

Integración de PET reciclado a flexión en un elemento constructivo de concreto

Integration of PET recycled to flexion in a concrete construction element

RAYMUNDO SILVA HERRERA
GIL HUMBERTO OCHOA GONZÁLEZ

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO)

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i6.106>

Recepción: 27 de noviembre de 2018. *Aceptación:* 20 de septiembre de 2019.

RESUMEN

Se presenta la investigación para la integración de PET reciclado en un elemento constructivo a utilizarse en autoconstrucción; se busca comprobar la viabilidad del uso del PET (polietileno tereftalato) como material de construcción; dicha investigación se plantea considerando la normativa para el trabajo a flexión de una viga de concreto. La integración de un sistema constructivo a base de PET reciclado busca captar la mayor cantidad del PET que se desecha, integrándolo en tiras continuas, aprovechando las características que brinda el PET a la flexión en elementos de concreto. A su vez aplicando modelos matemáticos que permitan la seguridad estructural, así como las pruebas mecánicas necesarias (en este caso de vigas a flexión), buscando establecer sistemas constructivos eficientes que permitan cambiar la percepción en la recuperación de materiales reciclados.

Palabras clave: PET reciclado, flexión, elemento constructivo, concreto.

ABSTRACT

This research looks for the integration of recycled PET in a constructive element to be used in self-construction; it is sought to verify the via-

bility of the use of PET (Polyethylene terephthalate) as a construction material; this research is projected considering the rules for bending work of a concrete beam. The integration of a construction system based on recycled PET seeks to capture the largest amount of PET that is discarded, integrating it into continuous strips, taking advantage of the characteristics that PET offers to flex on concrete mixtures. At the same time, the application of mathematical models that allow structural safety, as well as the necessary mechanical tests (in this case bending beams), allow us to establish efficient constructive systems that allow to change the perception in the recovery of recycled materials.

Keywords: recycled PET, flexion, constructive element, concrete.

INTRODUCCIÓN

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El trabajo que aquí se presenta parte de la necesidad de dar seguimiento a las diversas investigaciones relacionadas con el uso del PET reciclado, así como proponer un sistema de autoconstrucción que permita evitar la disposición final del desecho de PET en rellenos sanitarios y/o basureros.

Se han elaborado diversos esfuerzos por instituciones como el Instituto Tecnológico y de Es-

tudios Superiores de Occidente (ITESO), donde se han desarrollado proyectos para la integración de botellas PET en muros de carga, como los mostrados por Espinosa (2016) y Macías (2017), dando evidencia de un área de oportunidad para el desarrollo económico, social y ambiental, al reducir los costos de construcción en la generación de su propia infraestructura mediante la recolección del PET y disposición final como material de construcción.

No obstante, la integración de materiales reciclados conlleva a la reducción del control de calidad del material a recuperar, puesto que el origen de los materiales reciclados proviene de diferentes productores enfocados en otra finalidad; ahí radica la principal problemática: la transformación y adecuación del material recuperado a un sistema constructivo eficiente.

JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con el *Boletín* núm. 3469 de la LXIII Legislatura de la Cámara de Diputados: “En México, 90 millones de botellas de plástico de refrescos y agua son lanzados a la vía pública, ríos y mares” (H. Congreso de la Unión, 2017).

Lo que muestra la relevancia que tiene para el Gobierno de la República generar acciones para la disposición de este desecho. Por lo que podemos darnos cuenta que el PET se ha convertido en uno de los principales desechos sólidos que encontramos en nuestro país; tomando las estadísticas de Ávila, Campos y Encarnación (2013), en México el 65.8% de los desechos de envases para refrescos son de este tipo de material, consecuentemente, somos uno de los principales consumidores de refresco, encontrándonos entre los primeros lugares a nivel mundial (Ávila, Campos y Encarnación, 2013). Por lo que es necesario propiciar acciones para el reciclaje y la reutilización de este desecho.

Los métodos de autoconstrucción, al desarrollarse principalmente por conocimiento empírico, omiten establecer un control de calidad adecuado; sumado a ello, la integración de materiales

reciclados conlleva a malograr el propio control de calidad, por lo que establecer métodos para la correcta transformación y aplicación de los materiales reciclados brinda un aporte para el desarrollo de autoconstrucción.

ESTADO DEL ARTE

La integración de diversos materiales de construcción a las nuevas metodologías de diseño, como la aplicación de materiales alternativos, ante la demanda excesiva de los materiales naturales, ha provocado un creciente interés en relación con el estudio de alternativas de diferentes materiales que pueden ser integrados como materiales de construcción. La aplicación del PET reciclado dentro de los sistemas constructivos se ha investigado desde la integración de diversos elementos estructurales, hasta la aplicación de materiales decorativos dentro del ámbito del diseño interior.

Según Gaggino (2003), la industria del PET reciclado ya cuenta con un mercado establecido en Córdoba, Argentina, lo cual ofrece evidencia de la viabilidad del uso del PET reciclado como material de construcción; reporta que existen empresas y/o plantas recicladoras que venden el material reciclado (PET). Elabora un estado del arte de los materiales que utilizan plásticos reciclados en Córdoba, analiza el estudio de caso del T.plak (tetraabriks) y su aplicación en cerramientos (entiéndase cubiertas), encuentra que tiene un menor costo que los sistemas tradicionales por ser un material recuperado, presenta tarjetas de análisis de precio unitario de los sistemas constructivos, para argumentar la factibilidad económica.

En una investigación más reciente de Gaggino, Arguello y Berreta (2007), el PET reciclado se utilizó para aligerar las mezclas, reemplazando la arena gruesa por los plásticos triturados, y fabricó diferentes probetas con las siguientes medidas: ladrillo 5,5x26.2x12.5 cm, bloque 20x20.5x40 cm y placa de ladrillos 240x28x5.6. Dentro de los datos que se pueden observar en su investi-

gación se encontró que el peso específico de los desechos de construcción con PET son menores que los de hormigón, dando evidencia de ligereza en los elementos constructivos con PET, además de encontrar una conductividad térmica menor a las mamposterías tradicionales. Al igual se encontró que la resistencia a la compresión disminuye al integrar el PET reciclado con un resultado a la compresión en el ladrillo de 2 Mpa contra 1.02 Mpa de un ladrillo con PET.

Entre otras características, reporta resistencia a la humedad e intemperie, facilidad para clavar, aserrar y buena adherencia de revoques (aplanados), así como un costo de producción similar al tabique tradicional (Gaggino, Arguello y Berretta, 2007).

Las investigaciones de Gaggino han ayudado a implementar diferentes tipos de investigaciones para la integración del PET reciclado como insumo en la construcción, como es el caso de Tolozano (2016), que lo integra a bloques de plástico reciclado, sumando otros tipos de plástico mediante un procedimiento de extrusión similar al colado de bovedillas prefabricadas y bloques, sin ser vibro-compactados.

Zambrano (2015) aborda diferentes tipologías de métodos de corte al disponer tablas donde muestra diferentes formas de transformación del PET reciclado, con lo cual se pueden establecer rendimientos para la integración del PET como insumo, en metodologías donde intervenga la autoconstrucción (Zambrano, 2015).

Rodas y Ordóñez (2016) proponen el desarrollo de tecnología integrando mezclas de concreto a base de vidrio y PET reciclado, integrándolos como reemplazo de arena; cabe hacer notar que encontraron dificultades en la transformación del PET, siendo una de las principales limitantes en la integración del PET reciclado como un insumo en la construcción; los resultados a compresión muestran un mejor rendimiento de las mezclas con vidrio en comparación con el PET y mezclas tradicionales (normal 3 Mpa, PET 2.8 Mpa, vidrio 2.9 Mpa y PET-vidrio 3.4 Mpa).

Santamarina (2015) de igual forma aborda la experimentación de las mezclas PET-vidrio, al

catalogar las ventajas y desventajas de los materiales, donde encontró que el PET debido a tener una velocidad baja a la cristalización, es poco utilizado en los procesos de inyección, además de tener una alta sensibilidad a la humedad; sin embargo, cuenta con un alto módulo mecánico (2 Mpa).

El uso de plásticos dentro de la construcción ha sido tema importante para evitar la disposición final de los desechos. Trabajos como los de Salcedo (2014), donde diseña un sistema constructivo a base de bloques elaborados con la mezcla de PEAD reciclado, dan muestra de las ventajas del uso de plástico en la construcción, al poder extruirlo en diferentes formas; en la investigación de Salcedo se diseña un sistema constructivo en forma de bloques tipo lego® que se unen sobre un canal metálico a manera de dala de desplante y corona, el diseño del bloque mide 4.5x9.0x (9, 18 ó 27) cm y obtiene una resistencia a la compresión de 15,904 kg/cm².

El estudio de los sistemas constructivos alternativos y/o con materiales reciclados, por su naturaleza experimental y de establecimiento de nuevos esquemas de construcción, provoca que los temas a abordar para lograr establecer un producto en el mercado, deba establecer ventajas y desventajas, por lo que investigaciones como la de Velardi (2011) permiten conocer las diferentes características termo-físicas de un sistema con PET reciclado. Trespalacios (2017) propone un sistema constructivo a base de casetones aligerados, al abordar las características físicas del PET para su aplicación como sistema constructivo.

El uso del PET reciclado como material en la construcción puede mejorar el comportamiento mecánico de algunos elementos debido a sus características físicas, entre las cuales muestran mejoras en su trabajo a la flexión, aplicado dentro de las mezclas como fibras [e. g. Al-Tulaian *et al.* (2016), Borg *et al.* (2016), Jo *et al.* (2008), Kim *et al.* (2010), Ochi *et al.* (2007), Rahmani *et al.* (2013), Saikia *et al.* (2013), Saikia *et al.* (2014), Silva *et al.* (2005) y Yazoghli *et al.* (2007)].

El desarrollo de tecnología apropiada en la construcción se ha encontrado en diversos estu-

dios, donde se han efectuado pruebas físicas al material PET para su implantación como material de construcción, desde su uso como muros de carga a través del vertido de mezclas en el interior de botellas PET, y su acomodo para obtener mejor resistencia a la compresión. Como ejemplos de lo anterior están los trabajos de Espinosa (2016) y de Macías (2017) (ver figura 1 y 2); sin embargo, este tipo de proceso constructivo sólo abarca una mínima parte del total de los desechos PET, por lo que en esta investigación se busca determinar la factibilidad del PET reciclado en el concreto y su probable inclusión en un sistema constructivo.

El concreto es una de las principales mezclas utilizadas en los sistemas constructivos, por lo que se han apoyado diversas investigaciones del uso del concreto con PET reciclado, como es el caso del proyecto impulsado por Conacyt: *Propuesta de concreto estructural sustentable utilizando PET como agregado grueso (ROCAPET)* reportado por la Agencia Informativa Conacyt (Cacelín, 2016), donde se proyecta el uso de la mezcla con PET para integrarlo al mercado de la construcción.

Otra investigación, con apoyo del Conacyt, titulada *Sistema de construcción ecoeficiente para viviendas de interés social*, reportado por la Agencia Informativa Conacyt (Valis, 2016), muestra un sistema eco-eficiente elaborado a base de celulo-

sa y ceniza de caña de azúcar, ofreciendo resultados en las pruebas con $f'c$ de hasta 750 kg/cm^2 .

Existen otros tipos de mezclas que buscan integrar el concreto en los sistemas constructivos sustentables; como ejemplo está el “*Ecocreto*®” (Grau, 2018), enfocado en pavimentos permeables; se reporta la desventaja de las capas que reciben la superficie de rodamiento, ya que éstas deben ser cementadas y/o impermeabilizadas, lo que reduce la capacidad de permeabilidad o requieren de obras anexas para encauzar el agua.

Hay un avance en la investigación de concreto ecológico y de la integración de materiales reciclados en él, lo que da la pauta para realizar una investigación de alternativas, integrando materiales reciclados en un sistema constructivo.

MÉTODOS

MARCO METODOLÓGICO

Un punto de vista cuantitativo es necesario para poder evaluar el concreto con PET reciclado en un sistema constructivo, por lo que una revisión del comportamiento de la estructura usando concreto con PET reciclado determinó sus ventajas y desventajas, así como su factibilidad de aplicación.

El diseño metodológico de este trabajo se constituyó en tres etapas: investigación documental, modelos de elemento constructivo, y pruebas

FIGURA 1. Prueba compresión



Fuente: tomado de Macías, 2017.

FIGURA 2. Muro PET



Fuente: tomado de Espinosa, 2016.

preliminares, con base en la implementación del modelo de investigación IMRAD (Introduction, Methods, Results, and Discussion) (Day, 1998).

RECUPERACIÓN DE PET EN HOGARES

Se determinaron las características del PET reciclado en dos hogares a través del método de observación directa, registrando el tipo de envases, procedencia, limpieza, calibre, con la finalidad de determinar la calidad del material recuperado.

Se observaron los diferentes calibres para determinar el tipo de PET a utilizar en las mezclas de concreto, de acuerdo con la procedencia del producto contenido en los envases y las características para determinar el proceso de molienda y corte con base en dos tipologías de familia:

1. (F1). Familia de dos integrantes.
2. (F2). Familia de siete integrantes.

Esto permitió verificar el tipo y cantidad de PET a obtener y tener una proyección de los volúmenes y calidad que se puede recuperar.

El método utilizado fue el descrito en la figura 3:

Esto permitió contar con un registro de la calidad del PET que se encuentra en los envases de refresco de distintas marcas.

MODELOS DE SISTEMA: EXPERIMENTACIÓN, DETERMINACIÓN DE MORFOLOGÍA DE TIRAS
Se experimentó con diferentes tipos de cortes de botellas PET, identificando la morfología de la tira y la manera más práctica de integrar las mismas en un elemento constructivo.

Se trabajó sobre un modelo de fileteadora para aumentar el rendimiento, con el objetivo de que éste fuese de fácil construcción para implementar en un sistema de autoconstrucción.

EXPERIMENTACIÓN EN EL DESARROLLO DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO

DETERMINACIÓN DE MORFOLOGÍA Y FORMA DE INTEGRACIÓN DE PET RECUPERADO

Se determinaron por medio de un modelo matemático las cantidades y la forma del PET a utilizar. De acuerdo con la revisión de diversas investigaciones, se encontró que la morfología idónea para integrar el PET recuperado dentro de un sistema constructivo es en forma de tiras continuas, de acuerdo con Baldenebro (2015) y con Lopes de Oliveira (2017), donde se experimentó el trabajo del PET a flexión.

Se consideró un concreto correspondiente a elemento constructivo estructural; por lo que se tomó un $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$; además, al ser una propuesta de autoconstrucción, se deja un tiempo de fraguado de 28 días completos sin aplicación de acelerantes.

De acuerdo con los datos recolectados en el proceso de observación del PET recuperado en hogares, se considera integrarlo en tiras y se calculan con base en dos tipos de calibres del PET encontrados en botellas de refresco con la finalidad de considerar las variantes en los envases.

FIGURA 3. Proceso metodológico



A continuación se muestra el proceso de cálculo de los especímenes a ensayar con base en especificaciones del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Gobierno del Distrito Federal, 2004). (Ver figuras 4 y 5)

Se tomó a consideración la resistencia a la tracción (tensión) de las tiras de PET para incluirlo en el diseño de una viga simplemente apoyada con carga uniforme distribuida de 150 kg; con estos datos se calculó el momento flexionante que determinará el peralte del elemento (JQ, 2016).

Se añadió al elemento constructivo 1 cm de recubrimiento en el lecho inferior para la protección a la intemperie del refuerzo, por lo que para el espécimen se considera que será de 5 cm, teniendo una placa final de 100x25x5 cm.

En las figuras 6 y 7 se muestran ejemplos del cálculo del refuerzo necesario considerando un calibre de 0.4 mm y 0.3 mm.

FIGURA 4. Diseño de momento flexionante

Datos Propuestos:		Dimensiones:	
fy=	900 kg/cm ²	b (base)	25 cms 0.25
p=	0.009	d (peralte)	4 cms 0.04
f'c=	200 kg/cm ²		
Longitud	1.00 mts.		
W/L	150 kg		
Mr >= Mu			
Momento Flexionante:		Momento Ultimo	
$M = \frac{WL^2}{8}$		$Mu = 1.4 (1,875 \text{ kg/cm})$	
M= 19 kg/m		Mu= 2,625 kg/cm	

FIGURA 5. Diseño de momento resistente

Momento Resistente

$$Mr = Fr f'c b d^2 q (1-0.5q)$$

f'c=	0.8 f'c	=	0.8 200 kg/cm ²	q=	$\frac{900 \text{ kg/cm}^2}{136 \text{ kg/cm}^2} (0.009)$
f'c=	160 kg/cm ²			q=	0.059558824
f'c=	0.85 f'c	=	0.85 160 kg/cm ²		
f'c=	136 kg/cm ²				

$$d = \sqrt{\frac{Mu}{Fr f'c b d^2 q (1-0.5q)}}$$

$$d = \sqrt{\frac{2,625 \text{ kg/cm}}{0.9 (136 \text{ kg/cm}^2) (25 \text{ cms}) (0.060) (1 - 0.5 (0.060))}}$$

$$d = \sqrt{\frac{2,625 \text{ kg/cm}}{176.8227022}}$$

$$d = \sqrt{14.85} \quad d = 3.852970131 \quad \boxed{d = 4 \text{ cms}}$$

Entonces: Mr >= Mu

2,829 kg/cm >= 2,625 kg/cm Si satisface la condición reglamentaria

FIGURA 6. Determinación de cantidad de refuerzo 23 tiras

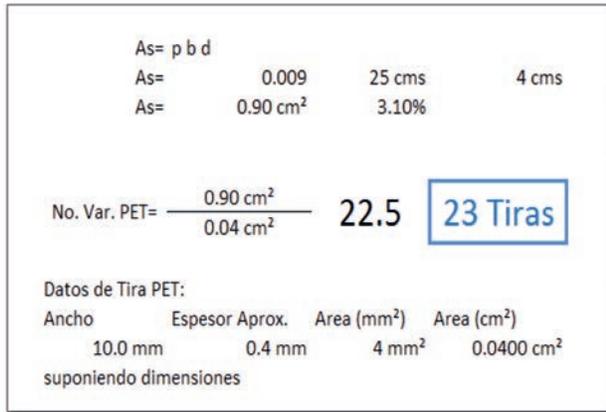
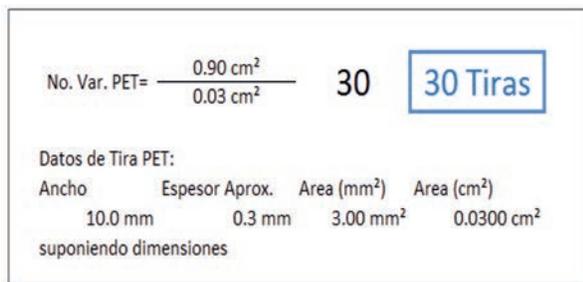


FIGURA 7. Determinación de cantidad de refuerzo 30 tiras



Por repartición de tiras, se colocaran en el espécimen 24 tiras de refuerzo y se calcula otro espécimen con un calibre de 0.3 mm.

El PET se insertó por perforaciones a los costados con un empotrado con grapa sobre la cimbra, lo anterior para evitar movimiento de la tira al colado.

CONSTRUCCIÓN DE CIMBRA

La cimbra se diseñó tomando en cuenta las medidas del elemento de 100x25x5 cm; se construyó con fajillas de madera y triplay así como con ochavos para las zonas de apoyo.

La construcción de la cimbra se elaboró dentro de los talleres de carpintería del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), siendo un diseño con materiales económicos, por lo que se utilizó madera de segunda. (Ver figuras 8 y 9)

FIGURA 8. Cimbra madera de pino

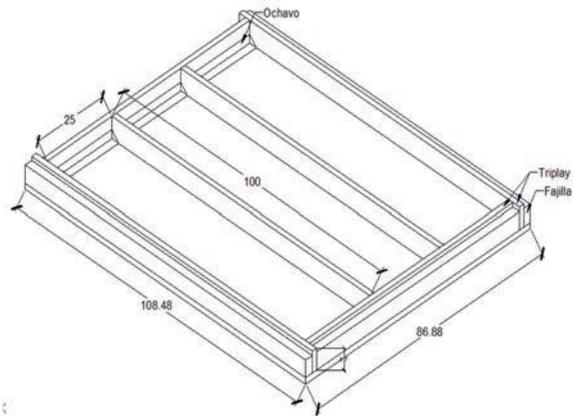


FIGURA 9. Construcción de cimbra de madera



Entre los observables, se encontró que los perfiles de madera en el mercado no conservan una estandarización de las secciones, los diferentes aserraderos pueden cambiar las medidas de sus perfiles, por lo que generar un diseño de cimbra fijo no es lo conveniente; el diseño anterior debe considerar su adecuación a los perfiles del elemento constructivo a colar.

FIJACIÓN DEL REFUERZO PET RECUPERADO

Dentro del laboratorio de suelos del ITESO se experimentó en la adecuada fijación del PET; se encontró que la estructura que recibe la tira de PET debe ser suficientemente rígida para tensar el PET y fijarlo sobre la propia estructura de la cimbra.

FIGURA 10. Fijación de PET en base de MDF

El diseño original planteó una frontera con corte láser sobre una placa de MDF (*medium density fiberboard*) que traslapara los orificios de fijación y permitiera la repartición de cada tira por separado; empero, sólo el corte láser podría variar de 30 a 50% más el costo de la cimbra, por lo que se se adecuó con un corte con sierra de precisión; sin embargo, la tensión del PET provoca que la frontera salga de su cuña. (Ver figura 10) Se requirió la adecuación de la cimbra montando el PET sobre una frontera de fajilla con una sola ranura, sobre la que se empaquetan las tiras de PET en grupos de tres, dando la siguiente repartición:

- Espécimen 24 tiras: ocho paquetes de tres tiras de aproximadamente 1 cm de ancho.
- Espécimen 30 tiras: 10 paquetes de tres tiras de aproximadamente 1 cm de ancho.

El montaje de los paquetes de tiras de PET se requirió empotrar con grapa para lograr tensar el material y poder estirar y reducir el efecto de espiral que provoca el corte de las botellas. (Ver figura 11)

Adicionalmente se probó un espécimen sin la integración de PET reciclado, con la finalidad de tener un elemento de control.

PRUEBAS DE LABORATORIO: DISEÑO DE EXPERIMENTO, PRUEBA A FLEXIÓN

Se determinó la variación en resistencia a flexión de elementos constructivos “tipo dovela” al in-

FIGURA 11. Montado de paquetes de tiras PET sobre cimbra

cluir tiras de PET de manera longitudinal a través de la prueba de flexión con dos puntos de apoyo y fuerza aplicada al centro.

La prensa universal utilizada cuenta con un espacio de trabajo con una superficie de 77 cm x 75 cm, se colocaron dos polines de madera de 3 1/2" x 3 1/2", de 1.50 de 1.30 de largo y dos más de la misma sección apoyados sobre los anteriores, para sobre éstos colocar la placa de PET, como se muestra en la siguiente imagen, esto para lograr una longitud entre apoyos de 100 cm:

Para la aplicación de la carga se utiliza una barra trapezoidal al centro que transmite la fuerza de la prensa hacia el elemento constructivo; cada una de las placas se colocó sobre las bases de madera, ubicando el pistón de la prensa como centro para recibir la fuerza. (Ver figuras 12 y 13)

FIGURA 12. Diseño de adaptación en prensa universal

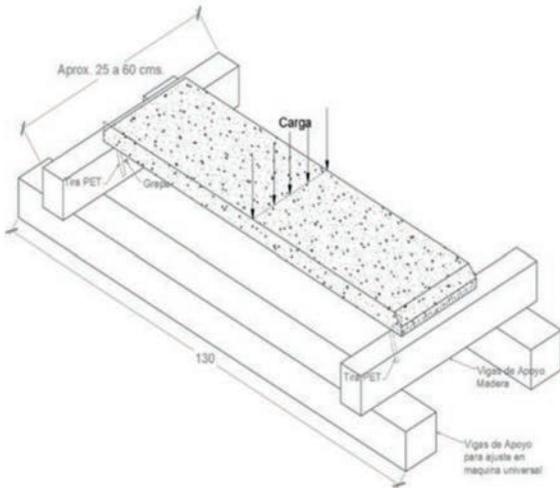


FIGURA 13. Colocación de probetas sobre vigas de madera



Se elaboró un registro de los datos de carga y deformación

RESULTADOS Y ANÁLISIS

DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de los ejercicios de observación: “Recuperación de PET en hogares”, “Experimentación en el desarrollo del sistema constructivo” y “Pruebas a flexión”, permiten

replantear los diferentes tipos de diseño del sistema constructivo a través de una revisión cualitativa de las características para comprobar la viabilidad de su uso.

INTERPRETACIÓN DE HALLAZGOS

De acuerdo con el instrumento “Recuperación de PET en hogares” y de la “Experimentación en el desarrollo del sistema constructivo”, así como de las pruebas a flexión, a continuación se enlista la interpretación de los hallazgos.

RECUPERACIÓN DE PET EN HOGARES

FAMILIA DOS INTEGRANTES (F1)

El PET recolectado es preponderantemente refresco, seguido de comida; en el caso de F1, el PET recolectado se observa limpio en su mayoría, haciendo más fácil el proceso de transformación, el período de recolección se elaboró del 2 de diciembre de 2017 al 1 de marzo de 2018, captando un total de 741.8 gramos, dando 370.9 gramos por persona y 123.63 gramos/persona/mes.

A continuación se enlistan los principales observables en esta herramienta:

1. Se observa mayor calibre en el corte de la boca, reventó cúter, por lo que se busca nuevo método de corte (mototul).
2. Se observa la dureza con Dremel®, se requiere aplicación de esfuerzo para lograr cortar calibres mayores de 1.5 mm.
3. La fricción produce calor que provoca que se funda el material.
4. Cono probable utilizar para tiras.
5. Las revoluciones del Dremel® provocan pérdida por la rebaba.
6. Se observa polvo de PET como residuo.
7. Existe un margen de error de uno a dos gramos al pesar el material.
8. Los diseños de las botellas dificultan la pre-selección.
9. Considerar el pegamento existente de botellas en lavado.
10. Etiqueta se retira mejor al cortar la hoja.

Los resultados cuantitativos en relación de peso se presentan a en el cuadro 1.

CUADRO 1. Resultados totales familia F1

Totales generales	
713.60	Total salida de gr.
28.20	Diferencia
280.60	Gramos PET para tiras (cuerpo)
433.00	Gramos PET para grano (boca, cono y fondo)
4.80	Calibre de 0 a 0.2 gr
10.20	Calibre de 0.2 a 0.4 gr
31.20	Calibre de 0.4 a 0.6 gr
63.00	Calibre de 0.6 a 0.8 gr
6.40	Calibre de 0.1 a 1.0 gr
317.40	Calibre de 1 a 3 gr

FAMILIA SIETE INTEGRANTES (F2)

El PET recolectado es preponderantemente refresco, seguido de comida; en el caso de la familia de siete integrantes el PET recolectado se observa sucio en su mayoría, haciendo más difícil el proceso de transformación.

El periodo de recolección se elaboró del 2 de diciembre de 2017 al 1 de marzo de 2018, captando un total de 2,916.4 gramos, dando 416.63 gramos por persona y 138.88 gramos/persona/mes.

A continuación se enlistan los observables en esta herramienta:

1. Se utilizan guantes de carnaza y lentes de protección al equipo de trabajo.
2. La catalogación por familia de refresco ayuda a determinar con mayor claridad los tipos de botella.
3. El cambio de diseño en cada una de las botellas de Coca-Cola® no ayuda en la estandarización.
4. Las pérdidas se observan en la rebaba por el corte, la etiqueta, así como los restos de la tapa-rosca.
5. Azúcar pegada dificulta el proceso de selección.
6. El equipo de corte en los calibres más grandes se ve forzado, se mueve a pesar de la extensión.

ANÁLISIS DE HALLAZGOS

Los resultados cuantitativos en relación de peso se presentan a continuación:

CUADRO 2. Resultados totales familia F2

Totales generales	
2,852.60	Total salida de gr.
63.80	Diferencia
1,278.00	Gramos PET para tiras (cuerpo)
1,574.60	Gramos pet para grano (boca, cono y fondo)
0.00	Calibre de 0 a 0.2 gr
233.70	Calibre de 0.2 a 0.4 gr
189.70	Calibre de 0.4 a 0.6 gr
90.00	Calibre de 0.6 a 0.8 gr
0.00	Calibre de 0.1 a 1.0 gr
1,061.20	Calibre de 1 a 3 gr

En general se observa que la recolección por persona no ofrece grandes cantidades del plástico que ameriten el diseño de un prototipo de mollienda por vivienda, por lo cual se buscará un procedimiento estandarizado o con accesorios tecnológicos que exista en el mercado.

La catalogación de este PET a partir de los calibres como lo muestra la gráfica, (Ver figura 14) nos permite establecer las calidades por calibres para la determinación de procesos de calidad, para compararlos con los productos en el mercado.

El análisis específico nos permitirá determinar la cantidad de PET a integrar dentro de la mezcla y su disposición en tiras para trabajo a flexión, con base en los promedios obtenidos por persona mostrados en la figura 15 y cuadro 3.

De acuerdo con los resultados de los estudios elaborados en el diseño experimental y en los estudios establecidos en el estado del arte, parece factible el uso del PET como elemento constructivo por su comportamiento a la flexión, por lo tanto, de acuerdo con la demanda en sistemas constructivos de concreto se determina el punto de partida para establecer el diseño de experimentos de laboratorio a elaborar.

La posibilidad de ser integrado el PET reciclado como refuerzo estructural, se determinará a través del método de prueba establecido en la

FIGURA 14. Gramos recuperados

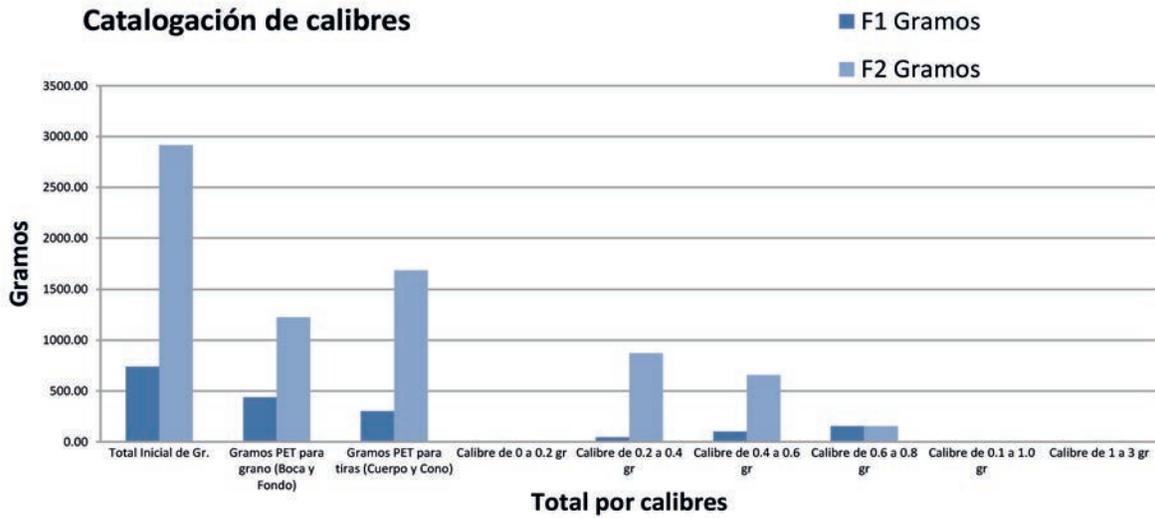
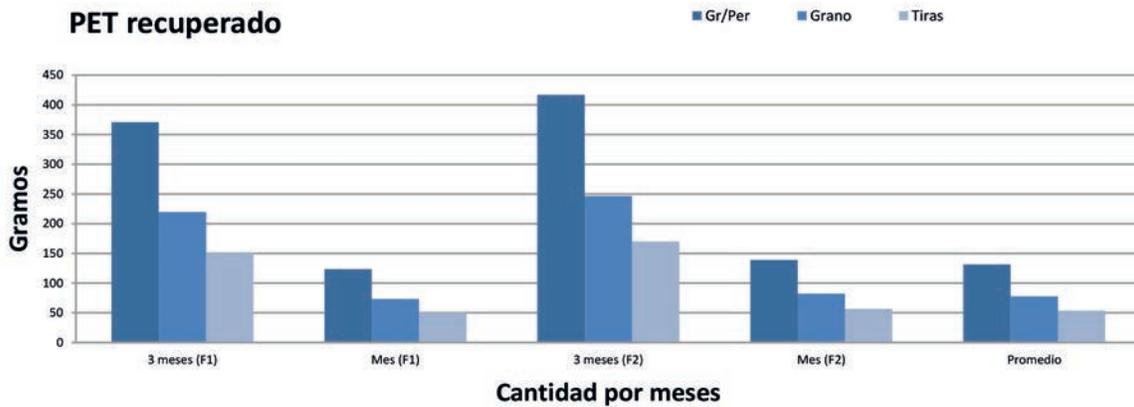


FIGURA 15. PET grano y tiras



CUADRO 3. Promedios PET por persona

Captación por persona	Gr/Per	Grano	Tiras
3 meses (F1)	370.9	219.55	151.35
Mes (F1)	123.6333333	73.18333333	50.45
3 meses (F2)	416.6285714	246.6185033	170.0100682
Mes (F2)	138.8761905	82.20616775	56.67002272
Promedio	131.2547619	77.69475054	53.56001136

Norma NMX-C-303-ONNCCE-2010 (DOF, 2010), en la cual se establecerán los parámetros de las mezclas para la determinación de la resistencia a la flexión.

En un sentido puntual podemos enlistar los siguientes hallazgos:

1. Se observó que el procedimiento de transformación manual no puede ser aplicado en la transformación en hogares, y el costo que

- se paga por kg no permite el diseño de un modelo integrado en hogares.
2. El PET en fibras mejora las características del concreto; sin embargo, es en tiras continuas donde se pueden obtener mejores resultados de acuerdo con Baldenebro (2015), y las pruebas a tensión ejecutadas a tiras de PET.
 3. Al ser el refresco el principal envase que se encuentra en la recolección, se puede buscar el apoyo de dichas compañías para crear campañas de recolección.
 4. Pensando en un sistema de transformación del PET reciclado, se observó que los envases con diseño estandarizado como el de la familia Pepsi® son los idóneos, puesto que presentan una forma cilíndrica y uniforme en todos sus envases.
 5. El cuerpo de las botellas es la mejor parte del envase para transformar en tiras, ya que el corte del cono provoca una deformación excesiva.
 6. Los envases que se utilizarán (refrescos) tienen un calibre de 0.2 mm a 0.6 mm, dato que se toma para determinar la sección del refuerzo con PET.
 7. Un modelo casero para obtener el producto (PET tiras continuas) y usarlo en el desarrollo de los prototipos, es el más adecuado.

EXPERIMENTACIÓN EN EL DESARROLLO DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO

En el desarrollo del sistema constructivo se encuentran distintas problemáticas al momento de la ejecución, que deben ser tomadas en cuenta para la mejora del sistema, así como el aprovechar las características a favor en el sistema, de las que a continuación se puntualizan.

Sobre el proceso del corte de las botellas de PET para obtener las tiras, se puede consultar el anexo 1. Los principales resultados se enlistan a continuación:

1. El corte de PET con tijeras produce discontinuidad que debe ser considerada al momento de la recopilación de datos; sin embargo, este

mismo recorte ayuda a la fijación del PET con la mezcla de concreto.

2. La construcción de una fileteadora de corte podría ayudar a mejorar los rendimientos; sin, embargo requiere destreza adicional para lograr un corte uniforme, por lo tanto un corte con tijera puede ser más propio para el sistema constructivo.

Sobre la construcción de la cimbra se puede concluir lo siguiente:

1. El material a utilizar en la integración de la cimbra debe ser únicamente madera o algún material accesible económicamente y manejable con herramientas convencionales, ya que integrar procesos digitales como el corte láser para la perforación de fronteras, incrementa los costos.
2. El material de las fronteras que va a recibir la tensión del PET debe contener un material rígido para un adecuado montaje y fijación de este refuerzo.
3. La textura del PET no permite un amarre manual, por lo que su fijación debe ser mecánica, la fijación con grapas sobre la estructura de la cimbra es una opción para lograr la tensión y desdoblar las curvaturas propias de las botellas.

EXPERIMENTACIÓN PRUEBA A FLEXIÓN

Como ejemplo del análisis de los datos recabados de las pruebas a flexión, se muestran los resultados de las siguientes pruebas:

- Muestra sin PET – Muestra 24 tiras de refuerzo.

Se presenta una comparación de las muestras sin PET contra las reforzadas con PET recuperado (figuras 16 y 17).

En la figura 16 se muestra que la inclusión del PET en tiras como elemento de refuerzo baja la capacidad de carga; sin embargo, la ruptura completa del elemento constructivo no se comporta de la misma manera ya que permite una falla dúctil contra una frágil que tendría sin refuerzo, al conservar capacidad de carga cuando el elemento sin PET ya se ha desplomado.

FIGURA 16. Gráfica comparativa: muestra sin PET - muestra 24 tiras de refuerzo

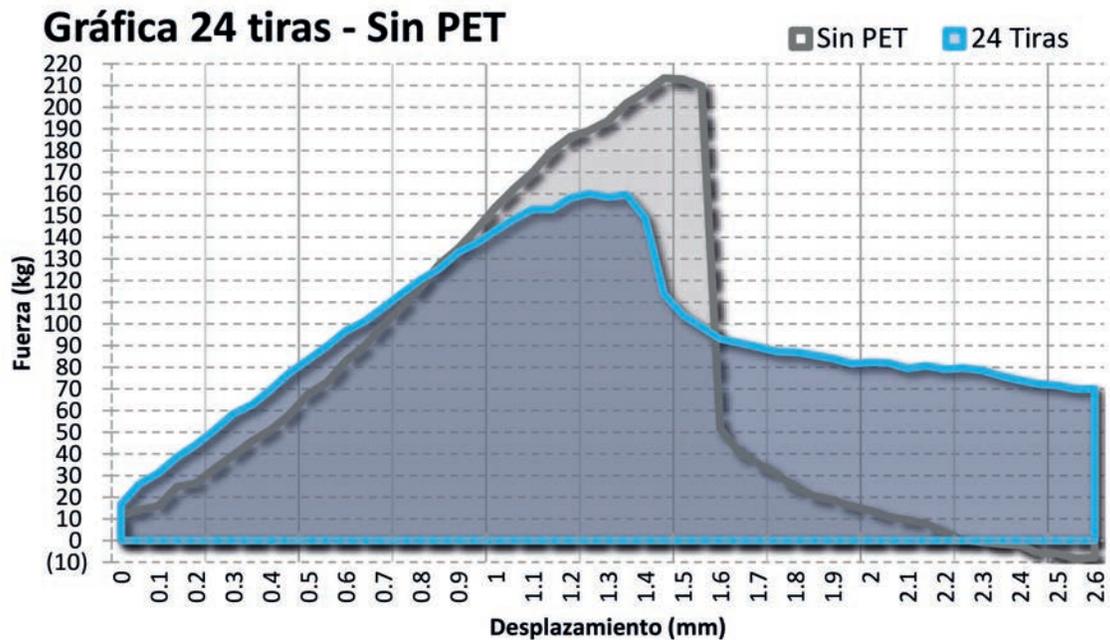
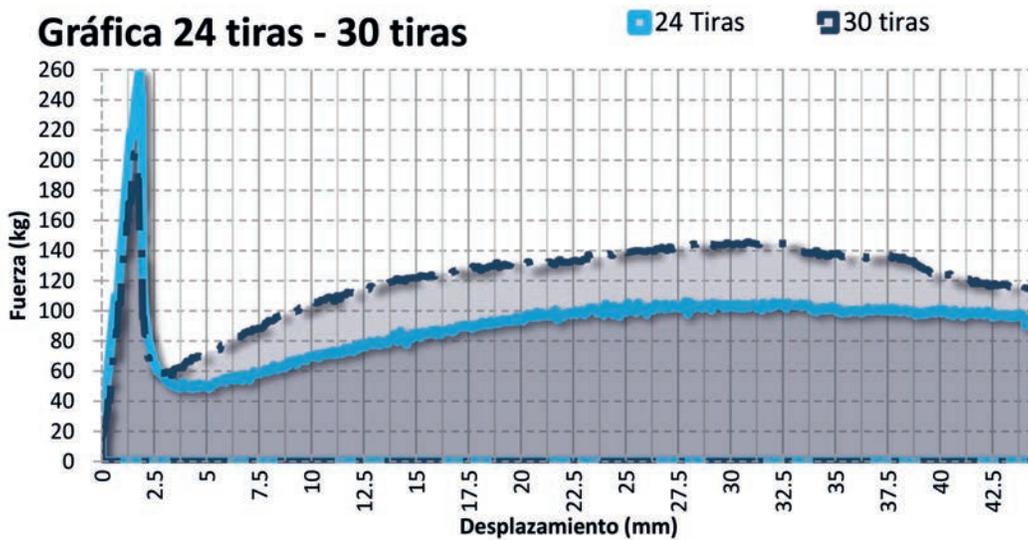


FIGURA 17. Gráfica comparativa: muestra 24 tiras de refuerzo - muestra 30 tiras de refuerzo



Lo anterior permitió establecer puntos de acción en la integración de nuevos elementos constructivos y su probable aplicación al tomar en cuenta el comportamiento físico del PET ante las cargas a flexión, si bien no se integra con la mezcla de

concreto, la deformación es menor cuando el PET actúa por sí solo, como se demuestra en la siguiente gráfica (figura 17), donde se compararon dos muestras con diferentes cantidades de refuerzo del PET.

DISCUSIÓN

El análisis cualitativo de los resultados y hallazgos obtenidos permitió determinar las siguientes consideraciones para la elaboración de futuros estudios.

La recuperación se elaboró del 2 de diciembre de 2017 al 1 de marzo de 2018, tomando dos perfiles de familias (F1 y F2), una con aceptable recuperación de desechos (F1) y otra con baja recuperación de desechos (F2), encontrando una diferencia de 15.24 gr/per/mes, siendo una diferencia de aproximadamente 10%. Para cálculos pragmáticos se tomó un promedio de 131.25 gr/per/mes; sin embargo, sería necesario un estudio estadístico para determinar esta cantidad en un lugar específico de estudio.

La fijación de las tiras de PET recuperado por medio de la experimentación permite darse cuenta de que el plástico tiende a conservar la forma de espiral del corte con tijera, por lo que es necesario tensar las tiras para hacer uniforme la línea de refuerzo sobre el elemento constructivo.

El amarre de las tiras de PET recuperado permite dar la tensión adecuada para estirar las tiras de PET; sin embargo, la textura y dureza del material no permite un amarre manual con nudos, por lo que se requirió fijar con grapas y dejar empotrado en cada extremo.

El trabajo con madera en combinación con el PET permitió percatarse de que son sistemas compatibles puesto que una fijación sobre un sistema de acero se complicaría, la fijación con grapa puede ser fácilmente adaptable a estructuras de madera o materiales blandos como el bambú.

Los resultados en las muestras sometidas a las pruebas a flexión indican que el sistema constructivo debe ser sometido a una reconsideración, puesto que el PET redujo la capacidad de carga del elemento; sin embargo, se deberá experimentar integrando paquetes de PET con una separación mayor, para evitar la creación de juntas frías y un elemento de concreto más homogéneo. No obstante, la falla dúctil del elemento puede tomarse en cuenta para el diseño de elementos de protección en caso de desastres.

La determinación mediante modelos matemáticos y la experimentación con pruebas mecánicas de los materiales alternativos puede permitir dar certeza de la seguridad estructural, desmitificando la idea de su baja calidad.

CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

De acuerdo con los hallazgos obtenidos, se afirma que entre los mayores inconvenientes para captar el insumo PET reciclado está la recolección y transformación, por lo que debe ser implementado en programas de recolección con el apoyo de la iniciativa pública y privada en la integración de las comunidades hacia un cambio de conciencia en la disposición de los desechos.

Los métodos de transformación del PET se establecen en la forma de tiras continuas, por ser éstas las que brindan mejores resultados a flexión, así como para el resto del PET reciclado se recomienda el desarrollo de investigaciones de transformación por inyección para evitar la disposición final en tiraderos y rellenos sanitarios.

Se recomienda continuar con el desarrollo de investigaciones en otros elementos constructivos que trabajen a la flexión, en aprovechamiento de las bondades que nos brinda el material; al poder integrar tiras continuas se pueden elaborar geometrías como paraboloides e hiperboloides, tensándolos sobre estructuras principales y recibiendo cargas ligeras.

El uso de PET recuperado en este sistema constructivo permite evitar la disposición final de un porcentaje del mismo, además de brindar una nueva alternativa a los sistemas constructivos alternativos.

Las características físicas del PET permiten el diseño de nuevos modelos de sistemas constructivos para el desarrollo de tecnología que habilite el aprovechamiento del desecho sólido; no obstante, el desarrollo de pruebas de laboratorio así como análisis de observación permiten ofrecer sistemas estructuralmente aptos y seguros para la aplicación en la autoconstrucción.

De acuerdo con la recolección obtenida, se observó que el principal producto que se consume en envase de PET es el refresco. La marca de la familia Pepsi® es la que cuenta con un diseño estandarizado y por lo tanto más propio para el proceso de transformación en tiras.

AGRADECIMIENTOS

Se presenta este trabajo como parte de la investigación para el trabajo de obtención de grado (TOG) en la Maestría de Proyectos y Edificación Sustentables del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Instituciones a las cuales se agradece el apoyo prestado para llevar a cabo la investigación. Así también se agradece el apoyo para elaborar los experimentos al Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano del ITESO y al personal de los laboratorios de suelos y carpintería de la misma institución, ya que sin ellos no se pudiesen haber llevado a cabo dichos experimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Tulaian, B., Al-Shannag, M., y Al-Hozaimy, A. (2016). Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, núm. 127, pp. 102-110.
- Ávila, A. P., Campos, A. J., y Encarnación, G. (2013). *Estudio de análisis de ciclo de vida (ACV) del manejo de envases de bebidas de polietileno tereftalato (PET) en la fase de posconsumo*. INECC.
- Baldenebro, F. (2015). *Estudio numérico-experimental de fibras de PET y su comportamiento en una matriz de concreto*. Chihuahua, Chihuahua: Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C.
- Borg, R., Baldacchino, O., y Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, núm. 108, pp. 29-47.
- Cacelín, J. (2016, 28 de junio). *ROCAPET, el principio de construcciones sustentables*. Recuperado el 6 de mayo de 2018, de Agencia Informativa Conacyt: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/8474-rocapet-el-principio-de-construcciones-sustentables-nota>
- Day, R. (1998). *How to write and publish a scientific paper*. Canadá: Orix Press.
- Espinosa, F. (2016). *Caracterización de botellas PET para su uso como elementos constructivos de muros de carga*. Repositorio ITESO.
- Gaggino, R. (2003). Elementos constructivos con PET reciclado. *Tecnología y Construcción*, 19(II): 51-64.
- Gaggino, R., Arguello, R., y Berretta, H. (2007). IV Encuentro Nacional e II Encuentro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. *Aplicación de material plástico reciclado en elementos constructivos a base de cemento* (pp. 906-915). Córdoba, Argentina: Centro Experimental de la Vivienda Económica.
- Gobierno del Distrito Federal. (2004). *Reglamento de construcciones del Distrito Federal*. Distrito Federal: Administración Pública del Distrito Federal.
- Grau, J. (2018). *Eco concretos*. Recuperado el 6 de mayo de 2018, de <http://www.concretoecologico.com.mx/>
- H. Congreso de la Unión. (2017, 13 de abril). Cámara de Diputados. Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/Comunicacion/Boletines/2017/abril/13/3469-En-Mexico-90-millones-de-botellas-de-plastico-de-refrescos-y-agua-son-lanzados-a-la-via-publica-rios-y-mares>
- Jo, B.-W., Park, S.-K., y Park, J.-C. (2008). Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, núm. 22, pp. 2281-2291. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.009.
- JQ. (2016, 20 de julio). *PET: Datos técnicos*. Recuperado el 4 de julio de 2018, de <http://www.jq.com.ar/imagenes/productos/pet/dtecnicos/dtecnicos.htm>
- Kim, S., Yi, N., Kim, H., Kim, J., y Song, Y. (2010). Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement & Concrete Compositers*, núm. 32, pp. 232-240. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002.
- Lopes, E., De Oliveira, A., y Gomes, A. (2017). Optimization of mechanical properties in concrete

- reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete. *Elsevier*, pp. 837-848.
- Macías, H. (2017). *Tierra vertida + PET, una aportación al sistema constructivo de muros de botellas de PET rellenas de tierra; caso Centro Comunitario La Mezquitera*. Repositorio ITESO.
- Ochi, T., Okubo, S., y Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement & Concrete Composites*, núm. 29, pp. 448-455.
- Poder Legislativo Federal. (2010). Norma NMX-C-303-ONNCCE-2010 Determinación de la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro. *Diario Oficial de la Federación*. México.
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M., Allahyari, H., y Nikbin, I. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, núm. 47, pp. 1302-1308.
- Rodas, C. V., y Ordóñez, J. F. (2016). *Desarrollo tecnológico, investigativo y experimental de ecobloques de hormigón con base en vidrio y polietileno de teraftalato (PET) reciclado, como alternativa sustentable al bloque tradicional*. Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay.
- Saikia, N., y De Brito, J. (2013). Waste Polyethylene Terephthalate as an Aggregate in Concrete. *Materials Research*, 16(2): 341-350. doi: 10.1590/S1516-14392013005000017.
- . (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, núm. 52, pp. 236-244.
- Salcedo, O. F. (2014). Sistema de construcción de vivienda sustentable a base de tabique de plástico reciclado. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, núm. 15, enero-junio, pp. 109-125.
- Santamarina, R. E. (2015). *Caracterización de material compuesto PET-vidrio*. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Silva, D., Betioli, A., Gleize, P., Roman, H., Gómez, L., y Ribeiro, J. (2005). Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, núm. 35, pp. 1741-1746. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.040.
- Tolozano, M. C. (2016). *Uso de bloques de plástico reciclado para vivienda de interés social para mejoramiento de su micro-clima, Plan "Socio Vivienda", del cantón Guayaquil, provincia del Guayas, zona 8*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil.
- Trespalacios, C. D. (2017). *Implementación de un sistema de aligeramiento de losas de entrepiso de concreto con botellas PET y cartón*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Valis, D. (2016, septiembre). *Diseñan sistema de construcción ecoeficiente*. Recuperado el 6 de mayo de 2018, de Agencia Informativa Conacyt: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/materiales/10427-disenan-sistema-de-construccion-ecoeiciente>
- Velardi, H. (2011). *Análisis y evaluación de las características termofísicas de un sistema constructivo desarrollado con botellas reutilizadas de PET y su análisis comparativo con otros sistemas constructivos. Un caso de estudio en Azcapotzalco*. México, DF: Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).
- Yazoghli, O., Dheilily, R., y Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*, núm. 27, pp. 310-318. doi: 10.1016/j.wasman.2006.03.012.
- Zambrano, E. (2015). *Diseño de elementos constitutivos para el espacio interior mediante el reciclaje de plástico PET*. Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay.

ANEXO. TRANSFORMACIÓN DE LAS BOTELLAS PET EN TIRA CONTINUA

Para la obtención de tiras continuas se trabajó sobre un primer modelo a base de láminas de MDF de 3 mm, sobre el cual se elaboraron cortes con una mini-sierra caladora, sobre la cual se colocaron pijas y rondanas que permitieran dar el ancho deseado de la tira. (Ver figuras 18 y 19)

FIGURA 18. Cortes de acuerdo con botella



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 19. Corte mini-sierra



Fuente: Elaboración propia.

Cabe hacer la aclaración de que las herramientas utilizadas en el experimento pueden ser reemplazadas con alguna otra herramienta de uso común en obra, como lo puede ser una segueta de arco. Los cortes elaborados se diseñaron con la forma circular de la botella con el objeto de

guiar la botella y para que tenga el menor movimiento posible.

En el primer modelo de fileteadora se observó que la botella no se guiaba correctamente, el propio peso de la botella no permite que se conserve sobre la guía, por lo que se decidió trabajar sobre un modelo con fajilla. (Ver figura 20)

FIGURA 20. Fileteadora 1



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 21. Corte fajilla

Fuente: Elaboración propia.

El resultado fue una estructura más firme y con una guía de la botella más uniforme en relación con el primer modelo; sin embargo, como se muestra en la siguiente imagen, la navaja se forzó y al corte de las botellas se puede romper. (Ver figuras 21, 22 y 23)

FIGURA 23. Rotura de navaja por exceso de tensión

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 22. Montado de navaja

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, los cortes con fileteadora casera no fueron uniformes, las guías se mejoraron con el modelo 2; empero, se requiere de práctica para mejorar la habilidad de corte, lo que limitaría el proceso de aprendizaje a corto plazo para un sistema de autoconstrucción; para tener un mejor control y uniformidad del corte del material a ensayar se tomó la decisión de ejecutarlos con tijera.

El resultado del corte con tijera resultó con mayor aprendizaje a corto plazo, al permitir extensiones de tiras más largas, de hasta 1.5 metros de longitud y de hasta tres metros en botellas de dos litros (véase figura 24), lo que permitió colocar la tira “sin uniones”, evitando los traslapes, además de dejar leves rasgaduras a lo largo del corte que pudieran permitir mayor adherencia con la mezcla de concreto; esto permitió determinar al corte con tijera como el método más adecuado para el sistema en autoconstrucción.

FIGURA 24. Corte con tijera



Fuente: Elaboración propia.