

Propuesta de diseño de una mezcla de concreto PET para utilizarlo en la elaboración de mobiliario urbano

Design Proposal for a Mixture of PET Concrete Using it in the Preparation of Urban Furniture

Recibido: octubre 19 / 2023 • Evaluado: mayo 21 / 2024 • Aceptado: agosto 2 / 2024

CÓMO CITAR

Morales-Guzmán, C. C., & Ceballos-Vargas, J. (2025). Propuesta de diseño de una mezcla de concreto PET para utilizarlo en la elaboración de mobiliario urbano. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 27(1), 45-64. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2025.27.5598>

Carlos César Morales-Guzmán*
Universidad Veracruzana, Poza Rica. Veracruz (México)
Facultad de Arquitectura

Jesús Ceballos-Vargas**
Universidad Veracruzana, Poza Rica. Veracruz (México)
Facultad de Arquitectura

RESUMEN

Esta investigación presenta una alternativa tecnológica para el reúso de un material, actualmente en condición de desecho en la ciudad, que representa un contaminante obstructivo y visual. El porcentaje de aprovechamiento del reciclado de tereftalato de polietileno (PET, por sus iniciales en inglés) es bajo o nulo, por lo que en este trabajo se plantea el aprovechamiento de dicho material en condición de desuso. Se ha identificado una nueva cadena de valor con el diseño de una mezcla de concreto en la que se emplee el reciclado de PET como agregado. En este estudio se hizo un trabajo de recolección, limpieza, triturado y tamizado de PET, con el fin de utilizar el producto reciclado en el diseño de la mezcla para la fabricación de mobiliario urbano. En consecuencia, los resultados indican la probable factibilidad del uso del PET como agregado en una concentración del 5% con potencialidad de hasta el 10% con una resistencia compresiva entre 167-132 kg/cm².

Palabras clave

construcción; mobiliario urbano; manufactura; materiales; reciclado del PET

ABSTRACT

This study presents a technological alternative for the reuse of a material, currently in waste condition in the city, which represents an obstructive and visual pollutant, this, due to the fact that the percentages of use of PET (Polyethylene Terephthalate) recycling is low and to a large extent ends up without being used, so this dissertation has considered the use of this material in disuse condition, identifying a new value chain with the design of a concrete mixture in which PET recycling is used as an aggregate, so in this study a work of collection, cleaning, crushing and sifting was carried out to later use the recycled PET in the design of the mixture for the manufacture of street furniture. Consequently, the results indicate the probable feasibility of using PET as an aggregate in a concentration of 5% with the potential of up to 10% with a compressive strength between 167 - 132 kg/cm².

Keywords

construction; manufacture; materials; PET recycling; street furniture

- ✱ Arquitecto, Universidad Veracruzana. (México).
Maestría en Diseño Arquitectónico y Bioclimatismo, Universidad Cristóbal Colon. (México).
Máster en Ingeniería Estructural, Universidad Camilo José Cela. (España).
Doctor en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México. (México).
Doctor en Estructuras de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid. (España).
<https://scholar.google.com.mx/citations?user=zybPU0wAAAAJ&hl=es>
orcid.org/0000-0002-4499-6968
dr.arqmorales@gmail.com
- ** Arquitecto Universidad Veracruzana. (México).
Maestría en Construcción. Universidad Veracruzana. (México).
Doctor en Educación. Instituto Veracruzano Superior. (México).
<https://orcid.org/0000-0001-8263-2420>
jceballos@uv.mx

INTRODUCCIÓN

En esta investigación se presenta una alternativa tecnológica para el reúso del PET, material que se encuentra como desecho o basura en las ciudades, esto debido a que cada día se complica más el manejo de los residuos por el crecimiento de la población. Con el aprovechamiento de este material en desuso se busca impulsar una iniciativa que conduzca a un manejo adecuado del material PET, teniendo en consideración la normatividad vigente en materia ambiental y su impacto en proyectos de construcción urbana en México.

En el mundo existe una gran problemática surgida por la cantidad de basura que se genera en las ciudades, un claro ejemplo es la isla de la basura mejor conocida como “el séptimo continente”, que se encuentra en el Pacífico norte. Las estimaciones de su tamaño varían, desde los 700.000 hasta los 1,5 millones de kilómetros cuadrados de extensión. Los plásticos representan la mayor parte, por el creciente volumen de residuos, lo que ha puesto en peligro la supervivencia de especies debido a que la mayoría de estos residuos son pequeñas partículas que ingieren peces y aves, lo que repercute en la cadena alimentaria. Toda esa basura proviene de los residuos que desechan los barcos y en las costas, ocasionando una problemática al ecosistema (Iberdrola, 2015; Secretaría de Desarrollo Social [Sedesol], 2020).

Esta investigación está orientada a aprovechar el PET como residuo sólido urbano (RSU) generado en las ciudades para enfocarlo hacia una nueva cadena de valor en el diseño de mezclas de concreto como material de construcción dentro de la misma ciudad, teniendo como premisa disminuir el impacto causado por este tipo de residuos en la ciudad y en la zona conurbada, y lograr con ello un beneficio social en cuanto a un mejor manejo de la basura y la oportunidad de reciclado en obras para la comunidad.

La valoración de reúso del PET permite reducir el impacto ambiental debido a una disminución de volumen de desechos emitidos hacia los basureros a cielo abierto y, adicionalmente, por menor explotación de canteras para la extracción de agregados pétreos (grava y arena); igualmente, por menor explotación de suelos de canteras de calizas y arcillas (materia prima del cemento). Al mismo tiempo que se reducen los daños ambientales por deforestación y afectación de cuencas y cauces naturales de los ríos, en la generación de materias primas para el cemento (Gaggino, 2008; Sáez & Urdaneta, 2014; Benítez et al., 2019; Brañes, 2000, Botero et al., 2014).

El aprovechamiento del PET estará orientado en este trabajo hacia la industria de la construcción, en la que preliminarmente se han identificado oportunidades para su uso en el diseño de una mezcla de concreto experimental, utilizando el PET como agregado parcial al concreto en la elaboración de mobiliario urbano, dejándonos valores de resistencia y usabilidad en el trabajo de la mezcla. Este desarrollo será elaborado en la primera fase de la investigación, ya que se deben determinar varias pruebas de ruptura y de resistencia en las muestras posteriores. En este trabajo solo se presentarán las pruebas básicas de granulometría y resistencia de la mezcla en cilindros de prueba que serán incluidos en propuestas de mobiliario urbano (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2015; Iberdrola, 2018).

Justificación

La justificación de este estudio está orientada al aprovechamiento del PET como RSU generado en la ciudad Poza Rica, Veracruz, para enfocarlo hacia una nueva cadena de valor en el diseño de mezclas de concreto como material de construcción experimental dentro de la misma ciudad.

Es importante destacar que México es el país líder en América en la recuperación de residuos de envases de PET, así como líder mundial en reciclaje botella a botella de grado alimenticio. Algunas cifras de interés son las siguientes (Castellot, 2014):

- En los últimos 12 años, México ha acopiado más de 2 millones de toneladas de envases de PET posconsumo, 428.000 toneladas en 2013, con un valor de recuperación del 60%.
- La experiencia de 12 años servirá para fomentar el acopio de otros materiales además del PET.
- Este 60% es mayor respecto a países como Brasil, 42%; Canadá, 40%; Estados Unidos, 31%, y la Unión Europea, 25% en valores promedio.

El objetivo general es elaborar una mezcla de concreto aprovechando el PET en desuso como agregado parcial para la construcción de mobiliario urbano, y hacer pruebas de experimentación para definir la concentración adecuada de material reciclado de PET para efectuar diferentes ensayos de resistencias mecánicas del cemento, de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas y la ASTM (Secretaría del Trabajo y Previsión Social [STPS], 2019).

METODOLOGÍA

Recolección, limpieza y triturado (selección de mallas) de PET

El PET, particularmente en forma de botellas de plástico, se presenta como una opción viable para la reutilización en la industria de la construcción, especialmente en la fabricación de mobiliario urbano. Es notable que, en la actualidad, tanto en Poza Rica de Hidalgo, Veracruz, como en muchas otras ciudades del país, el consumo de bebidas embotelladas está profundamente arraigado. Se ha observado un incremento en el número de puntos de venta que ofrecen bebidas envasadas en botellas de plástico, fenómeno influenciado significativa-

mente por disciplinas como la Mercadotecnia y la Publicidad. Para este trabajo, se llevó a cabo la recolección de PET procedente de diversas fuentes, una tarea relativamente sencilla debido a la facilidad con la que este material puede ser recogido (Juárez et al., 2011; Lebreton et al., 2018).

Pasos del proceso de preparación del PET

1. Se visitaron establecimientos donde se expendían bebidas envasadas en botellas de plástico, con la finalidad de recolectar y cuantificar cantidades (Figura 1).

Figura 1. Agrupación de botellas de PET



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

2. Se procedió a realizar la limpieza de las botellas de plástico recolectadas. Se eliminan restos de suciedad en su interior, se retiran las

etiquetas, los aros y tapas a las botellas, ya que no formaban parte de lo que se buscó recolectar (Figura 2).

Figura 2. Limpieza de botellas de plástico



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

3.

Luego, se procedió a comprimir manualmente girando los envases para triturarlos en una máquina de tamaño reducido, ubicada en el laboratorio. Este proceso se dividió en varias etapas de trituración para lograr la progresiva reducción de las hojuelas, hasta
- alcanzar los tamaños necesarios para las pruebas requeridas.

Con base en normas oficiales, la eficiencia del proceso, revisión de literatura y las pruebas que fueron realizadas se seleccionaron las mallas número ocho, diez, veinte y cincuenta (Figura 3).

Figura 3. Botellas comprimidas (superior izquierda), trituradora de PET (superior derecha), hojuelas de PET de distintos tamaños



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

El siguiente proceso fue el lavado de las hojuelas de PET dentro de una malla convencional a modo de bolsa, se agregó jabón de lavar (surfactante); se agitó la bolsa hasta lograr espuma y el retiro de la suciedad, posteriormente se enjuagó con agua hasta retirar todo

el jabón y cualquier resto ajeno a las hojuelas (Figura 4).

Para el secado, se colocaron las hojuelas de PET sobre una alfombra plástica a temperatura ambiente (Figura 5).

Figura 4. Lavado de hojuelas de PET



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Figura 5. Secado de hojuelas de PET



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Las hojuelas de menor tamaño se colaron en tamices cuyos números de malla fueron: ocho, diez, veinte y cincuenta, respectivamente, hasta

envasar cinco kg en cada malla, para luego destinarlos a la realización de pruebas de laboratorio (Figura 6).

Figura 6. Tamizado de hojuelas de PET



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Por último, se procedió a envasar las hojuelas de PET, en contenedores de plástico transparente, clasificándolos de acuerdo con el número

de malla y colocando a cada uno de los envases una etiqueta adherible (Figura 7).

Figura 7. Envases con diferentes triturados de hojuelas de PET clasificadas en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Los materiales utilizados para la mezcla propuesta fueron cemento, agua, tezontle como agregado fino en las mallas números veinte y cincuenta, tezontle como agregado grueso en las mallas números ocho y diez, y PET como agregado en las cuatro mallas. Es importante calcular la densidad de sólidos y líquidos mediante procedimientos realizados en el laboratorio (Garduño, 2011; Tapia, 2012; Torrelavega, 2014).

Para realizar las mezclas se evaluaron las propiedades del concreto en estados fresco (plástico) y endurecido. Estas propiedades pueden ser modificadas mediante la adición de aditivos al concreto, las cuales generalmente se incorporan en forma líquida durante la dosificación. Los aditivos son comúnmente utilizados para ajustar el tiempo de fraguado o

endurecimiento, reducir el consumo de agua, mejorar la trabajabilidad, introducir aire de manera controlada y ajustar otras propiedades del concreto (Muñoz, 2015).

Después de ser proporcionada la mezcla de cemento adecuadamente, dosificado, mezclado, consolidado acabado y curado, el concreto endurecido se convierte en un material de construcción robusto, no combustible, duradero, resistente al desgaste y prácticamente impermeable, que demanda poco o ningún mantenimiento. Además, el concreto se destaca como un excelente material constructivo debido a su capacidad para ser moldeado en una amplia variedad de formas, colores y texturas, adaptándose así a una infinidad de aplicaciones (Polanco, 2016).

RESULTADOS

Pruebas elaboradas parcialmente

En esta etapa se elaboraron las pruebas bajo las normas mexicanas, estas pruebas se realizaron con ayuda del ingeniero Édgar Antonio Méndez Silva, quien colaboró en 2012 en una tesis titulada: *Propuesta para sustitución de agregados pétreos por agregados PET, en diseño de mezcla de concreto con resistencia f'c=150kg/cm², usado para banquetas, guarniciones y firmes*, en la Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil, región Xalapa.

El ingeniero Méndez planteó la propuesta de cambio de grava convencional por grava plástica, para realizar mobiliario urbano. Nuestro

resultado será satisfactorio si aseguramos que el diseño de mezclas propuesto sea seguro y resistente y que cumpla todas las especificaciones y normativas respectivas para la elaboración de concreto. Esto garantizaría un concreto aplicable en obras, como firmes, banquetas, guarniciones y bancas, los cuales están dentro de los $f'c=300\text{ kg/cm}^2$, una resistencia común que se logra en obra y sin necesidad de maquinaria especializada (Torres, 2014).

Entre las propiedades y características con las que debe contar un concreto elaborado en laboratorio se encuentran las siguientes:

- Trabajabilidad
 - Resistencia

Todas las recomendaciones de elaboración fueron tomadas de la Norma Mexicana STPS 2019. “Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico para uso Estructural”, con fines de
- Consistencia
 - Segregación
- Exudación
 - Durabilidad
- Curado
 - Fraguado

promover la capacitación y el buen uso del cemento y el concreto.

Se realizó la dosificación de agregados gruesos y finos plásticos junto con cemento, para la elaboración del concreto diseñado. Por cada proporción se hicieron doce cilindros para ensayarlos con edades variadas y cada muestra se usó con diferentes proporciones de agregados gruesos naturales y agregados plásticos (Tabla 1).

Tabla 1. Proporción de los agregados

Concreto F'C=300 kg/cm²					
Proporción	Cemento (kg)	Grava natural (kg)	Grava plástica (kg)	Arena (kg)	Agua (L)
90 %-10 %	8.125	17.550	1.950	6.000	4.000
80 %-20 %	8.125	15.600	3.900	6.000	4.000
70 %-30 %	8.125	13.650	5.850	6.000	4.000

Fuente: elaboración propia (2020).

Se hicieron doce cilindros de concreto para todas las mezclas. De cada mezcla se vaciaron tres cilindros de 4 × 8 pulgadas (150 × 300 mm). Todos los cilindros se varillaron a mano en tres capas usando un procedimiento estándar.

Los especímenes se dejaron curar durante 24 horas, después se retiraron de los moldes y

se colocaron en tanque de agua para que se curaran durante 14 días en una temperatura ambiente promedio de 21°C (Figura 8).

En la elaboración de una mezcla para concreto con agregados gruesos y finos para el diseño de mezcla f’c=300 kg/cm² (Tabla 2) (ASTM).

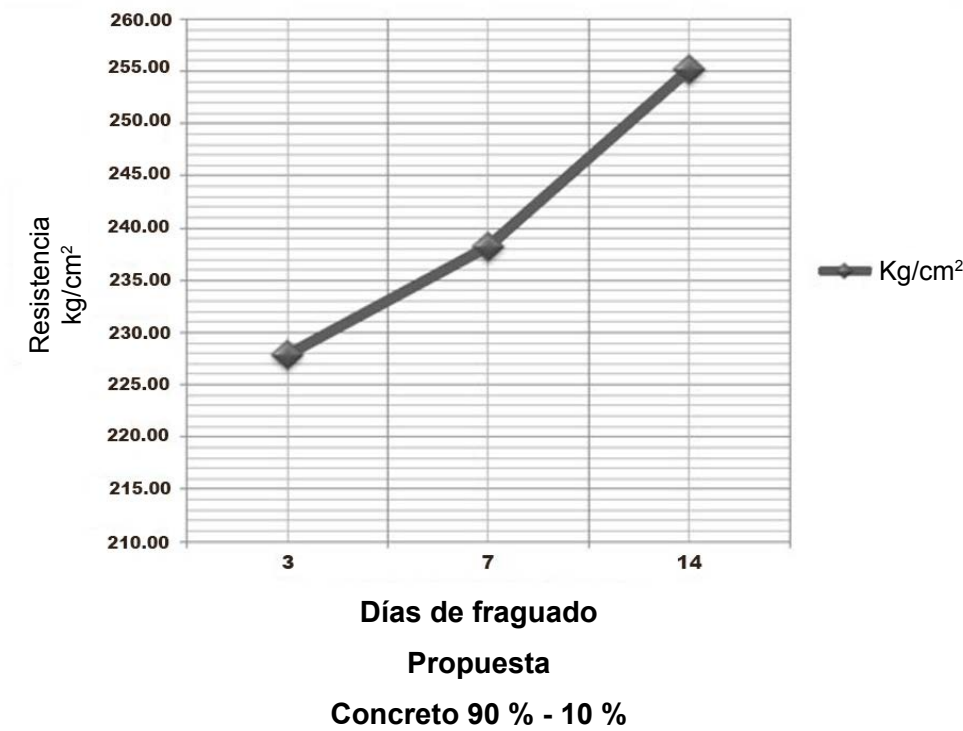
Tabla 2. Memoria con criterios de cálculo

Diseño de mezclas de cemento, tezontle y PET						
	Masa de cemento en gramos	Masa aglomerada	Masa de PET en gramos	Total de masa sólida en gramos	Total de masa líquida en gramos	Comentarios
Cemento puro	500	240	-	500	240	Mezcla de cemento con agua, grava triturada de 1/2"
Cemento + tezontle 5 %	500	240	-	546	266,13	Se mantiene la relación de tamaños de grava /arenas convencionales respecto al empleo de materiales con moldes de morteros.
Cemento + tezontle 10 %	500	240	-	592	292,26	Se mantiene la proporción de concentración de grava /arenas convencionales respecto al empleo de materiales con moldes de morteros 0,84 de arena respecto a agregado grava.

Diseño de mezclas de cemento, tezontle y PET						
	Masa de cemento en gramos	Masa aglomerada	Masa de PET en gramos	Total de masa sólida en gramos	Total de masa líquida en gramos	Comentarios
Fórmula ganadora + PET 5 % (malla 10)	500	240	25	-	-	-
Fórmula ganadora + PET 5 % (malla 20)	500	240	25	-	-	-
Fórmula ganadora + PET 10 % (malla 10)	500	240	50	-	-	-
Fórmula ganadora + PET 10 % (malla 20)	500	240	50	-	-	-
Total Pruebas	24	72	14	28		

Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Figura 8. Resistencia obtenida para concreto con proporción 90 % agregado natural y 10 % agregado plástico

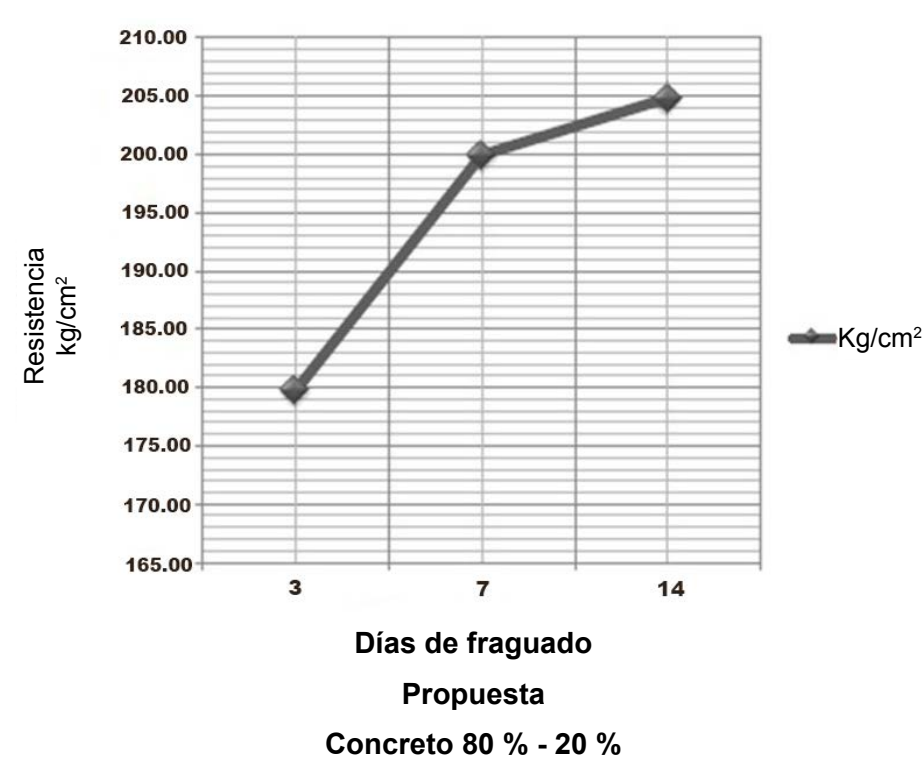


Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Como se observa en la Tabla 1, la cual se identifica con la probeta de concreto número 1, propuesta a una resistencia de $F'c=300\text{ kg/cm}^2$, y con relación en sus agregados totales de la mezcla; 90% agregados gruesos y finos pétreos naturales; y un 10% de agregados gruesos y finos plásticos, se puede observar que la resistencia

aumenta proporcionalmente y que, al 14º día, se tiene más del 86% de la resistencia buscada, dando como resultado positivo en la prueba a la compresión, dichos agregados son realizados con base en la norma que establece ATMS y como se configura en la Tabla 1. En la Figura 9 se pueden ver los resultados.

Figura 9. Resistencia obtenida para concreto con proporción 80 % agregado natural y 20 % agregado plástico

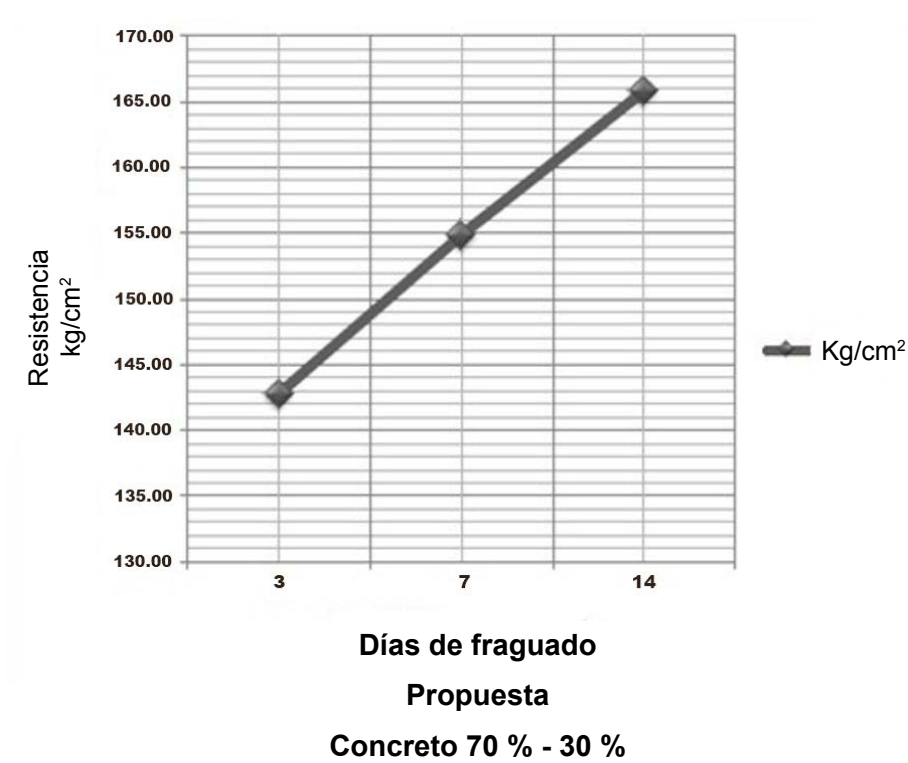


Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Como se observa también en la Tabla 1, la cual se identifica con la probeta de concreto 2, propuesta a una resistencia de $F'c=300$ kg/cm² y con relación en sus agregados totales de la mezcla; 80% agregados gruesos y finos

plásticos, se puede observar que la resistencia aumenta proporcionalmente, y que al día 14º se tiene más del 70 % de la resistencia buscada dando como resultado positivo en la prueba a la compresión (Figura 10).

Figura 10. Resistencia obtenida para concreto con proporción 70 % agregado natural y 10 % agregado plástico



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Como se vio en la Tabla 1 se identifica con la probeta de concreto 2, propuesta a una resistencia de $F'c=300 \text{ kg/cm}^2$ y con relación en sus agregados totales de la mezcla; 70 % agregados gruesos y finos pétreos naturales; y un 30 % de agregados gruesos y finos plásticos, se puede observar que la resistencia aumenta proporcionalmente, y que al día 14 se tiene más del 60 % de la resistencia buscada, dando como resultado positivo en la prueba a la compresión (Medina, 2002).

Entre las conclusiones se encontró que dados los resultados obtenidos en cada probeta de concreto ensayada, se obtuvieron resultados exitosos. Esto se observó en las tres mezclas de concreto, 90 % - 10 %, 80 % - 20 %, y 70 % - 30 %, de agregados pétreos naturales con agregados plásticos, la resistencia máxima buscada se obtiene en dos o tres días más que en otras mezclas, debido al agregado plástico (Rodríguez, 2011; Méndez, 2018).

Pruebas técnicas generales a la propuesta de concreto

El resultado de las pruebas en los cementos y concretos se suele emplear para medir los tiempos de fraguado. Las medidas deben hacerse en menos de 60 minutos, y no deben sobrepasar las 10 horas. Es aconsejable que sean dos medidas, una a los 45 minutos y otra a las ocho horas. En el caso del cemento endurecido, la resistencia compresiva se define como un criterio de resistencia; consiste en comprobar que las tensiones máximas no superen ciertas tensiones admisibles para el material del que está hecho el elemento, es decir, la resistencia a compresión es una medida de la capacidad del concreto para resistir cargas que tienden a aplastarlo. La prueba de compresión muestra la mejor resistencia posible que puede alcanzar el concreto en condiciones perfectas. Esta prueba mide la resistencia del concreto en estado endurecido. A menudo, en muchos diseños de obras de concreto esta propiedad mecánica es determinante para el diseño final de la mezcla por ocupar (Gaggino, 2003).

En cuanto a las pruebas de flexotracción: Se da principalmente en las vigas y como resulta complicado realizar los ensayos de tracción pura al concreto, se simplifican a través del ensayo de flexotracción, el cual consiste en someter una probeta recta de sección plana, circular o poligonal, a una deformación plástica mediante el pliegue de esta, sin inversión de su sentido de

flexión, sobre un radio especificado al que se le aplica una presión constante.

Para este estudio, la determinación de la resistencia compresiva se expresará en unidades de presión lb/pulg^2 o kg/cm^2 .

$$P = F/A,$$

Donde: P= presión, F= fuerza, A= área de un cuadrado del cubo empleado o molde (cara expuesta).

Para la preparación de los moldes, se limpia el molde con una franela humedecida con alcohol y/o acetona pura, se engrasa totalmente el área donde será vertida la mezcla sellando las juntas, seguidamente se vierte la mezcla en el primer recipiente hasta la mitad y con un agitador se golpea la mezcla dentro del molde para retirar el excedente de aire, luego se agrega la mitad faltante, se vuelve a golpear y se engrasa; se realiza el mismo procedimiento para los otros dos cubos. Los moldes se dejan en reposo a temperatura ambiente. En resumen, cada diseño de mezcla debe contar con tres testigos y para cada diseño se correrán pruebas a 24 horas, 3, 7, 14 y 28 días, respectivamente (Figura 11).

Posterior al desarrollo de fraguado, una vez que se retiran los cubos del baño se desmontan los moldes, se miden y se determina el área del cubo y el área de la cara de este que quedará expuesta a la prensa hidráulica (área del cuadrado).

Para determinar la resistencia se relaciona la carga aplicada (en kilos o libras) progresivamente hasta fracturar o romper el cubo (área del cubo en pulgadas). Se deberá repetir la operación con tres muestras representativas y luego se sacará el promedio de la resistencia en valores de $\text{psi (lb/pulg}^2\text{)}$ o en kg/cm^2 .

La prueba de revenimiento se hace para asegurar la trabajabilidad del concreto. El resultado obtenido debe cumplir lo mencionado en la norma NMX-C-155-STPS 2019.

La prueba de resistencia a la compresión se define como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto. Generalmente, se expresa en kilos por centímetro cuadrado (kg/cm^2). Y su procedimiento se rige bajo la norma ASTM-C-150.

Una vez se registra la carga máxima, se divide entre el área obtenida previamente de la cara expuesta a la prensa, para obtener como resultado la resistencia de la muestra en kg/cm^2 .

Figura 11. Moldes en reposo a temperatura ambiente, en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Veracruzana



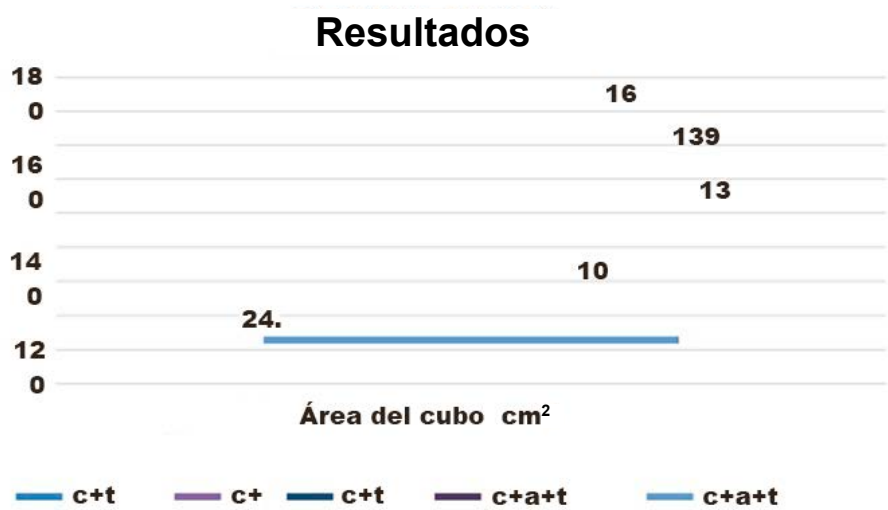
Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Elaboración de concreto a base de tezontle fino, tezontle grueso y agregado de PET

Para el diseño de la mezcla, se propuso sustituir los agregados convencionales, que son grava y arena, por tezontle grueso y fino, respectivamente, junto con PET. Se tomó como referencia preliminar la Tabla 3, en la que se encuentra la proporción de las cantidades de agregados respecto al cemento. Es importante destacar que el objetivo era alcanzar una resistencia de $f_c = 150 \text{ kg/cm}^2$ para aplicaciones en mobiliario urbano. En este caso, la propuesta sería sustituir los agregados convencionales, la grava, por tezontle grueso (malla 8) y la arena por tezontle fino (malla 30), y como agregado parcial PET (malla 20). Se acordó con el equipo de trabajo que la prueba principal sería la de resistencia compresiva, debido a limitaciones técnicas

para realizar otros tipos de ensayos o pruebas adicionales. Para llevar a cabo las pruebas de compresión, se utilizaron moldes para cubos de mortero, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM-C-109. Con base en esta información, se inició la primera fase de pruebas utilizando porcentajes de agregados de tezontle fino y grueso, comenzando con un 5% en primera instancia y luego aumentando a un 10% para ambos. Los resultados demostraron que se obtienen mayores resistencias compresivas con una concentración del 5% para ambos tipos de agregados. Fijando estas concentraciones, tezontle grueso y fino al 5%, se evaluarían los diseños con agregado de PET al 5% y al 10%. A este se le hicieron pruebas de resistencia compresiva, de las cuales resultó ganador el del 5% de PET. Los porcentajes de agregados de la fórmula ganadora se detallan en la Figura 12 (Aguilar Salazar, 2017).

Figura 12. Resultados obtenidos de las pruebas iniciales que dieron pauta a los porcentajes de agregados que integrarían el diseño de mezcla



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Tabla 3. Identificación de espécimen en cubos de mortero con la mezcla diseñada

Fecha	Muestra	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área del cubo (cm²)	Fuerza (kg)	Resistencia kg/cm²	Promedio
24 horas							167 valor resultante
3 días	M2 (1-2-3)	4,9	5	24,5	5.930	242	229
		4,9	5	24,5	5.790	236	
		4,9	5	24,5	5.090	208	
7 días	M3 (1-2-3)	4,9	4,9	24,01	6.689	279	243
		5	5	25	5.950	238	
		4,9	5	24,5	5.198	212	
14 días	M4 (1-2-3)	4,9	5	24,5	5.820	237,55	276
		5	4,9	24,5	6.580	263,2	
		5	5	25	8.050	328,57	
28 días	M5 (1-2-3)	4,95	5	24,75	5.770	230,8	286
		4,99	5	24,99	6.970	278,91	
		4,9	5	24,5	8.550	348,97	

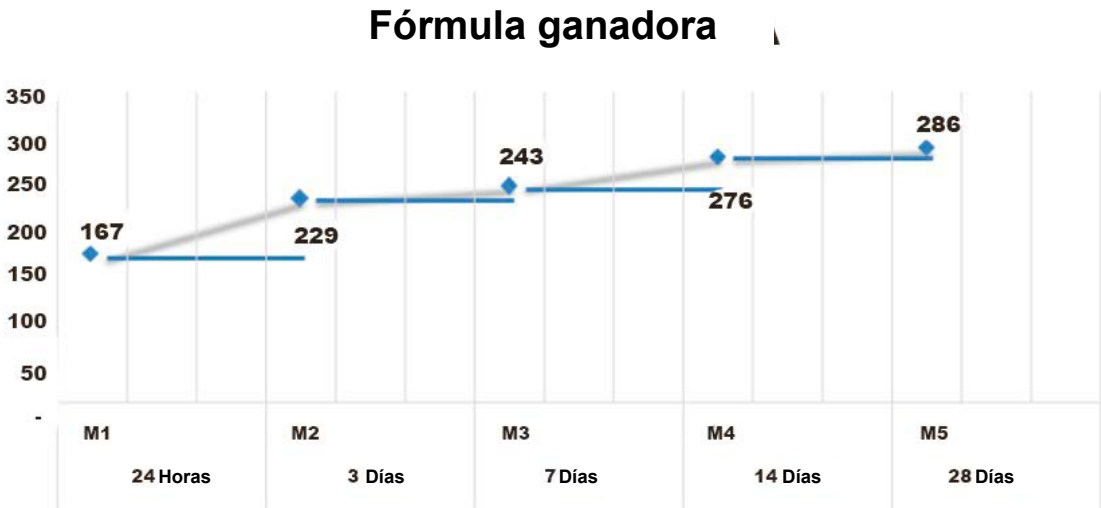
Fuente: Morales-Guzmán (2020).

La mezcla que se diseñó consta de la siguiente formulación: cemento + agua + tezontle fino al 5% + tezontle grueso al 5% + PET al 5%, con esta se obtuvo un resultado de 167 kg/cm² respecto al objetivo de alcanzar una resistencia de 150 kg/cm², con base a las referencias previas de literatura. Para determinar la resistencia a la compresión se realizaron pruebas en cinco edades distintas y en el caso de los cubos se tomaron tres testigos por cada muestra, lo cual generó un promedio para cada una de las resistencias tal como se muestra en la Tabla 3.

Tomando como referencia la resistencia de 150 kg/cm², que es la que se buscaba obtener, hubo un incremento de:

- 11% con resultado de 167 kg/cm² durante las primeras 24 horas
- 37% a los 3 días, con resultado de 229 kg/cm²
- 6% entre el día 3 y el día 7 que dio un resultado de 243 kg/cm²
- 13% entre el día 7 y el día 14 dando un resultado de 276 kg/cm²
- 3% entre el día 14 y el día 28 dejando en un resultado final de 286 kg/cm²

Figura 13. Resistencia obtenida de la mezcla diseñada con cubos



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

La Figura 13 muestra cómo durante los días establecidos para pruebas (1, 3, 7, 14 y 28) se observa un incremento progresivo de la resistencia compresiva entre las primeras 24 horas y los 28 días, cuando la misma tiende a estabilizarse en 286 kg/cm², que representa la resistencia máxima del concreto en estas pruebas.

Una vez se confirmó que la mezcla ganadora daba resultados aún mejores que los planeados, se realizaron las mismas pruebas de resistencia compresiva, pero esta vez en cilindros de 10 × 20 cm ensayados como establece la norma NMX-C-083 STPS 2019. Cada muestra de cilindros se ensayó a las 24 horas, 3, 7, 14 y 28 días; se muestran los resultados en la Tabla 4.

Tabla 4. Resistencia obtenida de cilindros de 20 × 10 cm

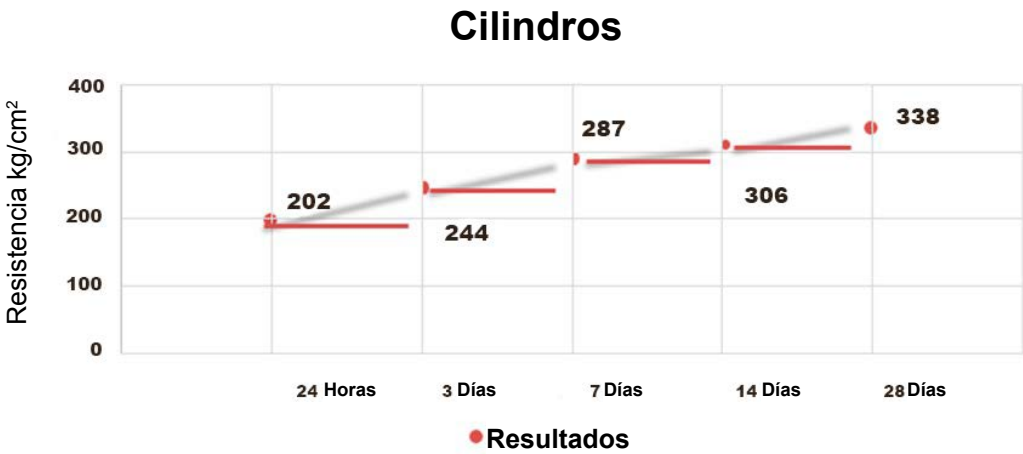
Días	Muestra	Radio	Altura	Área (cm²)	Fuerza (kg)	Resistencia kg/cm²
1	c1	5	20	78,54	15.865	202
3	c2	5	20	78,54	19.140	244
7	c3	5	20	78,54	22.570	287
14	c4	5	20	78,54	24.020	306
28	c5	5	20	78,54	26.546	338

Fuente: Morales-Guzmán (2020).

En el caso de los cilindros solamente se elaboró un testigo por edad y, lo mismo que con los cubos, se obtuvieron resultados satisfactorios, al mostrar que en la prueba de 24 horas había un aumento del 34% respecto

a lo que se buscaba alcanzar de 150 kg/cm². Se obtuvo un resultado de 338 kg/cm² con la prueba realizada a los 28 días. Se considera el área de la cara expuesta (círculo) como área de trabajo (Figura 14).

Figura 14. Resistencia obtenida de la mezcla diseñada con cilindros



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Como se mostrará en la Figura 18, se presentan los resultados de los cilindros respecto al diseño de mezcla, evidenciando que desde las primeras 24 horas se alcanza la resistencia deseada, lo cual arroja resultados positivos en las pruebas de compresión. Esto representa una mejora con respecto a las expectativas iniciales. Por consiguiente, sustituir los agregados convencionales por tezontle y PET resulta en un incremento

significativo de la resistencia del concreto a los 28 días.

En cuanto a la prueba de revenimiento, la cual se hace para asegurar la trabajabilidad del concreto, el resultado obtenido debe cumplir lo mencionado en la norma NMX-C-155-STPS 2019. En el caso de la mezcla aquí descrita se obtuvo un revenimiento de 9 cm, lo cual está entre los parámetros permitidos.

DISCUSIÓN

Se enfrentaron diversos cambios de mezclas, ya que fue necesario realizar varios ajustes para llegar a lo expuesto en este trabajo.

Una parte importante de estos cambios se encuentra en que se deben realizar más pruebas destructivas para manejar una mejor base de datos de la resistencia del material combinado con el PET. En esta primera etapa de resultado se plasmó un pequeño prototipo que ayuda a visualizar la razón de esta investigación, ocupar el material desechado para una mejora de infraestructura en las ciudades, como lo es el inmobiliario urbano; cabe mencionar que también se realizaron adecuaciones en la parte experimental, dado que inicialmente la premisa era realizar muchas pruebas que ayudaran a comprobar la hipótesis de resistencia y manejabilidad del producto, para posteriormente realizar una construcción más grande como una caseta de vigilancia en la Facultad de Arquitectura, para, de esta forma, llevar a cabo el prototipo final, sin embargo, el tiempo y los

gastos monetarios impidieron en esta etapa realizar dichas pruebas que se ejecutarán en una segunda fase (PMD, 2017).

Es fundamental resaltar que estas modificaciones han permitido desarrollar una propuesta que integra el concreto PET en el diseño de mobiliario urbano. En este sentido, se ha fabricado una banca con jardinera para evaluar el rendimiento de estas mezclas en una construcción real. Para ello, se llevó a cabo una comparación de costos, analizando los parámetros financieros a lo largo de las diversas fases de la obra. En la Tabla 5 se observa principalmente una comparación de costos entre la mezcla propuesta para la realización de la banca (lado izquierdo) y la realización de la banca con la mezcla tradicional (lado derecho), el resultado se orientó hacia la mejora de la infraestructura dentro de la Universidad Veracruzana y además un beneficio a la sociedad general (Figuras 15 a 18) (Morales, 2020).

Tabla 5. Memoria de estimaciones

	Material	Cantidad	Precio U	Importe		Material	Cantidad	Precio U	Importe
Mezcla de banca	Cemento	3 bulto	\$130,00	\$390,00	Mezcla tradicional	Cemento	1 ½ bulto	\$130,00	\$195,00
	PET	3/4 lata	\$100,00	\$100,00		Grava	9,75 latas	\$600,00	\$100,00
	Tezontle grueso	3/4 lata	\$50,00	\$10,50		Arena	8 1/4 latas	\$600,00	\$85,00
	Tezontle fino	1/2 lata	\$80,00	\$12,80		Agua	4 3/4 latas	\$ -	\$ -
	Agua	1 1/2 de cubeta de 20 litros	0	0				Total	\$380,00
			Total	\$500,50					
Armado banca	Varilla 3/8	1 1/2	\$84,00	\$126,00	Armado banca	Varilla 3/8	1 1/2	\$84,00	\$126,00
	Clavos	½ kg	\$13,50	\$13,50		Clavos	½ kg	\$13,50	\$13,50
	Electro malla	3,20 m	\$34,00	\$108,80		Electro malla	3,20 m	\$34,00	\$108,80
	Clavo 2 1/2	½ kg	\$19,00	\$8,50		Clavo 2 1/2	½ kg	\$19,00	\$8,50
	Madera cimbra	5 pza	\$45,00	\$225,00		Madera cimbra	5 pza	\$45,00	\$225,00
	Alambre recocado	1 kg	\$15,50	\$15,50		Alambre recocado	1 kg	\$15,50	\$15,50
	Mano de obra	2 días	\$300,00	\$600,00		Mano de obra	2 días	\$300,00	\$600,00
			Total	\$1.097,30				Total	\$1.097,30

	Material	Cantidad	Precio U	Importe		Material	Cantidad	Precio U	Importe
Acabado banca	Barniz	1 pza	\$76,00	\$76,00	Acabado banca	Barniz	1 pza	\$76,00	\$76,00
	Pintura	1 pza	\$105,00	\$105,00		Pintura	1 pza	\$105,00	\$105,00
	Lija	1 pza	\$4,50	\$9,00		Lija	1 pza	\$4,50	\$9,00
	Brocha	1 pza	\$32,00	\$32,00		Brocha	1 pza	\$32,00	\$32,00
	Thinner	1 L	\$18,50	\$18,50		Thinner	1 L	\$18,50	\$18,50
	Antiparásito	1 pza	\$80,92	\$80,92		Antiparásito	1 pza	\$80,92	\$80,92
	Madera	5 pza	\$23,00	\$115,00		Madera	5 pza	\$23,00	\$115,00
	Tornillo	15 pza	\$0,62	\$9,30		Tornillo	15 pza	\$0,62	\$9,30
	Pasto opción	½ m	\$25,00	\$12,50		Pasto opción	½ m	\$25,00	\$12,50
	Planta superior	2	\$15,00	\$30,00		Planta superior	2	\$15,00	\$30,00
			Total	\$488,22				Total	\$488,22
			Subtotal	\$2.086,02				Subtotal	\$1.965,52

Mezcla macetero	Cemento	1/2 bto	\$130,00	\$65,00	Mezcla macetero	Cemento	1/2 bto	\$130,00	\$69,00
	Electro mall	0,7 cm	\$34,00	\$24,00		Electro mall	0,7 cm	\$34,00	\$24,00
	PET	1/4 latas	\$7,50	\$100,00		Grava	3 1/4 latas	\$600,00	\$35,00
	Tezontle grueso	1/8 lata	\$80,00	\$2,00		Arena	2 3/4 latas	\$600,00	\$30,00
	Agua	1/2 lata	\$ -	\$ -		Agua	1 1/4 latas	0	0
	Tezontle fino	1/4 lata	\$80,00	\$1,68		Clavo 2 1/2	½ kg	\$19,00	\$9,50
	Clavo 2 1/2	½ kg	\$19,00	\$9,50		Madera cimbra	2 pza	\$ -	\$ -
	Madera cimbra	2 pza	\$ -	\$ -		Alambre recocado	1 kg	\$15,50	\$15,50
	Alambre recocado	1 kg	\$15,50	\$15,50				Total	\$183,00
			Total	\$217,68					

Mezcla cenicero	Cemento	1 bto	\$130,00	\$65,00	Mezcla cenicero	Cemento	1 bto	\$130,00	\$130,00
	Electro mall	0,7 cm	\$34,00	\$24,00		Electro mall	0,70 cm	\$34,00	\$24,00
	PET	½ lata	\$7,50	\$100,00		Grava	6 ½ latas	\$600,00	\$65,00
	Tezontle grueso	1/4 lata	\$80,00	\$4,00		Arena	5 ½ latas	\$600,00	\$55,00
	Tezontle fino	½ lata	\$80,00	\$3,36		Agua	2 ½ latas	\$ -	\$ -
	Agua	1 lata	\$ -	\$ -		Clavo	½ kg	\$19,00	\$9,50
	Clavo	½ kg	\$19,00	\$9,50		Madera cimbra	2 pza	\$ -	\$ -
	Madera cimbra	2 pza	\$ -	\$ -		Alambre recocado	1 kg	\$15,50	\$15,50
	Alambre recocado	1 kg	\$15,50	\$15,50				Total	\$299,00
			Total	\$221,36				Subtotal	\$482,00
			Subtotal	\$439,04				Total	\$2,447.52
			Total	\$2,525.06					

Nota: valores en pesos mexicanos.

Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Figura 15. Proceso de armado de cimbras para la banca



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Figura 16. Cimbra y armado del macetero



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Figura 17. Vaciado de mezcla en el macetero



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

Figura 18. A) Banca en obra negra. B) Banca concluida con sus detalles finales



Fuente: Morales-Guzmán (2020).

CONCLUSIONES

En relación con el objetivo general y la hipótesis planteada en este estudio sobre la elaboración de una mezcla de concreto utilizando PET como agregado parcial en la construcción de mobiliario urbano, se puede afirmar que el uso de PET como agregado es viable. Además, la inclusión de agregados gruesos y finos de tezontle en la formulación de la mezcla también es recomendable. Los resultados obtenidos en cuanto

a resistencia compresiva, que han superado los 167 kg/cm², demuestran la viabilidad para la construcción de mobiliario urbano. Además, indican el potencial uso del diseño desarrollado en estructuras que requieren mayores exigencias mecánicas, como vigas, trabes y losas.

Respecto a los objetivos específicos, la formulación final incluye 5% de tezontle como material grueso y fino; concentraciones superiores

disminuyen la resistencia compresiva significativamente. En este sentido, en el caso del PET se observó que con una concentración del 5 % de incremento la resistencia compresiva disminuyó en un 21 % (10 % de PET), es decir, de 167 kg/cm² a 132 kg/cm²; no obstante este último valor puede satisfacer el requerimiento para mobiliarios urbanos que no soportan cargas tan demandantes, tal es el caso de ceniceros, maceteros o pilonos. La importancia de emplear un porcentaje mayor de PET radica en aumentar la cantidad del material de desecho en obras de mobiliario urbano y de esta forma contribuir tempranamente a mitigar problemas derivados de la contaminación del PET, logrando con ello un beneficio social y arquitectónico oportuno.

Se ha demostrado la aplicación real y física de la mezcla en el mobiliario urbano con la elaboración de tres tipos de trabajo, los cuales fueron instalados en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Veracruzana (banca, cenicero y macetero).

Durante la investigación, se identificaron diversas estrategias para mejorar la eficiencia en la obtención de resultados. Entre estas opciones, se exploró el uso del PET como un agregado en

lugar de sustituir los materiales empleados en la mezcla. Este enfoque demostró ser más eficiente en el diseño de la mezcla, asegurando el cumplimiento de las normativas aplicables en la investigación.

Por otro lado, es importante trabajar con una máquina de mayor tamaño para la primera fase del proceso de triturado del PET, misma que se encuentra en centros que recolectan botellas de PET en la ciudad, dado que solo toma veinticinco minutos, mientras que en el laboratorio, debido a las dimensiones de la máquina, esto habría tomado aproximadamente dos semanas. Las siguientes fases del proceso de triturado de material, puesto que disminuye significativamente la granulometría del PET, sería ideal realizarlas en un laboratorio y esto permitiría hacer un mejor control de la calidad.

Otras líneas de investigación, que se desprenden de este análisis y que pueden contribuir a mejorar diseños futuros, consideran efectuar pruebas o ensayos de flexotracción a las muestras de concreto endurecido para contar con dicha propiedad mecánica.

REFERENCIAS

- Aguilar Salazar, A. L. (2017). *Diseño de una mezcla de concreto como material de construcción, utilizando reciclado de PET* [Tesis]. Universidad Veracruzana.
- ASTM International. (s. f.). *Normas de ASTM International*. <https://la.astm.org/es/standards/construction-collection/>
- Benítez Rodríguez, G., Galván López, J. L., Inciarte Fermín, G., & Inciarte Labarca, G. (2019). *Estado del arte y factibilidad de uso del concreto celular y de lechadas de baja densidad en la industria de la construcción* (caso de estudio Poza Rica de Hidalgo; Veracruz). Proyecto de investigación de la Universidad Veracruzana.
- Botero Jaramillo, E., Muñoz, L., Ossa, A., & Romo, M. (2014). Comportamiento mecánico del Polietileno Tereftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas. *Revista Ciencias de Ingeniería*, 70, 207-219. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43030033019>
- Brañes Ballesteros, R. (2000). *Manual de derecho ambiental mexicano*. Editorial Instituto de Investigaciones Jurídicas.
- Castellot, R. (2014, 25 de marzo). *México recupera más de 60 % de los envases de PET, es líder en América*. Fundación Mexicana para la Educación Ambiental. Fondo de Cultura Económica.
- Gaggino, R. (2003). Elementos constructivos con PET reciclado. *Revista Tecnología y Construcción*, 19. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_tc/article/view/3546
- Gaggino, R. (2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción. *Revista INVI*, 23(63). <https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/62288>
- Garduño, M. A. (2011, diciembre). *Ciencia de los materiales*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/14560>
- Iberdrola. (2018). *Las cinco islas de Plástico oceánico del mundo*. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/las-5-islas-de-basura-en-el-mundo>

- Juárez, M., Santiago, M., & Vera, J. (2011). Estudio de factibilidad para la manufactura de empuñaduras de PET reciclado. *Revista e-Gnosis*, 9, 1-12. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73020063002>
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Revista Nature, Scientific Reports*, 8(1), 4266. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-22939-w>
- Medina López, Y. M. (2002). *Análisis de los mercados de diversos materiales vírgenes y reciclados para la producción de envases* [Tesis consultoras, S.C.]. Instituto Nacional de Ecología.
- Méndez Silva, E. A. (2018). Propuesta para sustitución de agregados pétreos por agregados PET, en diseño de mezcla de concreto con resistencia $f'c=150 \text{ kg/cm}^2$, usado para banquetas, guarniciones y firmes [Tesina]. Universidad Veracruzana.
- Morales Guzmán, C. C. (2020) *Pruebas de diseño y aplicación en el diseño inmobiliario* [Taller de Diseño Arquitectónico: Detalles]. Licenciatura en Arquitectura, Universidad Veracruzana.
- Muñoz Pérez, L. (2015). *Estudio del uso del polietileno tereftalato (PET) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Polanco Rodríguez, A. (2016). *Manual de prácticas de laboratorio de concreto*. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería.
- PMD. (2017). *Plan Municipal de Desarrollo 2014-2017. Informe Geo - Eco ciudades del Municipio de Poza Rica*. Poza Rica. <https://es.scribd.com/document/359955107/PLAN-MUNICIPAL-DE-DESARROLLO-POZA-RICA-2019-2021-pdf>
- Rodríguez Morales, L. (2011). La práctica constructiva en la ciudad de México. El caso del tezontle, siglos XVIII-XIX. *Boletín de Monumentos Históricos*, (22), 155-178. <https://revistas.inah.gob.mx/index.php/boletinmonumentos/article/view/2168>
- Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Revista OMNIA*, 20(3). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73737091009>
- Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol). (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2015). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores claves y de desempeño ambiental*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/161446/Cap_CC_completo.pdf
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). (2019). *Norma Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2019, Construcción-Condiciones de seguridad y salud en el trabajo*. <https://dof.gob.mx/normasOficiales/4376/stps/stps.htm>
- Tapia, A. R. (2012). *Industrialización y exportación de plástico (PET) caso: Comercializadora de plástico relive A. en P. Querétaro* [Tesis de Maestría en Administración]. Universidad Autónoma de Querétaro. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/6506>
- Torrelavega. (2014). *Cálculo de la densidad. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía. Ejercicio de Asignatura de la Licenciatura de Mecánica*. <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-unidad/fisica/densidad/36925426>
- Torres-Papaqui, J. (2014). *Definición de los fluidos*. Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas. <https://www.yumpu.com/es/document/read/14312999/tema-ii5-viscosidad-universidad-de-guanajuato>