

# ESTUDIO DE MORTEROS CON USO DE VIDRIO MOLIDO COMO SUSTITUTO PARCIAL DE AGREGADO FINO

STUDY OF RECYCLED GROUND GLASS AS PARTIAL SUBSTITUTE OF FINE AGGREGATE IN MORTARS

Pérez-Pimentel R.I.<sup>1</sup>, Martínez-Camacho J.A.<sup>1</sup>, Hernández-Cruz D.<sup>2</sup>,  
Godínez-Domínguez E.A.<sup>2</sup>

## RESUMEN

*En este artículo, se propone el empleo de vidrio reciclado y molido de tonalidades blanca y ámbar como reemplazo de agregado fino en mortero base cemento portland, con porcentajes del 10%, 15% y 20%, y con una relación agua-cemento de 0.53. Se analiza el comportamiento mecánico de probetas, mediante pruebas de resistencia a la compresión. Además, se realizaron análisis por Difracción de Rayos X (DRX) en algunos componentes utilizados, para conocer la estructura cristalina, la morfología y la composición de los materiales. La incorporación del vidrio molido incrementa, en general, hasta en un 27% en promedio, el valor de la resistencia a la compresión, principalmente utilizando porcentajes entre el 15% y 20%, comparado con el espécimen de control. Por el incremento observado en la resistencia mecánica, se considera que estas mezclas podrían emplearse en procesos constructivos, como mortero para pegue de piezas de mampostería y para la elaboración de bloques.*

**Palabras clave:** Residuos sólidos, vidrio molido, mortero, resistencia a la compresión.

## ABSTRACT

In this paper the authors summarize the results of a study devoted to show the effect of

using recycled ground glass both, white (transparent) and amber as replacement of fine aggregate in mortar, using percentages of replacement of 10%, 15% and 20%, with water-cement ratio of 0.53. Compressive strength test was carried out. Besides, X-Ray Diffraction (XRD) were also performed, in order to identify the crystal structure, the morphology and composition of the materials. The replacement of the ground glass, in general, increases the compressive strength of mortars mixtures in 27% in average, when percentages between 15% and 20% of glass replacement are used, compared to the control specimen results. Based these results, mortar mixes with recycled ground glass, as fine aggregate replacement, could be use as joint of blocks of simple masonry building houses, to fabricate blocks, due to the increment in compressive strength values obtained.

**Keywords:** Solid waste, ground glass, mortar, compressive strength.

## INTRODUCCIÓN

La industria del vidrio y el cemento se han enfrentado a diversos desafíos como el aumento del costo de los combustibles, el uso de mayor energía, las necesidades para reducir la enorme cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente las emisiones de CO<sub>2</sub> y el suministro de las materias primas en cantidades y calidades suficientes.

Recientemente se estimó que el consumo de energía de la industria del cemento aumentó entre el 12% y 15%. Además, la producción de cada tonelada de clinker de cemento consume entre 1.5 y 1.7 toneladas de las materias primas. Como ejemplo, la industria cementera China consume anualmente alrededor de 1,500 millones de toneladas de piedra caliza y arcilla (Yahya et al. 2014). En 2011, fue el país líder en la producción mundial, como se muestra en la Figura 1.

<sup>1</sup> Estudiante de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas

<sup>2</sup> Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería- Universidad Autónoma de Chiapas

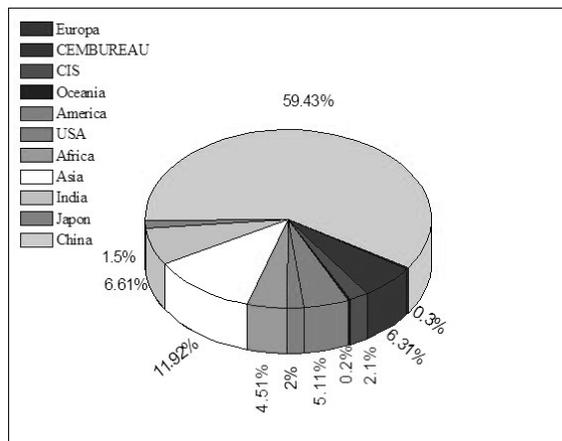


Figura 1. Esguerrimientos en la presa La Angostura (SRGHG, 2017)

De acuerdo con Yahya et al. (2014), la emisión global de CO<sub>2</sub> aumentará en más del 50% para el año 2030 debido al aumento en la tasa de producción anual de cemento. Es decir, se espera que la producción anual de cemento mundialmente aumente a unos 4,000 millones de toneladas por año (Schneider et al. 2011). Por lo que se tiene que buscar un mecanismo para la disminución en la generación de CO<sub>2</sub> por la industria cementera, el cual puede ser sustituyendo o reemplazando este producto, con otros materiales que tengan propiedades similares.

Además, estas emisiones de CO<sub>2</sub> son también generadas por el transporte de las extracciones de agregados pétreos (arena o grava) que está repercutiendo gravemente en los ríos, ecosistemas costeros y marinos, así como las montañas de varias localidades, provocando entre otras, la pérdida de tierras por erosión, la disminución de los niveles freáticos, la reducción del suministro de sedimentos, cambios en los patrones climáticos al no contar con las barreras naturales que representan los cerros, por ejemplo, contra corrientes de viento.

Por otra parte, refiriéndose a la industria del vidrio, se puede tener una ventaja, pues se considera teóricamente que, se puede reciclar infinitamente sin perder ninguna de sus propiedades químicas (Schneider et al. 2011), sin embargo, después de ser recogido de la corriente de residuos domésticos son de color mixto, dando como resultado impurezas y contaminantes que pueden afectar las propiedades de la nueva producción de vidrio (Bian, 2003).

Debido a los volúmenes de desechos y los crecientes costos de disposición y reducción, se ha dado

lugar a una tendencia definitiva hacia el reciclaje o el uso de una amplia variedad de materiales de desecho sólido (Tam et al. 2006). De esta manera, se propone el uso de material de desecho sólido, vidrio, que podría reducir en cierta medida la emisión de CO<sub>2</sub>, entre un 5% y un 20%, dependiendo del porcentaje de reemplazo de vidrio como agregado fino, de acuerdo a Yahya et al. (2014). Mohjarani et al. (2017), además de que abordan este tema, también enfatizan el hecho en la controversia o contradicción de diversos autores respecto a los distintos resultados que presentan, ya sea por el efecto del tamaño de partícula del vidrio, por el tipo de vidrio (tonalidad y fuente de obtención) o por las reacciones físico-químicas que no se conocen en su totalidad. Pese a todo esto, valoran el uso de vidrio reciclado como sustituto de agregados finos para mejorar las propiedades de los morteros, concretos o asfaltos.

Por lo anterior, en este trabajo se busca identificar el efecto de la variación del porcentaje de vidrio a emplear en morteros, como remplazo de agregado fino (arena), evaluando su eficiencia mediante pruebas de resistencia mecánica en que se obtiene como parámetro básico la resistencia a compresión simple (f'c).

## MÉTODOS

### Materiales

Los agregados pétreos empleados para la elaboración de los morteros, como la arena, cumplen con las especificaciones de la norma NMX C 111 ONNCCE 2014. En este caso, la granulometría se determinó con base en el procedimiento establecido en la norma NMX C 077 ONNCCE 1997.

Se utilizó vidrio de botellas trituradas, de tonalidad blanca (transparente) y ámbar. Del pulverizado, se obtuvieron partícula de entre 25  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$ , después de ser tamizado con una malla #60. Para el pulverizado se utilizó un molino planetario de bolas de la marca Retsch modelo PM 400/2, con una velocidad de 200 revoluciones/min en un tiempo de 5 minutos.

Se empleó cemento Portland compuesto (CPC) tipo II 30R RS, de la marca Cemex, que cumple con las especificaciones de la norma NMX C 414 ONNCCE 2015 de México y la ASTM C 595 de los Estados Unidos de Norteamericana.

### Elaboración de probetas

Se empleó la norma ASTM C 270 para elaborar el diseño de mortero con resistencia mínima a compresión simple ( $f'c$ ) a 28 días de 176 kg/cm<sup>2</sup>.

Los morteros fueron colados en moldes cúbicos de 5 cm x 5 cm x 5 cm, de acuerdo a la norma ASTM C 109. El proceso de curado cumple con la norma NMX C 148. Para monitorear la temperatura y humedad de las probetas de mortero se empleó un dispositivo arduino, con el sensor DHT 11, para realizar el registro de dichos parámetros, que en promedio indicaba 29°C, con 98% de humedad.

### Difracción de rayos X (DRX)

Para los análisis de composición de los materiales se empleó un difractómetro de Rayos X RIGAKU, modelo Smartlab (con un emisor de Cu  $\alpha$ ), el voltaje y la corriente empleados para las mediciones fue de 40 Kv y 44 con un modo de operación de  $\theta/2\theta$ .

De acuerdo al difractograma mostrado en la figura 2, se confirma que la naturaleza del vidrio es amorfa, tanto para el de tonalidad ámbar, como para el de tonalidad blanco (transparente). Mientras tanto, en la figura 3 se muestra el difractograma de la arena, la cual está formada principalmente por silicatos: Albita ordenada (Na Al Si<sub>3</sub> O<sub>8</sub>), Microclina (K (Al Si<sub>3</sub> O<sub>8</sub>)) y Cuarzo (Si O<sub>2</sub>). Por otra parte, en la figura 4 se muestra el difractograma del Cemento tipo II, se observa el alto contenido de silicatos cálcicos.

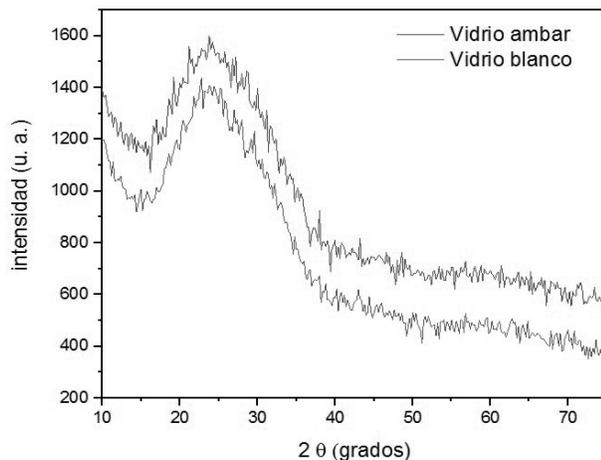


Figura 2. Difractograma del vidrio de tonalidad ámbar y blanco (transparente). Fuente: Elaboración propia.

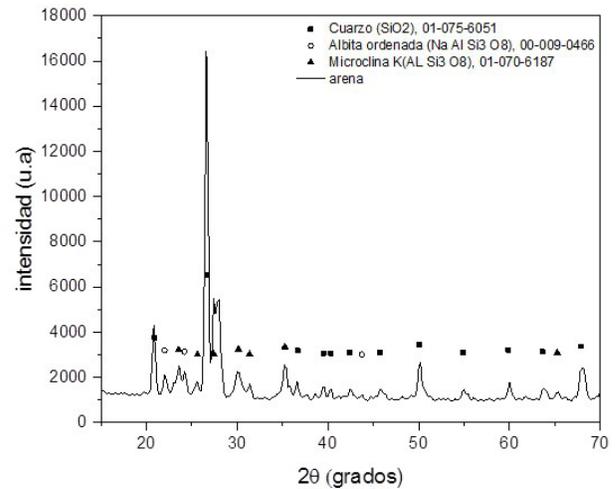


Figura 3. Difractograma del árido (arena).

Fuente: Elaboración propia.

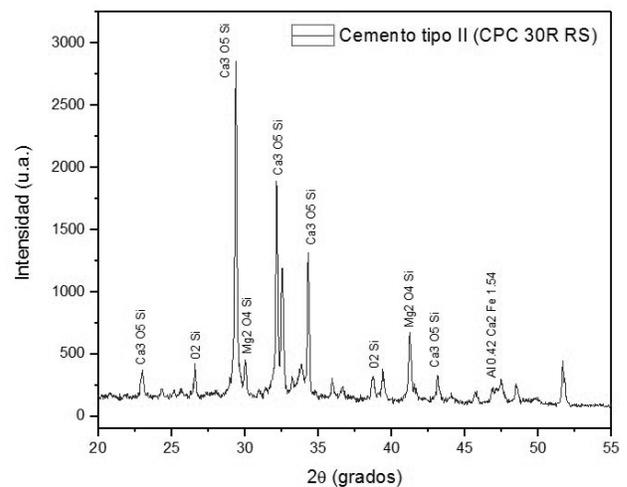


Figura 4. Difractograma del cemento tipo II (CPC 30R RSS). Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1, se presenta, únicamente como referencia, la composición química de dos tipos o tonalidades de vidrio reportados por Yahya et al. (2014), semejantes a los empleados en este estudio. Mientras, en la Tabla 2, se muestra la composición química típica del cemento tipo II (reportada por Cemex, concretos). En ambos casos, la composición fue obtenida por medio de espectroscopia de fluorescencia de Rayos-X (XRF).

**Tabla 1. Composición química del vidrio ámbar y blanco, obtenida por XRF.**

Composición	Vidrio Blanco	Vidrio Ámbar
	% Peso	% Peso
SiO <sub>2</sub>	72.42	72.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.44	1.37
CaO	11.5	11.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.36
MgO	0.32	0.46
Na <sub>2</sub> O	13.64	13.75
K <sub>2</sub> O	0.35	0.20
SO <sub>3</sub>	0.21	0.10
TiO <sub>2</sub>	0.035	0.041

Fuente: Yahya et al 2014

### Microscopía electrónica de Barrido (SEM)

Las imágenes y caracterizaciones de los elementos de las muestras fueron tomadas con un microscopio de alta resolución Marca SU5000 con el sistema MonoCL4 principal de CL. Las muestras en polvo de vidrio fueron montadas sobre cinta de carbón, en un porta muestras de aluminio.

**Tabla 2. Composición de óxidos en un Cemento Portland, obtenida por XRF.**

Oxido	% Peso
CaO	63.00
SiO <sub>2</sub>	22.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.50
MgO	2.60
K <sub>2</sub> O	0.60
Na <sub>2</sub> O	0.30
SO <sub>3</sub>	2.00

Fuente: Cemex, concretos

## RESULTADOS

El tamaño de partícula del vidrio desempeña un papel de gran relevancia en las reacciones y rendimiento del mortero, en cuanto más fino sea el vidrio mayor es su actividad puzolánica (Caijun et al. 2004), la reacción álcali-sílice (ARS) podría aumentar de acuerdo al tamaño de partícula empleada (Yahya et al. 2014), la resistencia a compresión simple puede aumentar o disminuir de acuerdo al porcentaje de sustitución y tamaño de partícula del agregado fino (Ling et al. 2013).

En este caso y de acuerdo a lo reportado en la figura 5, podría tenerse el efecto como puzolana (por el porcentaje de finos incluido menor a 75 micras) o

como agregado pétreo (arena), según el tamaño de partícula observado, entre 25  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$ . Estos valores concuerdan con el tamaño de partícula que deja pasar la malla #60, utilizada para realizar el tamizado.

Como referencia de la morfología típica del cemento tipo II (CPC 30R RS), la figura 6 muestra una micrografía obtenida por Tescan Orsay Holding S.A., en la que se observan partículas finas, medianas y grandes, con formas angulosas e indefinidas no hidratadas.

Para realizar el diseño del mortero se empleó la norma ASTM C 270 (Especificaciones para morteros de mampostería). La tabla 3 presenta el respectivo diseño de mortero, en donde se utilizó una relación agua/cemento de 0.53.

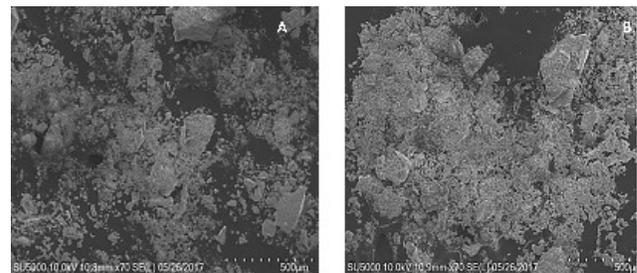


Figura 5. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de vidrio ámbar (izquierda) y blanco (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

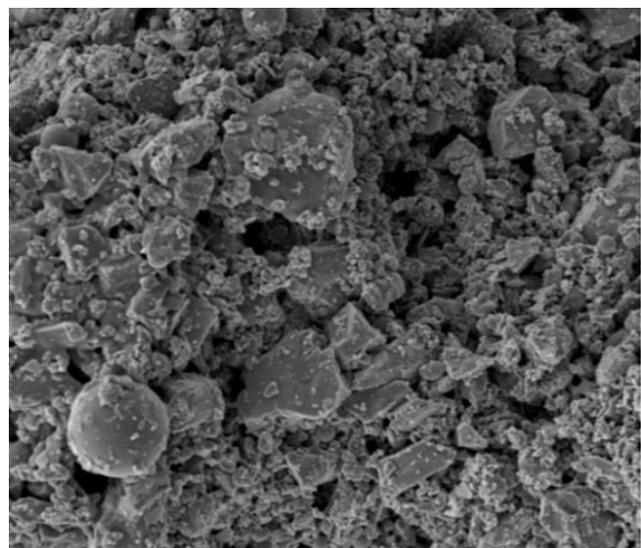


Figura 6. Imagen de microscopía electrónica de barrido del cemento tipo II (CPC 30R RS) no hidratada.

Fuente: Tescan Orsay Holding S.A.

Tabla 3. Diseño de mortero

	Agua	Cemento	Agregado Fino
Masa (kg/m <sup>3</sup> )	278.77	530	1433.88
Mat. A usar (gr)	345.11	656.14	1775.14
Proporciones	0.53	1	2.7

En la prueba mecánica de resistencia a compresión simple ( $f'c$ ) las probetas cumplieron con los diagramas de falla especificados (Figura 7) de la norma NMX C 083, esto indica que la carga aplicada fue uniforme.

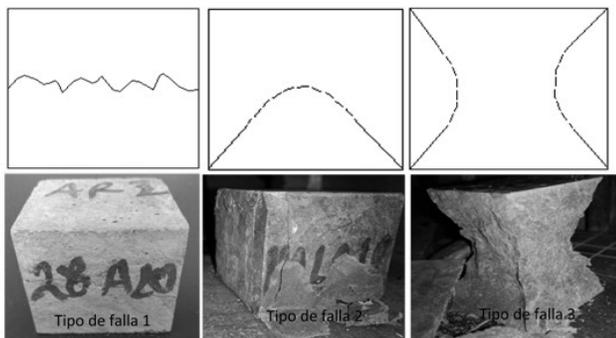


Figura 7. Tipos de falla de las probetas ensayados, falla 1, falla 2 y falla 3. Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 8 y 9 se ilustran los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia mecánica a la compresión simple a los 7, 14 y 28 días, de los dos tipos o tonalidades de vidrio (blanco y ámbar) que sustituyen de forma parcial al agregado fino en diferentes porcentajes (10%, 15% y 20%).

Se puede apreciar que las probetas ensayadas superan la resistencia mínima del mortero convencional, y que conforme aumenta el porcentaje de vidrio, la resistencia a compresión simple incrementa.

### CONCLUSIÓN

Basándose en los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas, y observaciones físicas, se puede concluir que el uso de vidrio molido reciclado en la construcción es viable y positivo, ya que se obtuvieron valores de resistencia mecánica prometedores, que ofrecen una solución para reducir diversos desafíos que actualmente enfrenta la industria de la

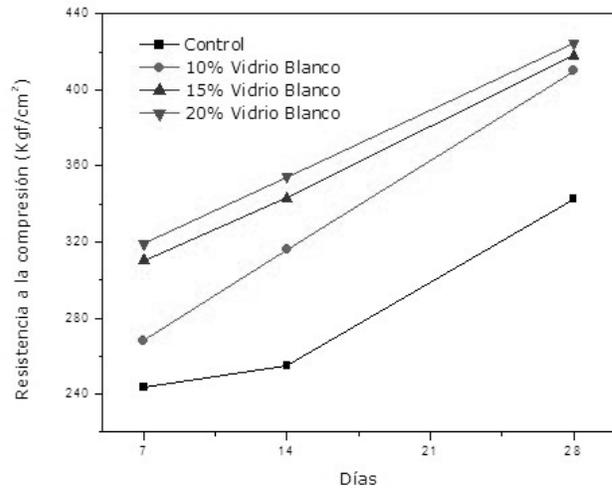


Figura 8. Gráficas de resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días para probetas con vidrio blanco y control.

Fuente: Elaboración propia.

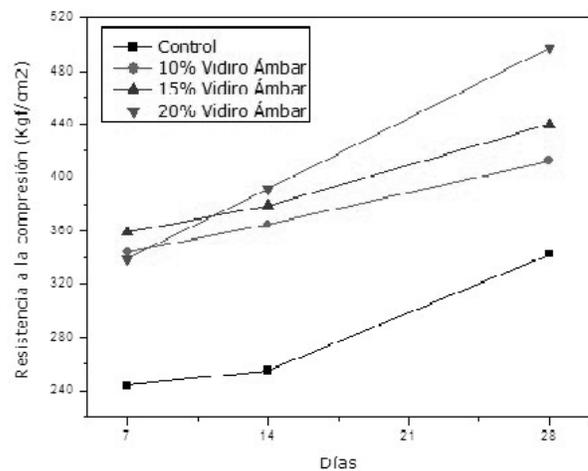


Figura 9. Gráficas de resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días para probetas con vidrio ámbar y control.

Fuente: Elaboración propia.

construcción, reducir contaminantes (generación de CO<sup>2</sup>), reducción en la explotación de bancos de materiales proyectándose hacia una construcción sustentable, mediante el uso de dichos residuos sólidos. Es importante aclarar que es necesario verificar otras variables físicas que influyen en el comportamiento de los morteros al momento de emplearse con fines estructurales, uno de ellos la absorción.

En cuanto a los resultados de las mezclas de mortero cuyos áridos (arena) se sustituyeron en diferentes porcentajes con vidrio molido con el 10%, 15% y 20% en las dos tonalidades, con una relación agua-

cemento de 0.53, se encontró que superan los valores de resistencia a compresión simple al mortero convencional (o espécimen de control) a los 7, 14 y 28 días, para las probetas con vidrio blanco se obtuvieron incrementos de 19.76%, 22.05% y 23.89% y con vidrio ámbar de 20.49%, 28.35% y 45.36% respectivamente, lo cual indica que no solo puede ser utilizado para juntas entre piezas de mampostería, como se propone, sino que su uso puede ampliarse para la fabricación de blocks y revestimiento de muros. Aunque la mezcla es poco trabajable, no se utilizó ningún aditivo para mejorar la fluidez.

Cabe aclarar que, cuando se utiliza el polvo de vidrio ámbar, hay mayor incremento de resistencia a la compresión a los 28 días, sin embargo, el aumento de dicha resistencia no es lineal para los tres porcentajes de sustitución, esto puede deberse a la composición misma del vidrio, pues podría retardar la reacción química entre los 7 y 28 días, para un 15% de reemplazo, mientras que para el 20%, el incremento es sustancial.

Aunque en este artículo se muestra que el reúso de los residuos sólidos utilizados como sustitutos de agregados finos en morteros convencionales es prometedor, debido a los porcentajes de incremento de la resistencia mecánica; se necesitan realizar pruebas de carbonatación, expansión (reacción alkali-silice, ASR), intemperismo (temperatura, humedad y exposición UV) y degradación, para conocer cómo estos factores afectan la durabilidad de la probeta bajo estudio, principalmente para su uso en concretos, tal y como lo discute Mohajerani et al. (2017). Este trabajo se encuentra en proceso y se presentará en futuras contribuciones.

### AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Ariadna Trujillo Estrada, Dra. Marina Vlasova, Dr. Pedro A. Marquez Aguilar, del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), por sus valiosos comentarios al trabajo realizado. Al Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (sede UNACH), en convenio con el Laboratorio de materiales de la Facultad de Arquitectura de la UNACH, contando con el apoyo del Dr. Eddy González García y la M.I. Nguyen Molina Narváez e Ing. José Alfredo Gómez

Rodríguez. Al laboratorio de concreto de la empresa GEORTEC S.A. DE C.V., por permitir el uso de sus instalaciones y equipo. Al M.I. Enrique Mario De Coss Gómez por sus valiosos comentarios. A la Mtra. Edith Ponce Recino del CIDTER-UPChiapas, por su apoyo en la realización de los análisis de DRX.

## REFERENCIAS

- ASTM C 109/C109M-16a (2019) Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or 50mm cube specimens)
- ASTM C 595/C595M-19 (2019) Standard specification for blended hydraulic cements
- ASTM C 270-19a (2019) Standard specification for mortar for unit masonry
- Caijun, S., Yanzhong, W., Riefler, C., & Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and concrete research*, 35, 987-993.
- Cemex concretos, Concreto (S.F). Manual del constructor: <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicaciones-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4>
- Ling, T., Poon C. (2013). Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situation in Hong Kong. *Resources, conservation and recycling*, 70, 25-31.
- Mohajerani, A., Vajna, J., Homan Cheung, T.H., Kurmus, H., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 443-467
- NMX C 077 ONNCCE (1997). Industria de la construcción. Agregados para concreto análisis granulométrico, métodos de prueba.
- NMX C 083 (2002) Industria de la construcción. Determinación de la resistencia a la compresión de probetas, método de ensayo.
- NMX C 111 ONNCCE (2014). Industria de la construcción. Agregados para concreto hidráulico, especificaciones y método de ensayo.
- NMX C 414 ONNCCE (2015). Industria de la construcción cementantes hidráulicos especificaciones y métodos de ensayo.
- NMX C 148 ONNCCE (2002). Industria de la construcción cementos hidráulicos. Gabinetes y cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para curado de probetas de mortero y concreto de cementante hidráulicos.
- Sanjuán, M., & Chichón, S. (2014). Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland. Universidad de Alicante. Editorial Unión de editoriales universitarias españolas (UNE).
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and concrete Research*, 41(7), 642-650.
- Tam, V., & Tam, C. (2006). A review on the viable Technology for construction waste recycling. *Resources, Conservation on Recycling*, 47, 29-221.
- Tescan Orsay Holding A.S., (S.F). PERFORMANCE IN NANOSPACE. SEM in the cement industry. Application Example: [http://library.tescan.com/attachments/article/96/AE\\_160317\\_SEM-in-Cement-Industry-sub.pdf](http://library.tescan.com/attachments/article/96/AE_160317_SEM-in-Cement-Industry-sub.pdf)
- Yahya, J., & Hogland, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1767-1775.