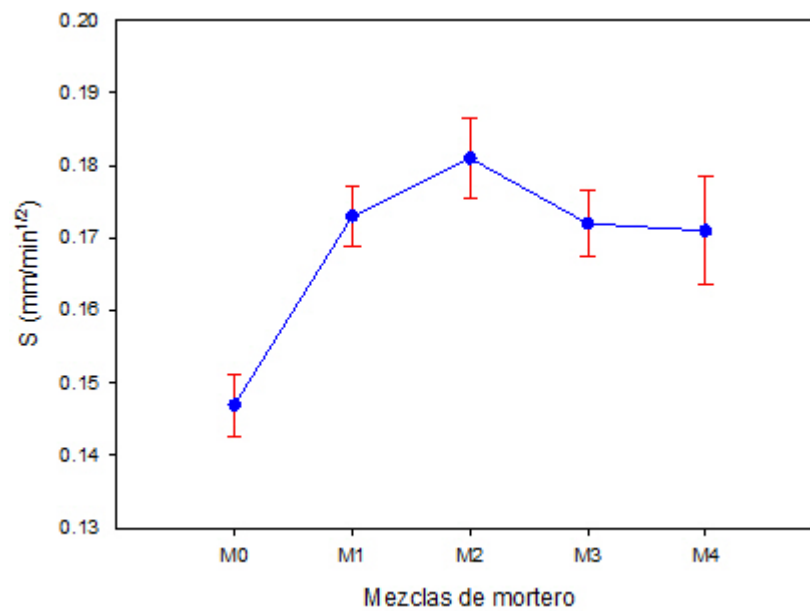
3.4.6. Absorción capilar

La Figura 16a muestra un ejemplo del agua absorbida por unidad de área versus $t^{1/2}$ en una muestra de mortero M2. La pendiente de la recta ajustada a los datos correspondientes a un día de absorción capilar es la sorptividad (Hall, 1989). La Figura 16b muestra un incremento de la sorptividad en todos los morteros que contienen PET con respecto al control. El incremento máximo se tuvo en el mortero M2, que representa un 23 % respecto al control M0.

Con la inclusión del PET en el mortero, a pesar de tener cierta rugosidad y adherirse, siempre existe una zona de transición, es decir el PET puede ocasionar que algunas partículas se orienten en sentido horizontal y almacenen agua de mezclado en su parte plana inferior, debido al sangrado interno (Toirac-Corral, 2004). Esta agua al evaporarse generará un vacío que al entrar en contacto con agua incrementará la capacidad de absorción capilar.



a)

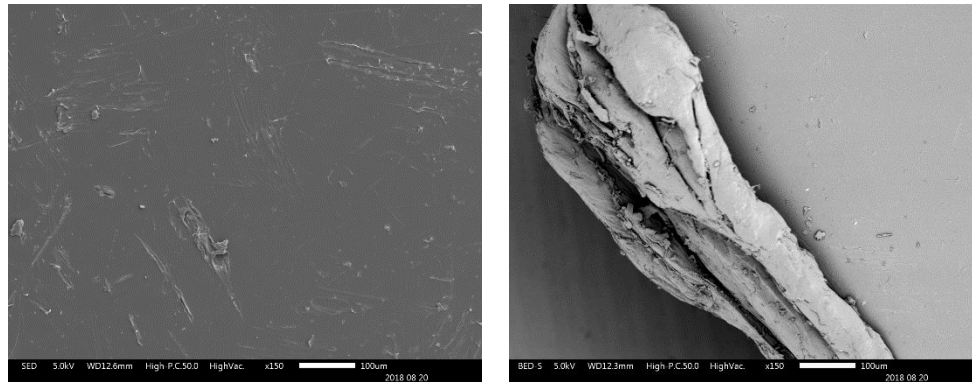


b)

Figura 16. Absorción capilar, a) Comportamiento del agua absorbida por unidad de área del espécimen M2 vs $t^{1/2}$. b) Sorptividad de los morteros en función de los diferentes porcentajes de reemplazo de agregado fino por PET.

3.4.7. Microscopía electrónica de barrido

La Figura 17a muestra la superficie de una partícula de PET sin triturar. Se observa una superficie lisa. En la Figura 17b se observa la presencia de tres capas de PET, producto del proceso de su fabricación. La superficie lisa del PET produciría una menor adherencia mecánica con el mortero.

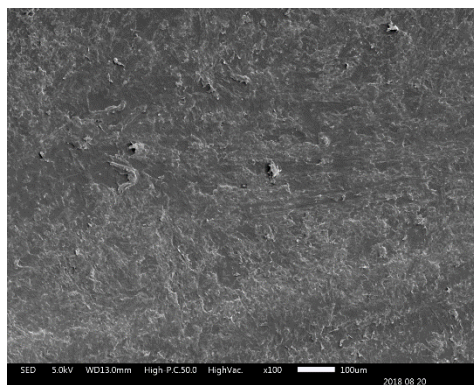


a)

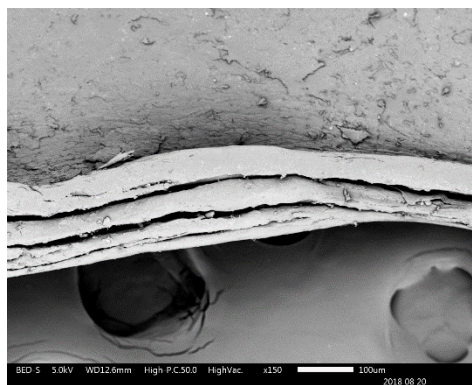
b)

Figura 17. Imágenes de SEM de partículas de PET sin triturar, a) Imagen de electrones retrodispersados con magnificación de 150X en la estructura superficial, b) Imagen de electrones retrodispersados con magnificación de 150X sección lateral.

La Figura 18 muestra la superficie de una partícula de PET que fue triturada en la licuadora industrial, se observa una superficie más rugosa a causa del rozamiento de las cuchillas con el PET, lo que mejoraría la adherencia con el mortero. También se muestra la sección lateral del PET donde se observa mayor rugosidad y desprendimiento de más capas por proceso de triturado comparado con las figuras 17a y 17b.



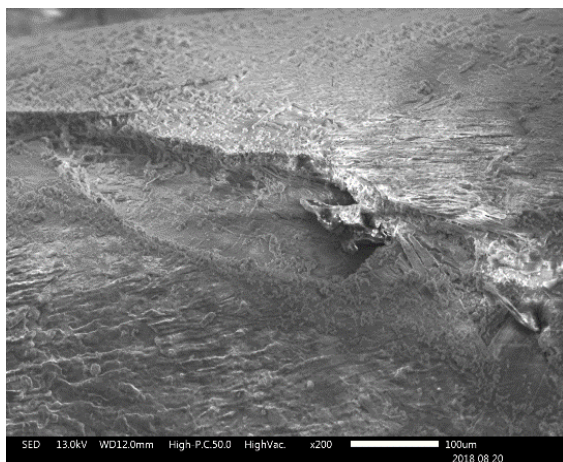
a)



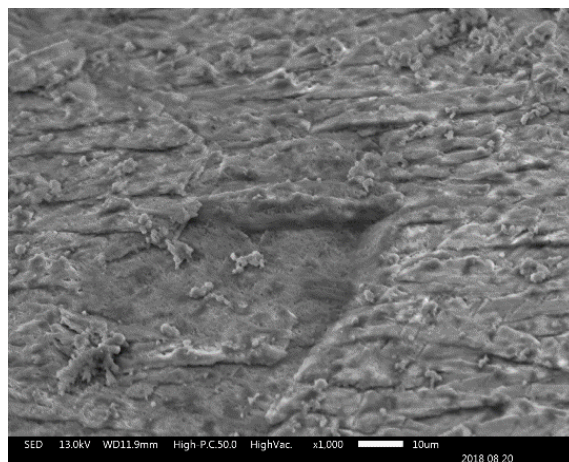
b)

Figura 18. Imágenes de SEM de partículas de PET triturado, a) Imagen de electrones retrodispersados con una magnificación de 100X de la zona superficial, b) Imagen de electrones retrodispersados con magnificación de 150X de una sección lateral.

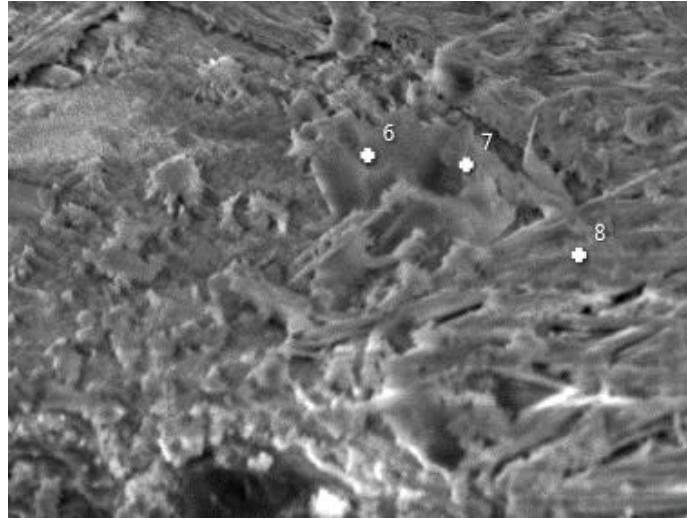
La Figura 19a muestra la parte superficial de una partícula de PET en el mortero. La figura 19b es una zona donde se observan productos de hidratación del cemento sobre el PET. La Figura 18c muestra tres zonas donde se adquirieron espectros de EDS para conocer la composición elemental de los productos en dichas zonas (Figura 19d). Se observa que los elementos presentes son principalmente calcio, carbono y oxígeno, indicativos de la presencia de los silicatos hidratados de calcio y del PET.



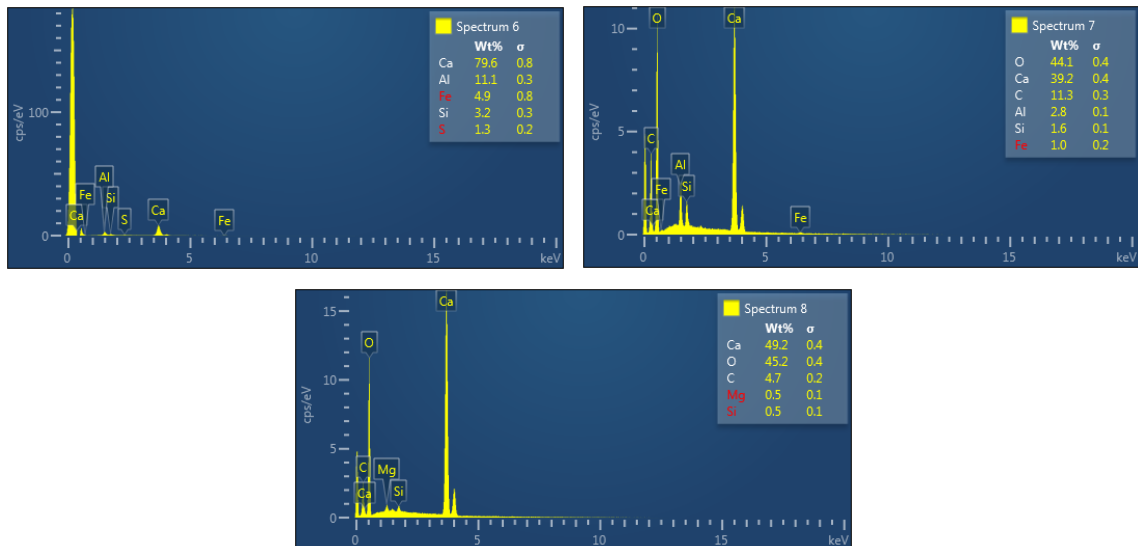
a)



b)



c)



d)

Figura 19. SEM-Espectro. a) Imagen de electrones retrodispersados con magnificación 200X de una zona superficial de PET, b) Magnificación 1000X, c) Magnificación 1500X, d) Espectro de los mapeos de elementos existentes en el PET en tres zonas de la Figura 18c.

Hannawi et al. (2010) mostraron imágenes de microscopía electrónica de barrido que resaltan la calidad de contacto entre la matriz y agregados plásticos en comparación con la matriz y arena natural. La adherencia entre los materiales fue débil utilizando un tamaño máximo de PET de 10 mm, observando que la unión

entre matriz-PET aumenta la porosidad del espécimen. A su vez Marzouk et al. (2007) obtuvieron imágenes de SEM pero utilizando PET con tamaño menor de 5 mm. Notaron un alto nivel de compactación en los materiales compuestos cuando el volumen sustituido es menor o igual al 50%. Sin embargo, una vez que este volumen supera el 50% la estructura parece más cavernosa, dicha estructura explica disminución de densidad y propiedades mecánicas.

3.5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se investigó las propiedades en estado fresco y endurecido de mortero de cemento Portland, con sustitución del 0 al 20 % de agregado fino (arena) por agregado PET triturado con tamaño de partícula similar al agregado fino natural.

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- Las curvas de flujo de los morteros con PET se ajustan a un modelo de flujo tipo Bingham, observándose un incremento del esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica con la incorporación de partículas de PET a la mezcla. Los parámetros reológicos de Bingham indican que las mezclas con contenidos de PET de 5 %, 10 % y 15 %, no presentan diferencias entre sí, y en promedio incrementan el esfuerzo de fluencia en 52 % y la viscosidad plástica en 28 %. La mezcla M4 triplicó el valor del esfuerzo de fluencia y duplicó el valor de la viscosidad con respecto al control M0.
- Al incrementar el tiempo de hidratación, la velocidad de pulso ultrasónico aumenta, lo que significa que el espécimen incrementa su densidad (reduce su porosidad) y el módulo de elasticidad. De igual manera se observó una reducción de VPU conforme incrementaba el contenido de PET, debido a la menor densidad y módulo de elasticidad de este último.
- La resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión disminuyen con el aumento de PET la mezcla. Esta última propiedad muestra un incremento marginal conforme incrementan los días de curado de 39 a 56 días.
- La sorptividad de los especímenes de mortero a 56 días de edad tuvo un incremento con respecto al control, siendo del 23 % en M2 y 16 % en la M4, es decir, hubo un aumento de sorptividad conforme se incrementó el tiempo de curado en húmedo de los especímenes y el porcentaje de PET.

- Con SEM se observó una zona de transición entre el PET y agregado causado por un sangrado interno lo cual explica los mayores valores de sorptividad en mezclas que contienen PET, así mismo el PET fue rugoso debido al triturado previo, lo cual permitió cierta compatibilidad entre los materiales.

3.6. RECOMENDACIONES

- Al realizar el triturado del PET, se recomienda usar una máquina trituradora especial para dar forma y tamaño al material, así obtener la curva granulométrica similar al agregado natural (arena) con los límites establecidos por la Norma ASTM C33 (2003).

- Determinar el módulo de elasticidad experimental utilizando cilindros de 10 x 20 cm ó 15 x 30 cm, para compararlo con los obtenidos por medio de VPU y ecuaciones empíricas.

3.7. AGRADECIMIENTOS

Prisciliano Cano agradece a la SIP del IPN por financiar el proyecto con clave 20180029 dentro del cual se desarrolló el presente trabajo, así como al CONACyT por financiar el proyecto CB clave 239727.

Marcelino Benito Vásquez López agradece el apoyo financiero por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) brindado durante dos años, mismas que duró la investigación.

3.8. LITERATURA CITADA

- Abdel-Bary, E. M., Ismail, M. N., Yehia, A. A., & Abdel-Hakim, A. A. (1998). Recycling of polyethylene films used in greenhouses-development of multilayer plastic films. *Polymer Degradation and Stability*. 62(1), 111–115. doi: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00267-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00267-X)
- Akçaözoğlu, S., Duran-Atış, C., & Akçaözoğlu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*. 30(2), 285–290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., & Gutiérrez, A. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*. 29(10), 2707–2716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>
- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 364(1526), 1977–1984. doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- ASTM International (2002). ASTM Standards C 293-02. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). Recuperado de: <https://normanray.files.wordpress.com/2010/10/kuliah-7-c293.pdf>
- ASTM International (2003). ASTM Standards C 33-03. Standard Specification for Concrete Aggregates. Recuperado de: <http://www.c-s-h.ir/wp-content/uploads/2014/12/C-331.pdf>
- ASTM International (2008). ASTM Standards C 597-02. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Recuperado de: <http://www.c-s-h.ir/wp-content/uploads/2015/01/C-597.pdf>
- ASTM International (2010). ASTM Standards C109/C109M-13. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-Mm] Cube Specimens). Recuperado de: <http://www.c-s-h.ir/wp-content/uploads/2014/12/C-109.pdf>
- ASTM International (2013). ASTM Standards C 1585-04. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes. Recuperado de: <https://www.astm.org/DATABASE>.
- ASTM International (2015). ASTM Standar C 305-99. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Recuperado de: <https://www.astm.org/DATABASE>.
- Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A review. *Construction and Building Materials*. 15(2–3), 93–103. doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1)
- Greciano, A. V. (2018). Refuerzo estructural con PET reutilizado aplicación en adobe. (Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España). Consultada en: http://oa.upm.es/51354/1/TFG_Vazquez_Greciano_Andrea.pdf
- Gregory, M. R. (2009). Environmental implications of plastic debris in marine settings, entanglement, ingestion , smothering, hangers-on, hitch-hiking

- and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 364(1526), 2013–2025. doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0265>
- Hall, C. (1989). Water sorptivity of mortars and concretes : a review. *Magazine of Concrete Research*. 41(147), 51–61. doi: <https://doi.org/10.1680/mac.1989.41.147.51>
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*. 30(11), 2312–2320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>
- Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (1991). *Nondestructive testing of concrete*. C. Press. Boca Raton, U.S.A. Recuperado de: http://kmcenter.rid.go.th/kcresearch/MANUAL_OUT/MAEN0007.pdf
- Marzouk, O. Y., Dheilly, R. M., & Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*. 27(2), 310–318. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- Neville, A. M. (1981). *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited. Essex, England. Recuperado de: <https://igitgeotech.files.wordpress.com/2014/10/properties-of-concrete-by-a-m-neville.pdf>
- NTCDF Norma Técnica Complementaria del Distrito Federal. (2004). Gaceta Oficial Del Distrito Federal. México, D.F. Recuperado de: <http://www.smie.org.mx/layout/normas-tecnicas-complementarias/ntc-criterios-gaceta-oficial-df-2004.pdf>
- PlasticsEurope. (2006). The Compelling Facts About Plastics. An analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe. Association of plastics manufacturers. Brussels, Belgium. Recuperado de: https://www.plasticseurope.org/application/files/2815/1689/9283/2006compelling_fact_PubJan2008.pdf
- PlasticsEurope. (2008). The compelling facts about plastics 2007. An analysis of plastics production, demand and recovery for 2007 in Europe. Annual book of ASTM standards. Brussels, Belgium. Recuperado de: https://www.plasticseurope.org/application/files/1515/1689/9283/2007CompellingFacts_PubOct2008.pdf
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H. A., Allahyari, H., & Nikbin, I. M. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*. 47, 1302–1308. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>
- Saikia, N., & De Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*. 52, 236–244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Sakr, K., & El-hakim, E. (2005). Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties. *Cement and Concrete Research*. 35(3), 590–596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.023>

- Shent, H., Pugh, R. J., & Forssberg, E. (1999). A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics. *Resources, Conservation and Recycling*. 25(2), 85–109. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00017-2)
- Silva, D. A., Betioli, A. M., Gleize, P. J. P., Roman, H. R., Gómez, L. A., & Ribeiro, J. L. D. (2005). Degradation of recycled PET fibers in portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 35(9), 1741–1746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.040>
- Struble, L., Szecszy, R., Lei, W.-G., & Sun, G.-K. (1998). Rheology of Cement Paste and Concrete. *American Society for Testing and Materials*. 20(2), 269–277. doi: <https://doi.org/10.1520/CCA10421J>
- Thompson, R. C., Swan, S. H., Moore, C. J., & Vom-Saal, F. S. (2009). Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 364(1526), 1973–1976. doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>
- Toirac-Corral, J. (2004). Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón ; origen y prevención. *Ciencia y Sociedad*. 29(1), 72–114. doi: <https://doi.org/10.22206/cys.2004.v29i1.pp72-114>
- Yahia, A., & Khayat, K. H. (2001). Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout. *Cement and Concrete Research*. 31(5), 731–738. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00476-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00476-8)

ANEXO 1

Equipo utilizado y pruebas realizadas



Figura 1. Licuadora International LI-12.



Figura 2. Partículas de PET



Figura 3. Tamizador Tyler RX-29



Figura 4. Engrasado de moldes.



Figura 5. Proceso de curado de los especímenes.



Figura 6. Reómetro Physica MCR 301 (Anton Paar).



Figura 7. Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.



Figura 8. Ensayo de resistencia a la compresión.



Figura 9. Espécimen cúbico fracturado.



Figura 10. Ensayo de resistencia a la flexión.



Figura 11. Ensayo de absorción capilar de agua.



Figura 12. Microscopio electrónico de barrido JSM-IT300LV (JEOL).

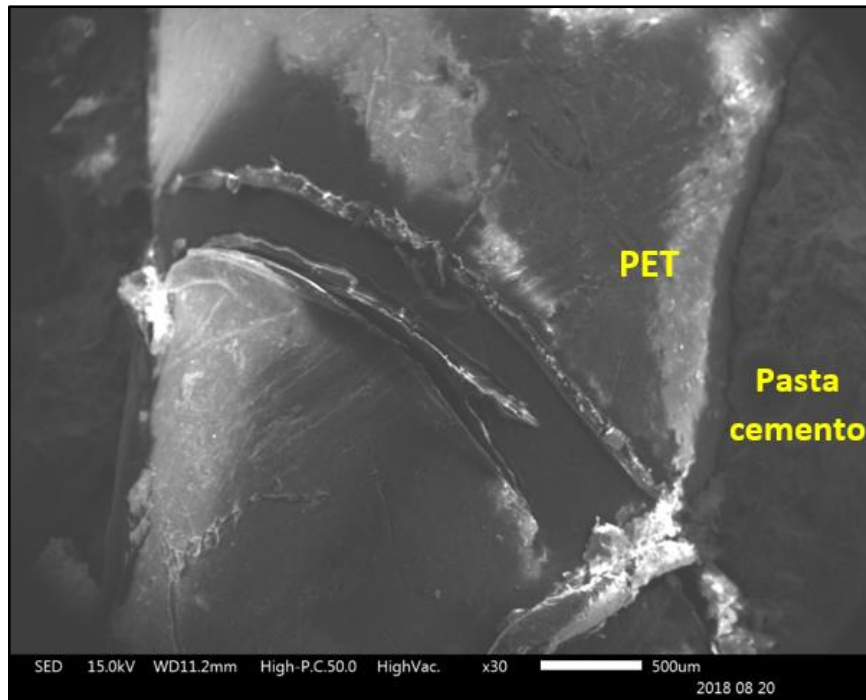


Figura 13. Imagen de electrones retrodispersados.