

## Desempeño del concreto hidráulico con adición de residuos plásticos: Una alternativa de concreto sustentable.

Ing. Mario Erubey Soriano-Ruelas<sup>a</sup>, Dr. José Manuel Gutiérrez-Moreno<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma de Baja California – Facultad de Ingeniería Mexicali, Blvd. Benito Juárez S/N, [erubey.soriano@uabc.edu.mx](mailto:erubey.soriano@uabc.edu.mx), Mexicali, Baja California, México.

<sup>b</sup> Universidad Autónoma de Baja California – Facultad de Ingeniería Mexicali, Blvd. Benito Juárez S/N, [manuel.gutierrez@uabc.edu.mx](mailto:manuel.gutierrez@uabc.edu.mx), Mexicali, Baja California, México.

### Resumen

En la industria de la construcción se han realizado propuestas para el uso sustentable del concreto hidráulico debido a su uso primordial en la infraestructura actual. Entre estas propuestas se ha puesto énfasis en la presencia abundante de residuos plásticos en el medio ambiente, con el propósito de aprovechar este material como agregado plástico en las mezclas de concreto. En la presente investigación se muestra un estudio experimental del diseño de una mezcla de concreto de un módulo de ruptura de 45 kg/cm<sup>2</sup> reemplazando arena natural por plástico HDPE en porcentajes de 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15%, 20% y 30% con el propósito de determinar y analizar las propiedades en estado fresco y endurecido de esta mezcla. Se elaboraron 64 especímenes para identificar el comportamiento del concreto sometido a compresión y flexión. Los resultados demostraron que el porcentaje de reemplazo óptimo fue de 5% y 7.5% para efectos de resistencia a compresión y flexión respectivamente, teniendo una similitud en los resultados que demuestran otros autores. Finalmente, los estudios del HDPE en mezclas de concreto se encuentran en una etapa prematura y el obtener resultados favorables permitirá promocionar una alternativa de concreto sustentable, tal y como se demuestra en este caso de estudio, por lo que su aplicación puede funcionar en losas para la capa de rodadura de los pavimentos rígidos.

**Palabras clave**— Concreto sustentable, módulo de ruptura, plástico HDPE, porcentaje de reemplazo.

### Abstract

*In the construction industry, proposals have been made for the sustainable use of hydraulic concrete due to its primary use in the current infrastructure. Among these proposals, emphasis has been placed on the abundant presence of plastic waste in the environment, to take advantage of this material as a plastic aggregate in concrete mixtures. In the present investigation, an experimental study of the design of a concrete mix with a Modulus of Rupture of 45 kg/cm<sup>2</sup> is shown, replacing natural sand with HDPE plastic in percentages of 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15 %, 20%, and 30% to determine and analyze the properties in the fresh and hardened state of this mixture. 64 specimens were made to identify the behavior of concrete subjected to compression and bending. The results showed that the optimal*

*replacement percentage was 5% and 7.5% for compressive and flexural strength effects, respectively, having a similarity in the results shown by other authors. Finally, the studies of HDPE in concrete mixtures are at an early stage. Obtaining favorable results will promote a sustainable concrete alternative, as demonstrated in this case study so that its application can work in slabs for the layer of rolling of rigid pavements.*

**Keywords**— Sustainable concrete, rupture modulus, HDPE plastic, replacement percentage.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material con mayor demanda para la construcción de obras civiles por sus propiedades físicas que se ajustan en la forma y resistencia de los elementos estructurales solicitados, además de la economía que ofrece [1, 2, 3, 4]. Se estima que hasta el año 2019 se producían 2500 millones de toneladas de concreto por año, lo que demuestra la gran demanda de producción a nivel global [5, 6]. Sin embargo, hoy en día uno de los compromisos y requisitos que implica usar este material es realizar esfuerzos por reducir su huella de carbono, es decir, realizar un concreto sustentable [2, 4].

La incorporación de residuos plásticos en las mezclas de concreto es una alternativa que va relacionada con la sustentabilidad debido a que contribuye a la mitigación de residuos plásticos en los vertederos, además, se abre la posibilidad de reducir el uso de agregados naturales por incorporar estos residuos como un agregado plástico, lo que representa un producto con viabilidad económica y ecológica [1]. El plástico ha sido un material que ha traído beneficios en la industria de la manufactura, pero una vez que es utilizado para su uso destinado, usualmente termina convirtiéndose en un desecho que afecta al medio ambiente, teniendo un periodo de descomposición entre los 500 y 1000 años [7, 8]. Para el año 2016 se tenían cifras aproximadas de 24.14 millones de toneladas de generación de residuos plásticos, las cuales van en aumento y la necesidad de incorporar estos residuos en elementos constructivos ha despertado la investigación y desarrollo de mezclas de concreto con la adición de plásticos reciclados, lo que relaciona el sector del reciclaje con el sector de la construcción [9, 10].

Uno de los plásticos más producidos es el HDPE (Polietileno de Alta Densidad), encontrándose en tercer lugar de producción mundial con un 13%, ofreciendo un adecuado desempeño en el concreto sustentable por considerarse un plástico que solo ha tenido un solo uso [10,11]. La literatura respalda este desempeño por su aplicación en elementos estructurales y no estructurales [12, 13]. El objetivo de este trabajo es comparar el desempeño del concreto sustentable en sus diferentes porcentajes de reemplazo de arena-plástico HDPE para encontrar su porcentaje ideal y óptimo que permita obtener una buena

trabajabilidad y durabilidad, para compararlo con un concreto hidráulico convencional.

## 2. CONTENIDO

### 2.1. Materiales y métodos

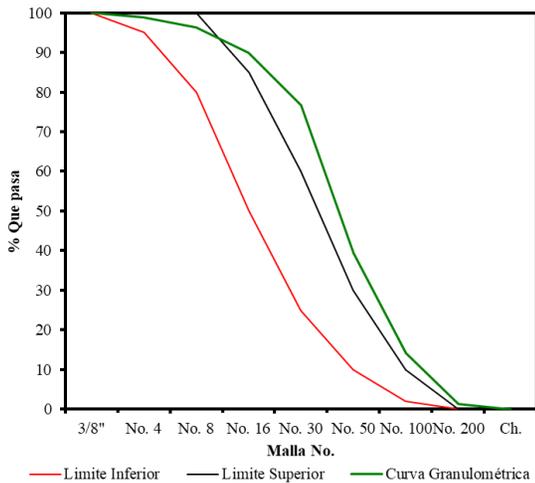
#### 2.1.1. Cemento

Se utilizó Cemento Portland Compuesto Clase 40 de Holcim Apasco (CPC 40) [14].

#### 2.1.2. Agregados

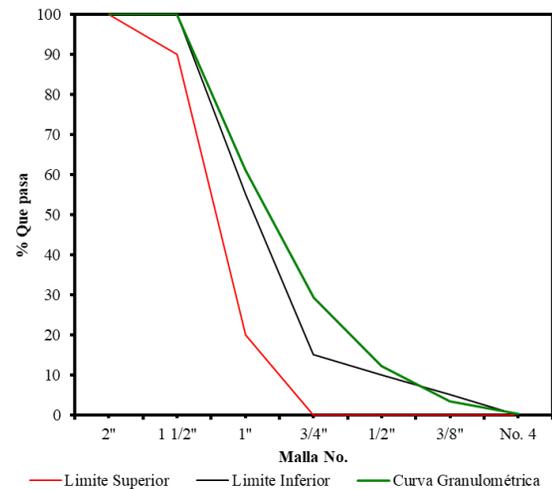
Se utilizó Grava Triturada Minera Granítica de 40 mm (GTMG40), Grava Semitriturada Minera Granítica de 10 mm (GSMG10) y Arena Natural (AN) con un grado de retención inferior a 4.75 mm. Estos agregados son provienen de bancos de agregados de la ciudad de Mexicali, Baja California. Se realizaron los procedimientos de análisis de agregados correspondientes [15]. A continuación, se presentan los análisis granulométricos.

Gráfica 1. Análisis granulométrico de AN.



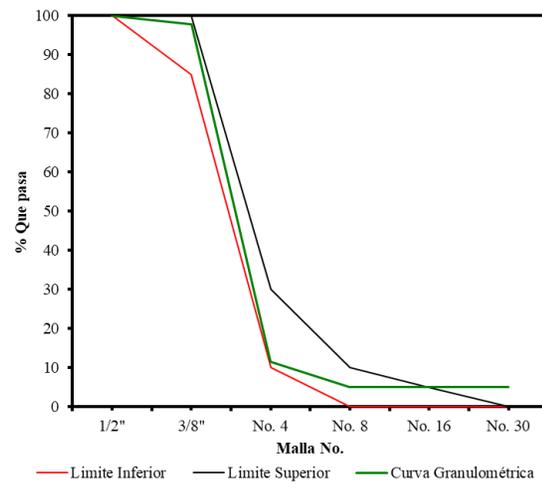
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2. Análisis granulométrico de GTMG40.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3. Análisis granulométrico de GSMG10.



Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 1 la arena contiene una mayor cantidad de finos respecto al límite permisible, al igual que en la Gráfica 2 se carece de distribución en los tamaños que más se acercan al TMA de esta grava de 40 mm. Caso contrario con la Gráfica 3 donde ligeramente la grava de 10 mm presenta una distribución permisible. Otras propiedades analizadas se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 1. Propiedades físicas de los agregados.

Propiedades físicas	Unidades	Arena	Grava GTMG40	Grava GSMG10
Absorción	%	1.01	0.35	0.79
Densidad	gr/cm <sup>3</sup>	2.61	2.71	2.69
Peso Volumétrico Compacto	kg/cm <sup>3</sup>	1760.54	1597.44	1580.93
Peso Volumétrico Suelto	kg/cm <sup>3</sup>	1618.43	1447.48	1415.14
Módulo de finura	Adim	1.85	-	-

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 1 demuestra que el agregado GSMG10 contiene mayor cantidad de material fino respecto a la otra grava, lo cual permite identificar la presencia de la finura en el material como una variable que puede afectar al diseño de mezclas de concreto, así como el módulo de finura de la arena, que se encuentra fuera de los límites [16]. El hecho de que los agregados AN y GTMG40 se encuentren con parámetros fuera de sus límites, no significa que no sean útiles, si no que existen métodos de diseño de mezclas que pueden realizar una combinación de diferentes tamaños de agregados para ajustar sus proporciones y tengan un buen acomodo en la mezcla de concreto, reflejándose en una curva granulométrica suave que cumpla ligeramente y que permita al concreto reducir una cantidad de vacíos adecuada [17].

### 2.1.3. Agua y aditivos

Se utilizó agua potable dentro de los límites químicos permisibles para uso en mezclas de concreto [18]. Se consideraron dos aditivos comerciales: Sika Plastiment 550 (P550) como reductor de agua de medio tango, y también se consideró Sika Viscoflow 8100 como fluidificante de alto rango para una mejor trabajabilidad y permanencia en el revenimiento de la mezcla de concreto [19, 20].

### 2.1.4. Plástico HDPE

Este plástico se obtuvo de un centro de reciclaje donde se tritura en TMA de 10 mm. Se realizaron los análisis de agregados que fueran posibles con el equipo que cuenta el laboratorio, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Propiedades físicas del HDPE.

Propiedades físicas	Unidades	HDPE
Densidad	gr/cm <sup>3</sup>	1.08
Peso Volumétrico Compacto	kg/m <sup>3</sup>	530.93
Peso Volumétrico Suelto	kg/m <sup>3</sup>	465.79

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2 describe al HDPE como un material ligero y se considera un material que absorbe cantidades mínimas de humedad, incluso varios autores desprecian esta propiedad [1, 25, 26,]. La densidad es relativamente cercana respecto a los valores mostrados en la literatura [12, 22].

### 2.1.5. Diseño de mezcla de concreto sustentable

Se tomaron como parámetros de diseño un módulo de ruptura (MR) de 45 kg/cm<sup>2</sup>, lo que equivale en resistencia a la compresión (f'c) a 346 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente.

También, se tomó una relación agua/cemento (a/c) de 0.50 y un revenimiento de 10 ± 2 cm. Estos parámetros fueron considerados para uso en losas de la capa de rodadura de los pavimentos rígidos, aplicados en zonas industriales [23]. Se diseñó mediante el reglamento del ACI 302 [24].

Tabla 3. Clasificación de las mezclas de concreto.

Mezcla	Porcentaje de reemplazo
M1	0%
M2	2.5%
M3	5%
M4	7.5%
M5	10%
M6	15%
M7	20%
M8	30%

Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes de reemplazo de la Tabla 3 han sido seleccionados con base al rango que ha sido más efectivo por varios autores [7, 22, 23]. Las proporciones de materiales que se pueden apreciar a continuación, fueron calculadas mediante la guía de diseño del ACI 302 [24].

Tabla 4.1. Dosificación de materiales para mezclas con 0%, 2.5% y 5% de reemplazo arena-HDPE.

Material	Unidad	Diseño original m <sup>3</sup>	Diseño para 75 Litros		
			Mezclas		
			M1	M2	M3
Cemento	kg	370.00	27.75	27.75	27.75
Agua	kg	196.80	14.76	14.76	14.76
Arena	kg	574.93	44.23	43.12	42.02
GTMG40	kg	938.67	70.40	70.40	70.40
GSMG10	kg	308.67	23.15	23.15	23.15
P550	ml	2,034.67	152.60	152.60	152.60
Viscoflow	ml	370.67	27.80	27.80	27.80
HDPE	kg	-	0.00	1.11	2.21

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2. Dosificación de materiales para mezclas con 7.5, 10% y 15% de reemplazo arena-HDPE.

Material	Unidad	Diseño original m <sup>3</sup>	Diseño para 75 Litros		
			Mezclas		
			M4	M5	M6
Cemento	kg	370.00	27.75	27.75	27.75
Agua	kg	196.80	14.76	14.76	14.76
Arena	kg	574.93	40.91	39.81	37.60
GTMG40	kg	938.67	70.40	70.40	70.40
GSMG10	kg	308.67	23.15	23.15	23.15
P550	ml	2,034.67	152.60	152.60	152.60
Viscoflow	ml	370.67	27.80	27.80	27.80
HDPE	kg	-	3.32	4.42	6.64

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3. Dosificación de materiales para mezclas con 20% y 30% de reemplazo arena-HDPE.

Material	Unidad	Diseño original m <sup>3</sup>	Diseño para 75 Litros	
			Mezclas	
			M7	M8

Cemento	kg	370.00	27.75	27.75
Agua	kg	196.80	14.76	14.76
Arena	kg	574.93	35.38	30.96
GTMG40	kg	938.67	70.40	70.40
GSMG10	kg	308.67	23.15	23.15
P550	ml	2,034.67	152.60	152.60
Viscoflow	ml	370.67	27.80	27.80
HDPE	kg	-	8.85	13.27

Fuente: Elaboración propia.

En las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3, la cantidad de agua calculada incluye el agua necesaria para que los agregados naturales alcancen su estado Saturado Superficialmente Seco (SSS).

## 2.2. Resultados obtenidos

### 2.2.1. Pruebas en estado fresco

Para evaluar el control de calidad de las mezclas de concreto en estado fresco, se siguieron las NMX [25, 26, 27, 28]. En la siguiente tabla se muestra los primeros dos parámetros evaluados durante el muestreo de las mezclas de concreto.

Tabla 5.1. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco.

Mezcla	Revenimiento (cm)	Temperatura (°C)
M1	12	28.0
M2	18	25.5
M3	14	27.5
M4	8	33.9
M5	9	31.6
M6	6	30.0
M7	8	28.1
M8	3	19.6

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 5.1, las mezclas del concreto mantienen una mejor consistencia y trabajabilidad cuando están en función de un porcentaje de reemplazo de 0%, 5%, 7.5% y 10%, reduciéndose el revenimiento conforme aumenta la cantidad de plástico HDPE, por lo que en pequeñas cantidades no se ve afectada la trabajabilidad, cumpliendo con las tolerancias de aceptación [25]. Tamrin y Nurdiana explican que la reducción de la trabajabilidad puede deberse a la hidrofobicidad plástica, la cual ocasiona que exista una ausencia de adherencia suficiente para que los plásticos logren mezclarse con otros materiales, incluso llegando a afectar a la hidratación del cemento [7]. Las temperaturas registradas cumplen con los rangos de aceptación para climas cálidos que especifica el ACI 305 [29]. Continuando con las pruebas en estado fresco, en la Tabla 5.2 se describen los resultados de los dos ensayos restantes.

Tabla 5.2. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco.

Mezcla	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de aire (%)
M1	2380	1.7
M2	2390	1.8

M3	2353	2.3
M4	2303	2.5
M5	2256	2.7
M6	2216	3
M7	2191	1.9
M8	2112	2.6

Fuente: Elaboración propia.

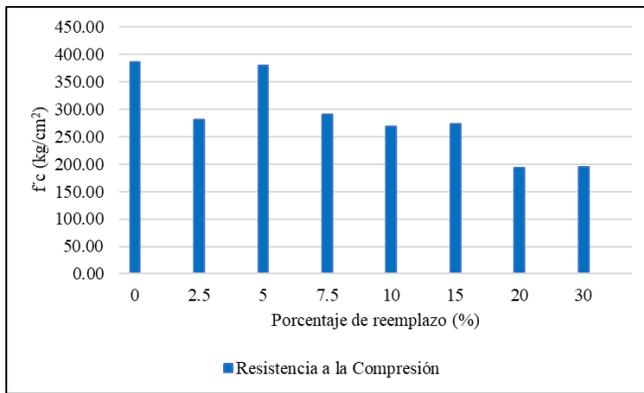
Las masas unitarias obtenidas en la Tabla 5.2 presentan un rango de 2380-2112 kg/m<sup>3</sup>, donde la mayoría de las mezclas cumplen con este parámetro [27]. El plástico HDPE por su naturaleza física, es decir, por su superficie lisa, tiene dificultad de adherirse a la pasta de cemento, lo que ocasiona que se generen cierta cantidad de vacíos y que conforme su cantidad se incrementa en las mezclas de concreto, estas tienden a ser más ligeras, reflejándose en una masa unitaria en decremento y en un contenido de aire en aumento. En particular, autores como Badache et al. manejaron porcentajes de reemplazo de 15% y 30% obteniendo disminuciones en su masa unitaria del 5% y 12% respectivamente, siendo decrementos muy similares al presente caso de estudio con un 7% y 12% [30].

Los porcentajes de contenido de aire descritos en la Tabla 5.2 presentan un rango de 1.3%, lo cual predice que a mayor contenido de aire, las resistencias a flexión y compresión podrían verse afectadas. Se tiene que considerar que el aumento de cada punto porcentual de la incorporación de aire reduce la resistencia en un rango de 2% a 9% aproximadamente para concretos de resistencias moderadas a altas, como es el caso de este estudio [17]. Por otra parte, el tener ganancias de contenido de aire en las mezclas de concreto podría reducir cantidades de agua y arena, siempre y cuando se respeten los límites que señala el ACI 211, cumpliendo los resultados de la Tabla 5.2 con este reglamento [31]. Para la elaboración de especímenes se ejecutaron las normativas aplicables [32].

### 2.2.2. Pruebas en estado endurecido

Los especímenes elaborados fueron curados en una pileta con humedad al 100% y con temperaturas adecuadas [32]. De los 64 especímenes, 32 correspondieron a cilindros de 150 mm x 300 mm y la otra mitad a vigas prismáticas de 150 mm x 150 mm x 500 mm. Por cada porcentaje de reemplazo se elaboraron 4 cilindros y 4 vigas prismáticas, para posteriormente curar en pares a 7 y 28 días. Para fines de este artículo, se muestran los resultados obtenidos a 28 días, requisito que se debe considerar en el diseño de estructuras de concreto [17, 33]. En la siguiente gráfica se ilustran los resultados del comportamiento de las mezclas de concreto sometidas a compresión.

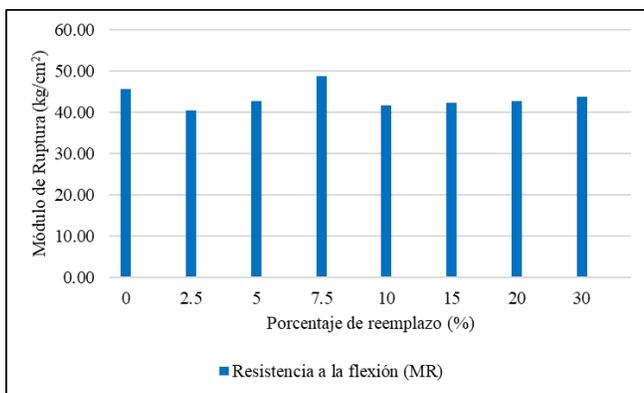
Gráfica 4. Resultados de las pruebas a compresión (f'c) al concreto a 28 días.



Fuente: Elaboración propia.

Las resistencias a compresión presentan un rango de 221-409 kg/cm<sup>2</sup>, con un porcentaje de reemplazo óptimo del 5% que supera ligeramente la resistencia de la mezcla de concreto original, es decir, de 405 kg/cm<sup>2</sup> aumenta a 409 kg/cm<sup>2</sup>. Este comportamiento se asemeja al que describe Malagaveli et al., donde con un porcentaje de reemplazo de 3.5% la resistencia tuvo un aumento del 7.69% con un tiempo de curado de 28 días [34]. Hay otros porcentajes que se encuentran dentro de las tolerancias de aceptación [7]; pero su trabajabilidad no es la más adecuada [33]. Para lograr validar que estas mezclas de concreto realmente pueden tener un buen desempeño al someterse a cargas que se presentan en las losas de pavimentos rígidos, hay que observar la Gráfica 5.

Gráfica 5. Resultados de las pruebas a flexión (MR) al concreto a 28 días.



Fuente: Elaboración propia.

Esta gráfica valida que estas mezclas de concreto tienen un desempeño a la flexión satisfactorio debido a que presentan un rango de 40-49 kg/cm<sup>2</sup>, encontrándose todas las mezclas dentro de tolerancias aceptables si se compara con el caso anterior de resistencia a la compresión. Incluso, hay estudios donde la incorporación de plástico HDPE mejora la resistencia a la flexión hasta en un 17,47% respecto a una mezcla de control sin plástico [34]. Por ejemplo, Kobayashi fue pionero en obtener resultados experimentales de la mejoría de ciertas propiedades del concreto con plástico HDPE incorporado sometido a flexión, como la ductilidad y tenacidad [35]. Sin embargo, como se mencionó en el

párrafo anterior, se tiene que determinar un porcentaje de reemplazo ideal y óptimo donde la mezcla de concreto sea trabajable y dúctil, por lo cual el 7.5% será el porcentaje adecuado.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los estudios para reducir la huella de carbono que emite el concreto continúan avanzando, y la alternativa de incorporar residuos plásticos al concreto hidráulico ha resultado una solución de carácter sustentable que permite visualizar escenarios donde se disminuya la presencia de estos residuos en vertederos y se puedan eliminar en el medio ambiente, además de propiciar la conservación de los recursos naturales.

Con los resultados obtenidos se ha pretendido mostrar los impactos positivos y negativos que desarrollan las mezclas de concreto con plástico HDPE en estado fresco y endurecido en función de sus distintos porcentajes de reemplazo. El análisis de agregados es uno de los principios que se tienen que considerar para poder proyectar una mezcla de concreto que sea trabajable y dúctil. Las mezclas de concreto diseñadas y elaboradas con porcentajes de reemplazo de 0%, 2.5%, 5%, 7.5% y 10%, demostraron que su comportamiento en estado fresco es aceptable, pero en cuanto a sus propiedades en estado endurecido, las mezclas idóneas se fueron acotando a causa del grado de ductilidad que presentaron los especímenes sometidos a fuerzas de compresión y flexión, determinando que los porcentajes de reemplazo de 5% y 7.5% para resistencia a la compresión y flexión respectivamente son los parámetros adecuados para que una mezcla de concreto sustentable con incorporación de plástico HDPE pueda poseer propiedades de trabajabilidad y ductilidad aceptables con un módulo de ruptura de 45 kg/cm<sup>2</sup>.

Los resultados de otros autores respaldan los resultados del presente estudio, debido a la similitud de resultados obtenidos. Este tipo de estudios e investigaciones están abriendo un área de oportunidad de poder prevenir los tipos de fallas por fragilidad en las estructuras de concreto y por consecuencia mejorar su ductilidad [12]. Por lo tanto, existe una necesidad de continuar realizando investigaciones que continúen evaluando las propiedades y beneficios que pueden ofrecer los plásticos HDPE incorporados en el concreto [36].

Finalmente, se espera que el presente artículo, contribuya a futuras investigaciones para promover el potencial que presentan las mezclas de concreto hidráulico con incorporación de residuos plásticos, siendo un punto de partida para considerarlo como un concreto sustentable; y al ser el material más utilizado en la industria de la construcción, se ejecute su aplicación en elementos de concreto estructurales que generarán beneficios ambientales.

#### 3.1 Observaciones generales

Un agradecimiento especial al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, UABC Campus Mexicali y a Concretos Kaleb por el apoyo brindado para llevar a cabo este estudio experimental.

#### 4. REFERENCIAS

- [1] Abeyasinghe, S., Gunasekara, C., Bandara, C., Nguyen, K., Dissanayake, R., & Mendis, P. (2021). Engineering Performance of Concrete Incorporated with Recycled High-Density Polyethylene (HDPE)—A Systematic Review. *Polymers*, 13(11), 1885.
- [2] Arana, M. A. (2016). El concreto, material fundamental para la infraestructura. *Voz del Experto*, 24.
- [3] McCormac, J. C., & Brown, R. (2011). Diseño de concreto reforzado. Alfaomega Grupo Editor.
- [4] Wang, X., Yu, R., Shui, Z., Song, Q., & Zhang, Z. (2017). Mix design and characteristics evaluation of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete incorporating recycled coral based materials. *Journal of Cleaner Production*, 165, 70-80.
- [5] Nadimalla A, Masjuki SA, Saad AB, Ismail KB, Ali MB (2019) Polyethylene terephthalate (PET) bottles waste as fine aggregate in concrete. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 8: 1177-1180.
- [6] Molina, N. F., Mendoza, K. J., Añez, R. O., & Marulanda, W. U. (2021). Aprovechamiento sostenible de residuos poliméricos como agregados del concreto: Una revisión. *Interciencia*, 46(6), 240-247.
- [7] Tamrin y Nurdiana, J. (2021). El efecto de las adiciones de plástico HDPE reciclado en el desempeño del concreto. *Reciclaje*, 6 (1), 18.
- [8] LeBlanc, R. (2017). How long does it take garbage to decompose? *The Balance*.
- [9] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications.
- [10] Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2020). Plastic debris in the marine environment: History and future challenges. *Global Challenges*, 4(6), 1900081.
- [11] Silva, A. L. P., Prata, J. C., Walker, T. R., Campos, D., Duarte, A. C., Soares, A. M., ... & Rocha-Santos, T. (2020). Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Science of the Total Environment*, 742, 140565.
- [12] Pešić, N., Živanović, S., Garcia, R., & Papastergiou, P. (2016). Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. *Construction and building materials*, 115, 362-370.
- [13] Lopez, N., Collado, E., Diacos, L. A., & Morente, H. D. (2019). Evaluation of Pervious Concrete Utilizing Recycled HDPE as Partial Replacement of Coarse Aggregate with Acrylic as Additive. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 258, p. 01018). EDP Sciences.
- [14] NMX-C-414-ONNCCE. (2017). Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero de 2022).
- [15] Norma NMX-C-111-ONNCCE. (2018). Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero de 2022).
- [16] Norma NMX-C-077-ONNCCE. (2019). Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Ensayo. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero de 2022).
- [17] Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). Diseño y control de mezclas de concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- [18] NMX-C-122-ONNCCE. (2018). Industria de la Construcción - Agua para Concreto - Especificaciones. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero de 2022).
- [19] Sika Plastiment PR-550 SA, hoja de datos del producto, versión 02.01. 2018. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero de 2022).
- [20] Sika Viscoflow 8100, hoja de datos del producto, versión 01.01. 2018. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero de 2022).
- [21] Pagnussat, M. S. (2008). Comportamiento al impacto de compuestos híbridos HDPE/cáscara de maíz-bagazo (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería. Argentina).
- [22] Punitha, V., Sakthieswaran, N., & Babu, O. G. (2021). Experimental investigation of concrete incorporating HDPE plastic waste and metakaolin. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1032-1035.
- [23] Transportation Officials. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993 (Vol. 1). Aashto. [ Google Scholar ]
- [24] ACI Committee. (2004). Guide for Concrete Floor and Slab Construction. American Concrete Institute. [ Google Scholar ]
- [25] NMX-C-156-ONNCE. (2010). Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero del 2022).
- [26] NMX-C-435-ONNCE. (2010). Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Temperatura del Concreto Fresco. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero del 2022).
- [27] NMX-C-162- ONNCE. (2014). Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Masa Unitaria, Cálculo del Rendimiento y Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método Gravimétrico. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero del 2022).
- [28] NMX-C-157-ONNCE. (2006). Industria de la Construcción - Concreto - Determinación del Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método de Presión. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero del 2022).
- [29] ACI Committee 305.1-06 (2007). Specification for Hot Weather Concreting, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 7 págs. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 10 de enero de 2022).

- [30] Badache, A., Benosman, A. S., Senhadji, Y., & Mouli, M. (2018). Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). *Construction and Building Materials*, 163, 40-52.
- [31] ACI Committee 211. 1-91. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2009; pp. 1–38. [[Google Scholar](#)]
- [32] NMX-C-159-ONNCE. (2016). Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo. Disponible en línea: [Página de referencia](#). (consultado el 12 de marzo del 2021).
- [33] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318R-02; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2019; pp. 1–624. [[Google Scholar](#)]
- [34] Malagavelli, V., & Patura, N. R. (2011). Strength characteristics of concrete using solid waste an experimental investigation. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4(6).
- [35] Kobayashi, K., & Cho, R. (1981). Flexural behaviour of polyethylene fibre reinforced concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(1), 19-25.
- [36] Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., & Sivakugan, N. (2015). Use of macro plastic fibres in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 93, 180-188.