EVALUACIÓN MECÁNICA Y DURABILIDAD DEL CONCRETO CON ADICIÓN DE POLVO DE VIDRIO RECICLADO

**J. A. CABRERA-MADRID, A. LÓPEZ-GONZÁLEZ, F. A. ALONSO FARRERA,
J. E. CASTELLANOS CASTELLANOS**

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

RESUMEN

Se evaluó las propiedades de resistencia mecánica y de durabilidad de concretos con adiciones de polvo de vidrio (PV). Se utilizaron 5, 10, 15 y 20% de PV/peso de cemento como adición para el concreto. No se clasificó el vidrio en cuanto al tipo y color. Se determinó la resistencia a compresión en cilindros de concreto a 3 edades diferentes. Se obtuvieron valores de la porosidad efectiva y sorptividad del concreto, mediante el método de Fagerlund. Se evaluó la permeabilidad mediante la prueba rápida de penetración de iones cloruros. Los resultados señalan que los concretos con PV presentaron menor resistencia a compresión, respecto al concreto sin PV, y al incrementar el PV. Los valores de porosidad y permeabilidad se incrementaron con respecto al concreto sin PV, y al incrementar la cantidad de PV, disminuyendo su desempeño frente a la durabilidad.

Palabras clave: Vidrio reciclado; Concreto; Durabilidad; Porosidad; Permeabilidad

1. INTRODUCCIÓN

La disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) ha representado un problema ambiental a nivel mundial. Dentro de los RSU, se han estimado que los desechos de vidrio representan a más de 44 millones de toneladas por año, y que podría llegar a 77 millones de toneladas para el año 2025 (Ecalante-García, 2015). Según el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales, los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que más se reciclan en México es el vidrio con 23.5%, ocupando el tercer lugar con respecto a otros residuos como es el papel y el PET. Bajo este tenor y de acuerdo con datos del INEGI, en el Estado de Chiapas la producción de RSU alcanza la cantidad de 360 mil 100 Ton/año, de los cuales alrededor de 83000 Ton corresponden a residuos de vidrios.

Siendo un material no biodegradable en la naturaleza, la disposición final del vidrio en vertederos conlleva a un impacto ambiental y de repercusión en términos de costo (Escamirosa-Moltalvo, et.al., 2001).

El proceso de reciclar los desechos de vidrio en la propia industria se ve limitado debido a dificultades relacionadas con la clasificación del tipo y color del vidrio. Sin embargo, existen otros sectores industriales, como en la construcción que se podría ocupar el vidrio para producir materiales cementantes, los cuales podrían contribuir a mejorar ciertas propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, además de otorgar un beneficio ecológico (Islam, et.al., 2017).

Como ya es sabido, el concreto además de ofrecer ventajas en cuanto a versatilidad y costo económico, también presenta el inconveniente de generar un impacto ambiental debido a los materiales pétreos empleados y por la fabricación del cemento. Por tal motivo, se ha buscado otros materiales alternativos para obtener materiales cementantes que sean más amigables con el ambiente. Muchas industrias han implementado el uso de subproductos como materiales cementantes, tales como: humo de sílice, escoria granulada molida de alto horno y ceniza volante, con la finalidad de mejorar la resistencia mecánica y de durabilidad a bajo costo (Ahmad, et.al., 2019; Abdelli, et.al., 2017; Saboo, et.al., 2019).

La composición química del vidrio resulta ser similar a los materiales cementantes, y puede ser un material que represente bajo costo y de fácil disponibilidad. Algunas investigaciones han utilizado el vidrio molido hasta el tamaño de partículas de micras (aproximadamente de 300 μm a menos de 100 μm), para mejorar el proceso de reacción del vidrio y los hidratos del cemento, o bien mejorar sus características puzolánicas (Elaqra and Rustom, 2018). Sin embargo, aunque esto requiere de energía para la molienda, también proporciona un beneficio económico cuando se utiliza como un reemplazo parcial del cemento. Por otro lado, estudios de la durabilidad del concreto con vidrio han reportado que presenta mejor comportamiento contra la permeabilidad de cloruros, sin embargo, a mayor edad del concreto representa un riesgo por la reacción álcali sílice (RAS) (Sousa-Coutinho and Mafalda Matos, 2012).

Para el estudio que se presenta, se utilizó residuos de vidrio rescatado de los RSU, el cual se trituró para su incorporación en la mezcla de concreto y se procedió a evaluar su efecto en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Para alcanzar el tamaño de partícula adecuado para la reacción de hidratación, se utilizó un molino de bolas.

Los reportes de investigaciones han mencionado que cuando se incrementa la cantidad de vidrio molido, y disminuyendo el tamaño de las partículas de vidrio, se puede mejorar la resistencia a compresión en comparación con un concreto de control de dosificación similar (Imbabi, et.al., 2012). En esta investigación se evaluará a través de la propiedad de resistencia mecánica y de permeabilidad del concreto, como parte importante de su durabilidad, el efecto generado del polvo de vidrio como una adición de material cementante.

Mediante esta forma de utilizar el vidrio, se busca brindar una alternativa para disminuir el efecto negativo en el ambiente que produce la acumulación de residuos de vidrio, implementando una re-utilización que represente menor consumo energético y emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Materiales

Para esta investigación se utilizó cemento portland compuesto (CPC 30R RS) Tipo II, con gravedad específica de 3.15. La gravedad específica del polvo de vidrio fue de 3.01 de acuerdo a la norma ASTM C187 (ASTM International, 2011).

La composición química del polvo de vidrio fue comparable con la de otros materiales cementantes, utilizando el vidrio claro y oscuro, sin hacer una clasificación previa de acuerdo a su coloración. El polvo de vidrio se obtuvo de un proceso de trituración del material de desecho, molienda y tamizado por la malla #30.

El agregado fino utilizado para este estudio corresponde a arena de río, y se caracterizó de acuerdo a la norma ASTM C778 (ASTM International, 2013). Las propiedades determinadas del agregado fino son mostradas en la tabla 1 y su granulometría se muestra en la tabla 2.

Tabla 1. Propiedades físicas del agregado fino (arena de río).

Propiedades	Valor
Módulo de finura	2.8
Calificación de la arena en función del módulo de finura	Arena gruesa
Peso específico seco	2.23
Peso específico, saturado superficie seca (sss)	2.38
Absorción (%)	6.73
Densidad específica	2.97
Pasa malla #200, (%)	3.0
Peso volumétrico seco (suelto) kg/m ³	1502
Peso volumétrico seco (compactado) kg/m ³	1646

Tabla 2. Granulometría del agregado fino (arena de río)

Número de malla	(%) Pasa
4	100
8	79.77
16	50.12
30	22.88
50	10.63
100	8.28

Se utilizó agregado grueso triturado de tamaño máximo de 19 mm (3/4 in) y origen calizo. Se determinaron sus propiedades físicas de acuerdo a la normativa ASTM C33 (ASTM International, 2016). Las propiedades del agregado grueso utilizado para el concreto de este estudio se presentan en la tabla 3 y su granulometría en la tabla 4.

El agua empleada para la elaboración de la mezcla es de la red de distribución domiciliaria, para uso doméstico, el cual no contiene sustancias nocivas para el concreto.

Tabla 3. Propiedades físicas de la grava.

Propiedades	Valor
Tamaño máximo, mm	19
Peso específico, seco	2.69
Peso específico, sss	2.70
Densidad	2.87
Absorción, %	2.49
Peso volumétrico seco (suelto), kg/m ³	1300
Peso volumétrico seco (compactado), kg/m ³	1488

Tabla 4. Granulometría del agregado grueso (grava triturada calcárea).

Número de malla	(%) Pasa
3/4"	91.48
1/2"	47.48
3/8"	11.68
4	0.16

2.2 Detalles de la mezcla de concreto y preparación

Se prepararon 4 mezclas con una relación agua/cemento (a/c) de 0.5, variando la adición de polvo de vidrio como material cementante: 5, 10, 15 y 20% por peso de cemento. Las proporciones de los materiales se muestran en la tabla 5. Además, se elaboró una mezcla de control sin adición de polvo de vidrio. Durante el proceso de mezclado, la cantidad de polvo de vidrio se incorporó a la mezcladora de concreto de manera secuencialmente junto a los demás materiales, considerando la duración del tiempo de mezclado de 5 min aproximadamente. Posteriormente, se procedió a determinar la trabajabilidad por medio de la prueba de revenimiento. Enseguida el concreto fue colocado y compactado en los moldes metálicos cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Los especímenes se mantuvieron dentro del molde durante 24 h bajo condiciones de humedad y temperatura previo a desmoldar. Después de retirar el molde metálico, el cilindro de concreto se mantuvo en una tina de curado bajo agua con cal durante el periodo de tiempo específico de 7, 14, 28 y 56 días.

Tabla 5. Dosificación de los materiales para la mezcla de prueba, con una relación a/c de 0.5.

% polvo de vidrio	0	5	10	15	20
Cemento, kg	11.080	11.080	11.080	11.080	11.080
Grava, kg	24.350	24.350	24.350	24.350	24.350
Arena, kg	24.345	24.345	24.345	24.345	24.345
Agua, L	5.540	5.540	5.540	5.540	5.540
Polvo de vidrio, kg	0	0.554	1.108	1.662	2.216

2.3 Prueba de resistencia a compresión

Se utilizó la prueba de resistencia a la compresión uniaxial en los cilindros de concreto de acuerdo con la normativa ASTM C39 (ASTM International, 2016), la cual se determina cuando en el material se presenta una falla completa. Un conjunto de 3 cilindros fueron ensayados en cada tiempo de curado, y de los resultados obtenidos se determinó el valor de la resistencia promedio, los cuales son reportados.

2.4 Porosidad y absorción capilar

Se determinó la porosidad y la absorción capilar en muestras de concreto de 50 mm de diámetro por 50 mm de alto; procediendo de acuerdo a la metodología de Goran Fagerlund (Troconis de Rincón, et.al.,1998), la cual consiste en colocar una superficie de la muestra de concreto preacondicionadas en contacto con una superficie humedad. Posteriormente se procede a medir la masa las muestras de concreto húmedo en lapsos de tiempo determinados. Con los pesos recabados se procede a determinar el coeficiente m que representa la resistencia a la penetración del agua (1). Así también, el coeficiente de absorción capilar k (2), la porosidad efectiva ε (3) y la absorción capilar S (4) (Troconis de Rincon, 1998).

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (1)$$

$$k = \frac{(w_i - w_o)/A}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{k\sqrt{m}}{1000} (\%) \quad (3)$$

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (4)$$

Donde t representa el tiempo en el punto crítico, z la profundidad de penetración de la humedad en el tiempo t ; w_i es el peso de la muestra al inicio de la prueba, w_o peso de la muestra en el punto crítico, y A representa el área de la superficie en contacto con la humedad.

2.5 Permeabilidad de iones cloruro

Se utilizó la prueba rápida de permeabilidad de iones cloruro en concreto de acuerdo a la norma ASTM C1202 (ASTM International, 2012), por medio del equipo Proove'it. El equipo de prueba permite medir fundamentalmente la corriente sobre una muestra de concreto por donde están pasando los iones cloruro. La cantidad de iones cloruro dependerá de las características de la matriz cementante. Para el procedimiento en este estudio, se midió la corriente en intervalos de 5 min durante 6 horas de prueba, obteniendo un resultado en coulombs, el cual permite clasificar el concreto según los rangos establecidos en la norma dicha anteriormente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Revenimiento de la mezcla de concreto

Se evaluó la trabajabilidad del concreto mediante la prueba de revenimiento, la cual se realizó mediante el ensayo del cono de Abrams (ASTM International, 2015), logrando los resultados mostrados en la tabla 6.

Tabla 6. Valores obtenidos de revenimiento según la ASTM C143 (ASTM International, 2015).

Mezcla de concreto	Revenimiento	Unidad
0%	9.0	cm
5%	8.0	cm
10%	8.0	cm
15%	11.0	cm
20%	8.0	cm

3.2 Resistencia a compresión respecto a la edad

En la figura 1 se muestran los resultados de resistencia a compresión promedio de cilindros de concreto con diferentes porcentajes de polvo de vidrio (PV) versus tiempo de curado. En dicha figura se puede observar que, para todas las mezclas de concreto de esta investigación, hay una tendencia a incrementar la resistencia a compresión conforme incrementa el tiempo de curado. Sin embargo, también se observa que la resistencia a compresión promedio en todos los cilindros con PV fueron menor que el concreto de control (0% PV), y para todas las edades de curado. Cabe mencionar que estos resultados obtenidos, están de acuerdo con lo reportado en la literatura para edades de hasta 28 días (Islam, et.al., 2017). Pero comparado con otros reportes de la literatura, el resultado obtenido en esta investigación es contradictorio (Nassar and Soroushian, 2011). Así también, se puede observar que de los concretos con adiciones de PV, aquel que tienen el 20% de PV tiende a aproximarse a la resistencia de control cuando incrementa la edad de curado. Lo cual representaría una cantidad con potencialidad para alcanzar la resistencia similar de un concreto sin adiciones de PV, ya que a la edad de 28 días la diferencia de su resistencia con respecto al concreto de control es del 13.3%.

Figura 1. Resistencia a compresión promedio de cilindros de concreto con diferentes cantidades de adición de polvo de vidrio (PV).

De los resultados de resistencia a compresión obtenidos en este trabajo (Figura 1), se puede decir que la ganancia de resistencia a compresión en concretos con PV se produce con menor velocidad que el concreto de control ($4.04 \text{ kg/cm}^2/\text{día}$ para el concreto con 0% PV; $2.99 \text{ kg/cm}^2/\text{día}$ para el concreto con 10% PV; y $3.85 \text{ kg/cm}^2/\text{día}$ para el concreto con 20% PV).

3.3 Efecto de la cantidad de polvo de vidrio en la resistencia

En la figura 2 se muestra el efecto de la cantidad de PV en la resistencia a compresión de cilindros de concreto para varias edades de curado. En las gráficas de dicha figura se puede observar, para todas las edades de curado, el efecto negativo que tiene la adición de PV en la resistencia a compresión, ya que al adicionar PV disminuye la resistencia a compresión. Indicando que el concreto con 10% de PV fue el que presentó menor resistencia, representando una diferencia significativa de la resistencia a compresión del concreto de control del 23.2% para el concreto con 7 días de curado, 26% para el concreto de 14 días y 24.3% para el concreto con 28 días. Esta cantidad de adición presentó un efecto similar en los trabajos reportados en la literatura (Nassar and Soroushian, 2011). Por otro lado, se puede observar más claramente que el concreto con 20% de PV tienden a alcanzar la resistencia del concreto de control al incrementar los días de curado, tal como se había mencionado en la descripción de la figura 1.

Por lo descrito anteriormente, se puede decir que con el incremento del contenido de PV en la mezcla de concreto, la diferencia entre las resistencias a compresión disminuye. Siendo una razón principal de dicho efecto la reacción puzolánica del PV a edades más avanzadas, el cual conlleva a un efecto de empaquetamiento (o compactación) de las partículas y de su proceso de hidratación (Omranab and Hampua, 2016).

Figura 2. Efecto de la adición de PV en la resistencia a compresión de cilindros de concreto.

3.4 Efecto de la adición de polvo de vidrio en la porosidad efectiva

En la figura 3 se muestra los resultados de la porosidad efectiva de los concreto con diferentes cantidades de PV, y las zonas (delimitadas por las líneas horizontales) de evaluación de la calidad del concreto (Troconis de Rincón, et.al., 1998). En dicha figura, se puede observar que la porosidad efectiva de los concreto con PV de 5% y 10%, se ubican en la zona de moderada calidad (mayores del 10% y menores del 15%), estando en la misma zona la porosidad efectiva del concreto de control (0% de PV). Mientras que la porosidad de los concretos con 15% y 20% de PV, estuvieron cercana y dentro de la zona de inadecuada durabilidad, respectivamente. Por lo tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, se observa un efecto negativo en la porosidad debido al incremento de la cantidad PV, clasificándolo como un concreto permeable y de bajo desempeño para ambientes agresivos.

En la figura 4 se muestra una gráfica comparativa de los resultados obtenidos de sorptividad (velocidad de absorción del concreto) versus porosidad efectiva para cada concreto con diferentes cantidades de PV, pudiendo observar en este trabajo que al incrementar la cantidad de PV, se incrementa la porosidad y la velocidad de absorción con respecto al concreto de control (0%PV). Este efecto observado en este trabajo, puede estar influenciado al tamaño de partículas del PV, la cual tiene influencia en la capacidad puzolánica del material, y tendrá su repercusión en la propiedad de durabilidad (Schwarz, et.al., 2008).

Figura 3. Porosidad efectiva en concretos con diferentes cantidades de PV y con 28 días de edad.

Figura 4. Comparativa de la porosidad efectiva versus sorptividad (velocidad de absorción) del concreto con 28 días de edad.

3.5 Resultados de la permeabilidad de iones cloruro

En la figura 5 se muestra los resultados la prueba rápida de permeabilidad de iones cloruros, evaluados a través de la carga eléctrica medida en Coulomb (C) para los diferentes concretos con adiciones de PV y con 28 días de edad. También se muestran líneas horizontales que delimitan las zonas de alta, moderada y baja permeabilidad. Se puede observar, que para todos los concretos evaluados en este trabajo, presentan permeabilidad alta (cargas mayores a 4000 C) según ASTM C1202 (International 2012). Lo que significa que presentará mayor permeabilidad de sustancias agresivas para el concreto y una disminución de su durabilidad. Cabe mencionar también que el valor obtenido de la carga para el concreto de control con la relación a/c de 0.5, fue similar a lo reportado en la literatura. Sin embargo, para los concretos con PV su carga eléctrica se incrementó con respecto al concreto de control cuando aumenta la cantidad de PV, siguiendo una tendencia contraria de acuerdo a los reportado en la literatura (Kamali and Ghahremaninezhad, 2015; (Islam, et.al., 2017). Este efecto se puede atribuir a que el material de PV empleado para este trabajo, no logró desempeñar completamente la reacción puzolánico durante los 28 días, debiéndose a factores como: la finura del material y por los diferentes tipos de vidrio utilizado, interfiriendo de esta manera en su capacidad de reacción química (Jani and Hogland, 2015; R. Martinez-Lopez and Escalante-García, 2016).

Figura 5. Carga eléctrica de los concretos con PV determinados por la prueba rápida de penetración de iones cloruros.

4. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones del análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, el cual consistió en la evaluación mecánica y de durabilidad del concreto con adición de polvo de vidrio reciclado.

- El incremento de la cantidad de polvo de vidrio como material cementante en la mezcla de concreto, genera un efecto de disminución de la resistencia a compresión a los 28 días, comparado con la resistencia de un concreto sin polvo de vidrio.
- Durante el período de 0 a 28 días, la velocidad de ganancia de resistencia a compresión en los concretos con PV fueron menores que del concreto sin PV. Sin embargo, el concreto con 20% de PV, presentó una velocidad de ganancia de resistencia cercana al concreto de 0% de PV.

- El concreto con adición del 20% de PV, presenta una tendencia a alcanzar la resistencia a compresión de un concreto sin PV posterior a los 28 días de edad.
- El incremento de la cantidad de PV en la mezcla de concreto evaluados a los 28 días de edad, representó un efecto negativo en la porosidad efectiva, lo cual significa que éste concreto tendría bajo desempeño en ambientes agresivos.
- La adición de PV en la mezcla de concreto, generó un efecto de incremento de la permeabilidad de sustancias agresivas como los iones cloruros, disminuyendo de esta manera su durabilidad.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado en el laboratorio de materiales y tecnología del concreto de la Facultad de Ingeniería, Campus I de la Universidad Autónoma de Chiapas, donde se llevaron a cabo las pruebas mecánicas y de durabilidad de los concreto evaluados en este trabajo.

6. REFERENCIAS

- ASTM International. (2011). *ASTM C187 Standard Test Method for Amount of Water Required for Control Consistency of Hydraulic Cement Paste*.
- ASTM International. (2012). *ASTM C1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.
- ASTM International. (2013) *ASTM C778 Standard Specification for Standard Sand*.
- ASTM International. (2015). *ASTM C143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*.
- ASTM International. (2016). *ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- ASTM International. (2016). *ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- Abdelli, K., M. Tahlaiti, R. Belarbi, M. Nadjib. (2017), *Influence of the pozzolanic reactivity of the Blast Furnace Slag (BFS) and metakaolin on mortars*. Energy Procedia. 139: 224-229.
- Ahmad, S., K. O. MMohaisen, S. Kolawole. (2019). *Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures*. Construction and Building Materials. 198: 437-444.
- Elaqra, H., R. Rustom. (2018). *Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste*. Construction and Building Materials. 179: 326-335.
- Escalante-García, J. I. (2015). *Overview of potential of urban waste glass as a cementitious material in alternative chemically activated binders*. Journal of the Chinese Ceramic Society. 43(10): 1441-1448.
- Escamirosa-Moltalvo, L., Penagos, C., Nolasco, G. C., y Franco, C. Q. (2001). *"Manejo de los residuos sólidos domiciliarios en la ciudad de Tuxtla Gutierrez Chiapas"*. Plaza y Valdes, p. 5.
- Imbabi, M. S., C. Carrigan, S. McKenna. (2012), *Trends and developments in green cement and concrete technology*. International Journal of Sustainable Built Environment. 1(2): 194-216.
- Schwarz, N., H. Cam, N. Neithalath. (2008), *Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash*. Cement and Concrete Composites, 30(6): 486-496.
- Islam, G. M. S., M. H. Rahman, and N. Kazi, N. (2017), *Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice*. International Journal of Sustainable Built Environment. 6(1): 37-44.
- Jani, Y., W. Hogland. (2015), *Waste glass in the production of cement and concrete – A review*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2(3): 1767-1775.
- Kamali, M., A. Ghahremaninezhad. (2015). *Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials*. Construction and Building Material. 98: 407-416.

- Martinez-Lopez, R., J. I. Escalante-García. (2016). *Alkali activated composite binders of waste silica soda lime glass and blast furnace slag: Strength as a function of the composition*. Construction and Building Materials. 119: 119-129.
- Nassar, R., P. Soroushian. (2011), *Field investigation of concrete incorporating milled waste glass*. Journal of Solid Waste Technology and Management, 37(4): 307-319.
- Omranab, A., A. Hamoua. (2016). *Performance of glass-powder concrete in field applications*. Construction and Building Materials. 109: 84-95.
- Saboo, N., S. Shivhare, K. Kumar Kori. (2019), *Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties*. Construction and Building Materials. 2019: 322-328.
- Sousa-Coutinho, A., J. Mafalda Matos. (2012), *Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement*. Construction and Building Materials. 36: 205-215.
- Troconis de Rincón, O., A. R. Carrullo, C. Andrade, P. L. Helene. (1998), “*Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*”. CYTED.