

# Elaboración de concreto ligero con residuos industriales reciclados

Adrián Bórquez Mendívil<sup>1</sup>, Ramón Álvaro Vargas Ortiz<sup>1</sup>, Jorge Luis Almaral Sánchez<sup>1</sup>, Fabricio Espejel Ayala<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Los Mochis, Sinaloa, 81200, México

<sup>2</sup> Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Sanfandila, Querétaro 76703, México

## Resumen

En este trabajo, se expone cómo se elaboró un tipo de concreto ligero, a partir del reciclaje de residuos industriales, lodo generado en una planta potabilizadora y vidrio proveniente de la industria de la construcción. Estos fueron mezclados en proporciones 50:50 y sometidos a temperatura de 1050° C y formaron un material vítreo con características similares a los materiales cerámicos celulares, con baja densidad aparente (0.55 g/cm<sup>3</sup>). Estos constituyeron el agregado ligero que sustituyó al agregado natural. Se midió la densidad (1779 kg/m<sup>3</sup>) y la resistencia a la compresión (25.5 MPa) del concreto ligero, cuyos valores se encontraron dentro de lo establecido por la norma ACI 318 para ser clasificados como concreto ligero estructural. Este desarrollo tecnológico podría ser utilizado en la industria de la construcción con el objetivo de disminuir el peso de las construcciones conservando su resistencia.

**Palabras clave:** Agregado ligero, concreto ligero, lodo.

## Abstract

*This paper explains how to make a type of lightweight concrete, from the recycling of industrial waste, generate a water treatment plant and a glass from the construction industry. The lightweight aggregate concrete was fabricated in 50:50 proportions of sludge and glass powder at 1050° C. A vitreous material with cellular material characteristics, with low apparent density (0.55 g/cm<sup>3</sup>), was formed from the chemical composition of the wastes used. Lightweight concrete was prepared using the lightweight aggregate concrete prepared in this work and a natural aggregate, respectively. Density (1779 kg/m<sup>3</sup>) and compressive strength (25.5 MPa) were measured. In both cases, these parameters were accord to values indicated on the ACI 318 to classify the concrete as lightweight concrete. This developed technology could be used in the building construction to minimize the weight of buildings maintaining the structural resistance.*

**Keywords:** Lightweight aggregate concrete, Lightweight concrete, Sludge.

---

Artículo arbitrado

---

Recibido:

aceptado:

22 de abril de 2019

25 de julio de 2019

## Introducción

En la actualidad, la utilización de residuos industriales como material de construcción, clasificados por la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 como residuos de manejo especial (aquellos generados en grandes volúmenes por procesos productivos y que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos), se presenta como un reto significativo para el Programa de Prevención y Gestión Integral de Residuos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Este último fomenta el manejo y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en México, con el financiamiento de estudios, programas y proyectos (SEMARNAT, 2018).

El reciclaje industrial resulta ser sustentable debido a que permite conservar la disponibilidad de recursos para futuras generaciones. Por ejemplo, se ha dado atención al reciclaje de varios tipos de residuos industriales para la producción de agregados ligeros (AGL) (Lau *et al.*, 2018). Estos materiales tienen una densidad aparente suelta no mayor que  $1.20 \text{ g/cm}^3$  y de partícula seca no mayor que  $2.00 \text{ g/cm}^3$  (González-Corrochano *et al.*, 2016); se clasifican en naturales y artificiales. La fuente primaria del tipo natural es de origen volcánico, como la pumita y escoria y los artificiales. Pueden ser elaborados a través de tratamientos térmicos de materiales naturales, derivados de productos industriales, así como de materiales de desecho (Lau *et al.*, 2018).

Se han realizado diversos estudios para obtener agregados ligeros que consideran distintos tipos de residuos, tales como los lodos generados en el proceso de potabilización de agua (LPP) y en el tratamiento de aguas residuales, así como sedimentos de río, por mencionar algunos (Liu *et al.*, 2017), (Ramírez Zamora *et al.*, 2016). También se han utilizado otros como el lodo residual de arena, el de las rocas zeolíticas y el vidrio pulverizado. A partir de los residuos mencionados, se han desarrollado agregados ligeros con distintas resistencias a compresión (0.18 a 16 MPa), baja densidad ( $0.30$  a  $1.05 \text{ g/cm}^3$ ) y alta porosidad (44.40 a 66.00 %), en los que también se han utilizado agentes espumantes,

como hidróxido de sodio, silicato de sodio y arcilla tipo esmectita, en los que se emplea temperaturas de  $900$  a  $1275^\circ \text{ C}$  (Volland *et al.*, 2015; Spathi *et al.*, 2015).

La aplicación del agregado ligero artificial ha aumentado en los últimos años y se utiliza en diferentes tipos de construcciones y en la producción de distintos tipos de concreto ligero, dependiendo de las materias primas utilizadas para la composición de la matriz de mortero y agregado (Dondi *et al.*, 2016). Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo demostrar que el LPP mezclado con polvo de vidrio (V) puede ser utilizado para elaborar un AGL para fabricar concreto ligero.

## Método

### Fabricación de AGL

#### *Materia prima utilizada en la fabricación de AGL.*

El lodo residual utilizado en este estudio proviene de la planta potabilizadora Acueducto II ubicada en Cadereyta, Querétaro. El vidrio empleado fue obtenido de obras de remodelación en Pedro Escobedo, Querétaro. Ambos residuos fueron sometidos a un proceso de trituración, cribado y tamizado en malla No. 30, para obtener un tamaño máximo de partícula de  $590 \mu\text{m}$  (Ramírez Zamora *et al.*, 2016).

#### *Caracterización de la materia prima*

Para conocer la composición química elemental, se caracterizaron el vidrio y el lodo, por espectroscopia dispersiva de rayos-X (EDX) mediante un detector de energía dispersiva de rayos-X, marca *Bruker*, modelo *X Flash 6110*. Para identificar su estructura cristalina, los materiales se caracterizaron mediante la técnica de Difracción de Rayos-X (DRX) empleando un difractómetro de rayos-X, marca *Bruker*, modelo *D8 Advance*.

#### *Proceso de fabricación del agregado ligero*

Se determinó la composición química inicial a diferentes proporciones del material a fabricar. Esto se realizó mediante un análisis comparativo, tomando como referencia los trabajos reportados por

Anh Thuan *et al.* (2014): la proporción 50:50 (LPP:V) presentó una composición semejante a lo estudiado. Esta fue seleccionada para explorar la temperatura de formación del cerámico celular deseado.

Para la elaboración de probetas de AGL, se procedió a la homogeneización de LPP y el V; posteriormente, se adicionó agua desionizada para su mezclado hasta obtener una pasta homogénea, la cual fue depositada en moldes cilíndricos conforme a lo descrito en la norma ASTM C31 (2019). Las probetas se secaron por 24 horas a temperatura ambiente y, posteriormente se colocaron en un horno de secado a 100°C durante 24 horas.

Las temperaturas estudiadas para la elaboración del AGL fueron de 1020, 1050 y 1100°C, a una velocidad de calentamiento de 7°C/min; para ello, las probetas se introdujeron en una mufla *Thermolyne F600*. Una vez alcanzada la temperatura de estudio, el equipo se apagó inmediatamente lo que permitió el enfriamiento gradual de la muestra.

### Caracterización del AGL

Las características del agregado obtenido fueron determinadas conforme a lo descrito en las normas ASTM C29 (densidad aparente) y ASTM C127 (densidad real, porosidad y absorción). Ya definido el agregado a emplear, se caracterizó la morfología y distribución de sus poros por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) acoplado con la espectroscopia de energía dispersiva de rayos X. (EDX). Para conocer su estructura cristalina, se empleó la técnica de DRX.

### Fabricación de concreto ligero

#### Materiales utilizados

En las mezclas de concreto, el cemento Portland tipo I, fue empleado como aglutinante; mientras que el AGL endurecido a 1050°C fue el material empleado como sustituto del agregado grueso para la fabricación de concreto.

### Caracterización de agregados naturales y artificiales

El análisis de las propiedades físicas de granulometría, densidad y absorción de agregados naturales y artificiales se realizó bajo lo establecido en las normas ASTM C33 (2018), ASTM C127 (2015) y ASTM C136 (2014), respectivamente.

### Diseño de mezclas

Se diseñaron dos mezclas de concreto con el fin de probar la capacidad del agregado ligero fabricado para su aplicación en concreto ligero. En la

Tabla 1, se presenta la dosificación empleada para el diseño de mezclas. La primera corresponde a la del concreto convencional y la segunda, al concreto ligero, en el cual se sustituyó el 100 % de agregado grueso natural por el ligero.

Concreto hidráulico					
Material	Convencional			Ligero	
	m <sup>3</sup>	Densidad (kg/ m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Densidad (kg/ m <sup>3</sup> )	Peso (kg)
Cemento	0.170	3150.0	535.5	3150.0	535.5
Agua	0.205	1000.0	205.0	1000.0	205.0
AG seco	0.420	2750.0	1155.0	560.0	235.2
AF seco	0.205	2600.0	533.0	2600.0	533.0

**Tabla 1.** Dosificación de materiales (en peso) para 1 m<sup>3</sup> de concreto hidráulico (convencional y ligero), (AG = Agregado grueso, AF = Agregado fino). Fuente: elaboración propia.

### Elaboración de probetas de concreto

La elaboración de probetas de concreto hidráulico convencional y ligero se realizó de acuerdo a lo estipulado por la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014 (García, 2015), que especifica el uso de probetas cúbicas de 10 cm por lado.

*Caracterización de concreto convencional y ligero*

Se determinó la densidad a las probetas elaboradas con concreto convencional y ligero siguiendo lo establecido en la norma ASTM C567 (2014). Con base en ello, fueron sometidas a ensayos de compresión, con una velocidad de carga de 0.1 MPa/s, mediante la prensa universal marca INSTRON modelo 8503, con *software Wave Matrix* versión 1.7. Se evaluó la resistencia a compresión a 28 días de curado, conforme a lo descrito por la norma ASTM C39 (2018).

**Resultados**

**Agregado ligero**

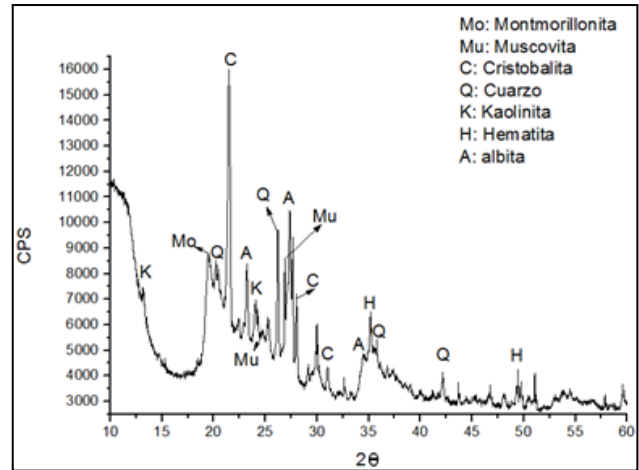
*Caracterización de la materia prima*

En la Tabla 2, se presenta la composición química, obtenida mediante la técnica EDX, del LPP y V. Se observa que los principales elementos del LPP son SiO<sub>2</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y en pequeña proporción, MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub>. Del V: SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, CaO y en menor proporción, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>O.

Óxido	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
LPP	43.4	13.4	0.9	20.5	2.8	1.8	17.0	0.2
Vidrio	74.1	2.0	13.6	6.5	3.6	0.2	-	-

**Tabla 2.** Composición química elemental de la materia prima (valores en porcentaje masa). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 1, se presenta el difractograma correspondiente a la muestra de LPP. Se observa la presencia de aluminosilicatos tipo arcillas (montmorillonita, muscovita, kaolinita) y arena (cuarzo), feldespatos (albita), óxido de hierro (hematita) y mullita. Se debe considerar la presencia de hierro en la fase amorfa, el cual no es detectado por DRX pero resultó en el estudio por la técnica de EDX.



**Figura 1.** Difractograma de rayos-X de los lodos de planta potabilizadora. Fuente: elaboración propia.

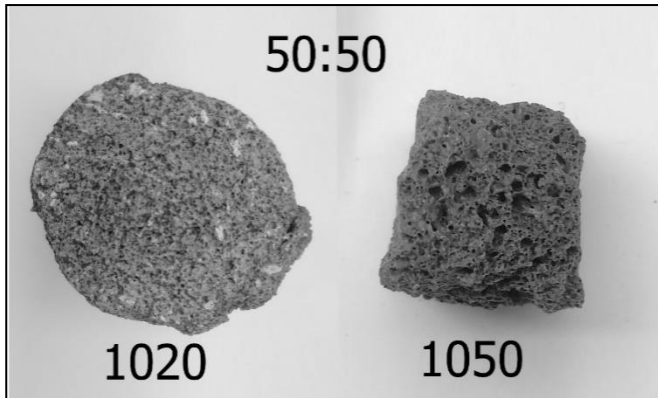
*Caracterización del AGL*

En la Tabla 3, se muestran los porcentajes de los elementos de las mezclas que conforman las probetas del AGL. Destacan principalmente la presencia de SiO<sub>2</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y Na<sub>2</sub>O.

Óxido	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
LPP50:V50	58.7	7.7	7.3	13.4	3.3	1.0	8.5	0.1

**Tabla 3.** Composición química elemental de las probetas estudiadas (valores en porcentaje masa). Fuente: elaboración propia.

Al someterse a temperatura de 1100 °C, el material se fundió parcialmente. Se trabajó a menor temperatura, iniciando con 1050° C. Esa probeta se formó adecuadamente. Por otro lado, se disminuyó la temperatura a 1020° C para explorar si el material pudiera resultar con las propiedades físicas adecuadas para elaborar el concreto ligero. En la Figura 2, se presentan dos muestras del AGL con la proporción de materia prima LPP50:V50 preparados a temperatura de 1020 y 1050° C. Se aprecia que la segunda posee mayor porosidad y mayor tamaño, lo cual es deseable para este tipo de material y que pudiera ser elegible como mejor muestra para la fabricación del concreto ligero.



**Figura 2.** Sección transversal de las muestras con LPP50:V50, elaboradas a temperaturas de 1020 y 1050 °C. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 4, se presentan las propiedades físicas (densidad, porosidad y absorción) del AGL elaborado a 1020 y 1050° C. Se observa que éste último presenta disminución de densidad e incremento en porosidad y absorción, por lo cual el AGL formado a 1050° C presenta mejores cualidades.

Muestra	T (°C)	$d_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$d_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	P (%)	A (%)
LPP50:V50-1020	1020	0.93	1.653	43.44	17.57
LPP50:V50-1050	1050	0.549	1.486	63.06	19.86

**Tabla 4.** Propiedades físicas del material fabricado a partir de LPP y vidrio. T, temperatura;  $d_a$ , densidad aparente;  $d_r$ , densidad real; P, porosidad; A, absorción de agua. Fuente: elaboración propia.

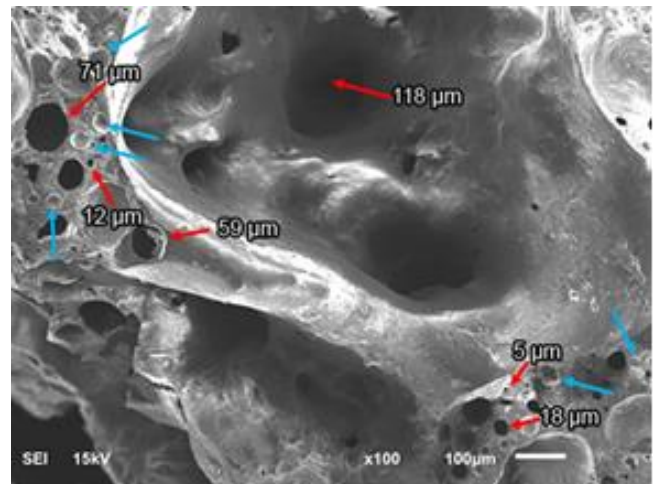
En la Figura 3, se presenta la micrografía por MEB de una muestra del AGL (LPP50:V50-1050). Se observa la presencia de poros en diferentes tamaños, macroporos (mayores a 50  $\mu$ m) y mesoporos (entre 2 y 50  $\mu$ m), donde se identifican macroporos de 59, 71 y 118  $\mu$ m, así como mesoporos de 5, 12 y 18  $\mu$ m. También se deduce que se presenta un arreglo combinado de celdas abiertas y cerradas. En la Figura 3, las celdas abiertas están indicadas con flechas rojas mientras las celdas cerradas por flechas azules. Esta estructuración es característica de un material cerámico celular (Gibson y Ashby, 1997).

La morfología del cerámico celular pulverizado puede observarse en la Figura 4. Se presentan poros

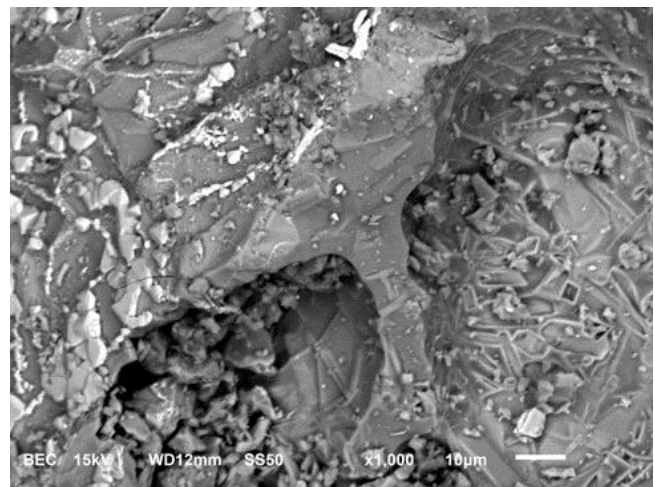
en los cuales, dentro y a su alrededor, se aprecian partículas con formas angulares y superficies relativamente lisas que puede suponerse son cristales de aluminosilicatos, de acuerdo a lo verificado en otros trabajos (Espejel-Ayala *et al.*, 2013; Ramirez Zamora *et al.*, 2016). La Tabla 6 muestra el análisis elemental de la muestra.

Elemento	Si	Al	Na	Ca	Mg	Fe	C	O
AGL	21.65	2.06	11.51	10.41	2.51	6.97	5.95	38.94

**Tabla 5.** Análisis elemental de la muestra de AGL de la Figura 4 realizado con la técnica de EDX. Fuente: elaboración propia.

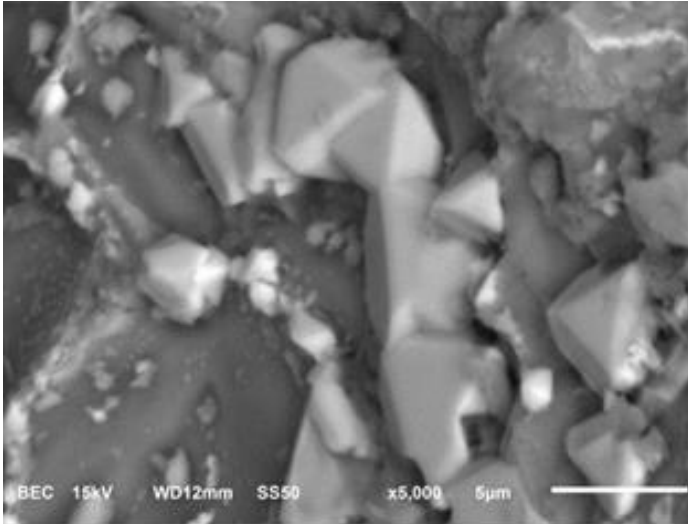


**Figura 3.** Morfología y distribución de los poros del material LPP/Vidrio. Fuente: elaboración propia.

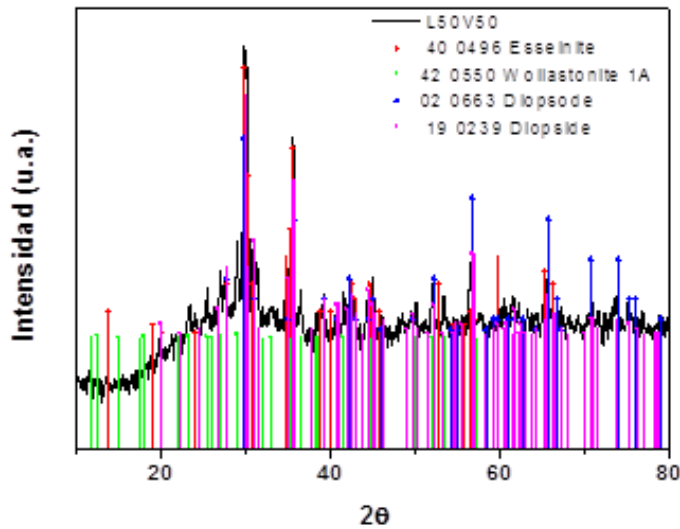


**Figura 4.** Micrografía de SEM de AGL (X1000). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5, se aprecian partículas de cristales de forma poliédrica que varían de 0.2 a 5 µm. La imagen de esta figura se tomó con la modalidad de electrones retrodispersados donde los elementos de mayor peso atómico se ven más brillosos que los de menor peso atómico. Posiblemente sean esenita o wollastonita, con Fe y Ca, respectivamente.



**Figura 5.** Micrografía de SEM de AGL (X5000). Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.** Difractograma de RX del AGL LPP50:V50. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6, se muestra el espectro de DRX correspondiente a la muestra del AGL LPP50:V50.

De acuerdo a la tarjeta PDF 00-040-0496, se observa la presencia de esenita (CaFe + 3AlSiO<sub>6</sub>); la tarjeta

PDF 00-042-0550 indica contenidos de wollastonita (CaSiO<sub>3</sub>), además de trazas correspondientes a diopsita [CaMg(SiO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>], de acuerdo con el PDF 00-002-0663 y 00-019-0239. Lo anterior coincide con los elementos iniciales del agregado ligero antes de ser procesado. Por ejemplo, lo anterior se deduce de los siguiente, cuarzo más una fuente de calcio (en el vidrio) forman wollastonita (Ferry *et al.*, 2001).

### Caracterización de agregados naturales y artificiales

En la Tabla 6, se muestran las propiedades físicas, densidad y absorción, del agregado grueso natural (AGN) y el ligero (AGL), determinadas bajo las normas ASTM C127 (2015) y ASTM C136 (2014). Se observa una notoria disminución en la densidad del AGL respecto al AGN en un tercio aproximadamente y un incremento en la absorción de más de 20 veces. Por lo anterior, el AGL presenta propiedades físicas adecuadas para ser utilizados en la elaboración de concreto ligero.

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción (%)
AGN	1.9	0.9
AGL	0.55	19.86

**Tabla 6.** Densidad y absorción de agua de los agregados estudiados. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7, se presenta la granulometría del AGN y del AGL, donde se observa que ambos agregados cumplen con los límites granulométricos establecidos por la norma ASTM C33 (2018), por lo cual, son adecuados para la elaboración de concreto.

Abertura de malla (mm)	19	12.5	9.5	4.8	2
Límites (%)	100	90-100	40-70	0-15	0-5
% que pasa - AGN	100	93.2	58.3	12.4	3.1
% que pasa - AGL	100	96.4	52.6	9.6	2.4

**Tabla 7.** Granulometría del agregado grueso natural (AGN) y agregado grueso ligero (AGL) y límites granulométricos de la ASTM C33. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla , se presenta la granulometría del agregado fino natural, el cual cumple con los límites granulométricos establecidos por la norma ASTM C33 (2018); por lo que, es adecuado para su empleo en el concreto.

Abertura de malla	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 μm	300 μm	150 μm
Límites (%)	100	95-100	80-100	50-85	25-60	5-30	0-10
% que pasa	100	94	86	80	56	27	5

**Tabla 8.** Granulometría del agregado fino natural y límites granulométricos de la ASTM C33. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con *Ćosić et al.* (2015), los agregados naturales pueden estar compuestos por dolomita y escoria de acero, lo cual se considera para este trabajo.

### Concreto ligero

#### *Caracterización de concreto convencional y ligero*

En la Tabla 9, se observa la densidad obtenida del concreto convencional y del ligero a 28 días de curado por medio de la norma ASTM C567 (2014). Las densidades resultantes son aceptables tanto para el concreto convencional como para el ligero.

Tipo de concreto	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Convencional	2295.5
Ligero	1779

**Tabla 9.** Densidad a 28 días de curado (kg/m<sup>3</sup>). Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 10, se presenta el resultado de la resistencia a la compresión (F'c) del concreto convencional y del ligero a 28 días de curado por medio de la norma ASTM C39 (2018).

Tipo de concreto	Resistencia a la compresión, F'c, (MPa)
Convencional	43.79
Ligero	25.5

**Tabla 10.** Resistencia a la compresión a 28 días de curado (kg/cm<sup>2</sup>). Fuente: elaboración propia.

La resistencia a la compresión del concreto convencional cumplió con el valor esperado de acuerdo con su diseño de mezcla. Por su parte, el valor de esta propiedad del concreto ligero (25.50 MPa) cumple con lo establecido en la ACI 318 (2014), que especifica una F'c mayor a 17.2 MPa, para considerarse como concreto ligero estructural.

### Discusión y conclusiones

El uso de materiales alternativos a los agregados naturales para elaborar concreto es una práctica que permite la conservación de los recursos naturales. Además, el beneficio ambiental puede incrementar si estos agregados son elaborados con residuos, como los lodos generados en el tratamiento de aguas y desecho de vidrio generado en la industria de la construcción. En el trabajo, se contempló utilizar ambos residuos compatibles con el concreto al estar constituidos principalmente por aluminosilicatos, de tal manera que la presencia de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es necesaria para la formación vítrea del agregado (*Marangoni et al.*, 2014).

Por otro lado, los fundentes como el Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, aseguran que a altas temperaturas exista el desarrollo de la fase vítrea con suficiente viscosidad (*Spathi et al.*, 2015). Los primeros óxidos mencionados se encuentran en el lodo y el vidrio y, los segundos, solo en el lodo (*Anh Thuan et al.*, 2014; *Spathi et al.*, 2015). En ambos casos se encuentran en cantidades adecuadas para que se forme la fase vítrea con la presencia de materiales fundentes. Además, a las temperaturas de preparación del agregado ligero, se realizó la evolución de gases provenientes de la materia orgánica que contiene el lodo (*Ramirez Zamora et al.*, 2016). Esto propició la formación de poros y, a su vez, promovió una baja densidad aparente en el mismo.

Comparado con el agregado natural estudiado, se observó una notoria disminución en la densidad del agregado preparado respecto al natural, aproximadamente en un tercio y un incremento 20 veces mayor de la absorción de agua. Por lo anterior,

se observó que el agregado sintetizado a partir de lodo y vidrio presentó propiedades físicas adecuadas para elaborar concreto ligero (González-Corrochano *et al.*, 2016). Los valores de densidad y de resistencia a la compresión a los 28 días, para el concreto elaborado con ambos tipos de materiales agregados por separado, se encontraron dentro de lo establecido en el código ACI 318 (2014).

A partir de lo anterior, en este trabajo, no sólo se promueve el uso de residuos como agregados para fabricar concreto, sino que el elaborado tiene las características adecuadas para ser clasificado como concreto ligero. Con esto, se pretende que este desarrollo tecnológico pueda ser utilizado en la industria de la construcción con el objetivo de disminuir el peso de las construcciones conservando su resistencia estructural.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la CEA-Querétaro por las facilidades prestadas en la adquisición de la muestra de lodo. También, los autores agradecen al Dr. Jorge Terán Guillen, del Instituto Mexicano del Transporte, por su apoyo brindado en la realización de las pruebas de compresión de los materiales. También, los autores agradecen al CONACYT por el apoyo brindado mediante el proyecto 255456.

## Referencias

American Concrete Institute. (2014). *318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Ed. ACI Commite 316, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Anh Tuan, B.L., Gebregiorgis Tesfamariam, M., Chen, Y.-Y., Hwang, C.-L., Lin, K.-L. y Young, M.-P. (2014). Production of lightweight aggregate from sewage sludge and reservoir sediment for high-flowing concrete. *Journal Construction Engineering Management*, 140, pp.1-7. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000835.

ASTM International. (2017). *ASTM C29 / C29M-17a, Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0029\_C0029M-17A

ASTM International. (2019). *ASTM C31 / C31M-19, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0031\_C0031M-19

ASTM International. (2018). *ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0033\_C0033M-18

ASTM International. (2018). *ASTM C39 / C39M-18, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0039\_C0039M-18

ASTM International. (2015). *ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0127-15

ASTM International. (2014). *ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0136\_C0136M-14

ASTM International. (2014). *ASTM C567 / C567M-14, Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0567\_C0567M-14

Ćosić, K. et al. (2015). Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 78, pp. 69-76. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073

Dondi, M. et al. (2016). Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating. *Construction and Building Materials*, 127, pp. 394-409. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.111.

Espejel-Ayala, F., et al. (2013). Novel self-foaming composites produced from recycled water potabilisation sludge. En Marquis F. (eds) *Proceedings of the 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing*. Springer, Cham.

Ferry, J.M., Wing B.A., Umble III D. (2001). Formation of Wolastonite by chemically reactive fluid flow during contact metamorphism, Mt. Morrison Pendant, Sierra Nevada, California, USA. *Journal of Petrology*, 42, pp. 1705-1728.

García, J. B. (2015). Correlación de la resistencia a la compresión en cubos y cilindros de acuerdo a NMX-C-155-ONNCC-2014. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 4, (10), pp. 30-33.

Gibson, L.J., Ashby M.F. (1997). *Cellular solids. Structure and properties*. United Kingdom: Cambridge University Press.

González-Corrochano, B., et al. (2016). Valorization of washing aggregate sludge and sewage sludge for lightweight aggregates production. *Construction and Building Materials*. 116. 252-262. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.095

Lau, P. C., Teo, D. C. y Mannan, M. A. (2018). Mechanical, durability and microstructure properties of LWC using aggregate made from



lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 176, 24-34. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.179

Liu, M., Xu, G. y Li, G. (2017). Effect of the ratio of components on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, pp. 109-116. doi: 10.1016/j.psep.2016.10.018

Marangoni, M. et al. (2014). Cellular glass-ceramic from a self foaming mixture of glass and basalt scoria. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 403, pp. 38-46. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2014.06.016

Ramírez Zamora, R.M. et al. (2016). Optimisation and analysis of the synthesis of a cellular glass-ceramic produced from water purification sludge and clay. *Applied Clay Science*, 12, pp. 232-238. doi: 10.1016/j.clay.2015.11.012

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat]. (2018). *Programa de Prevención y Gestión Integral de Residuos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Semarnat. México.

Spathi, C., Vandeperre, L. J. y Cheeseman, C. R. (2015). Production of lightweight fillers from waste glass and paper sludge ash. *Waste biomass valorization*, 6, pp. 875-881. doi: 10.1007/s12649-015-9370-7

Volland, S. y Brötz, J. (2015). Lightweight aggregates produced from sand sludge and zeolitic rocks. *Construction and Building Materials*, 85, pp. 22-29. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.018