

REACCIÓN PUZOLÁNICA DEL VIDRIO ÁMBAR Y SU EFECTO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MORTEROS

POZOLANIC REACTION OF AMBER GLASS AND ITS EFFECT ON COMPRESSION STRENGTH OF MORTARS

Autor: Víctor Guillermo Jiménez Quero
<https://orcid.org/0000-0002-1248-1820>

Institución: Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, México

Correo electrónico: vg.jimenezquero@gmail.com

RESUMEN

Se evaluó la reacción puzolánica del polvo de vidrio color ámbar (PVa) y su efecto en la resistencia a compresión ($f'c$) de morteros hidráulicos base cemento portland (CP). Los morteros se diseñaron empleando 2.75 partes de arena sílica por una de material cementante (MC). El MC se formó con 80 % de CP + 20 % de PVa. Con las mezclas, se elaboraron especímenes cúbicos de 50 mm por lado y se ensayaron por triplicado a 7, 14, 28 y 56 días de edad para conocer su $f'c$. El PVa se caracterizó por medio de análisis de composición química (Comq), difracción de rayos x (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos laser (DRL). Los resultados de CompQ indican que el PVa contiene 63 % de SiO_2 y 28.4 % de Na_2O como óxidos mayores, lo que implica una potencial reacción puzolánica. La $f'c$ del mortero con PVa a 7 y a 14 días de edad fueron inferiores al control en 43.76 % y 7.56 % respectivamente, pero a 28 y 56 días superó al control en 47.38 % y 52.3 % respectivamente, este incremento se atribuye al efecto físico del tamaño de partículas del PVa que densifican la matriz y principalmente al efecto químico de la reacción puzolánica del SiO_2 con el $Ca(OH)_2$ producido durante la hidratación del CP.

Palabras clave: Cemento portland, Desecho, Material de construcción, Óxido de silicio.

ABSTRACT

The pozzolanic reaction of the amber glass powder (PVa) and its effect on the compressive strength ($f'c$) of portland cement-based hydraulic mortars (CP) were evaluated. The mortars were designed using 2.75 parts of silica sand to one of cementitious material (MC). The MC was formed with 80 % CP + 20 % PVa. With the mixtures, cubic specimens of 50 mm per side were made and tested in triplicate at 7, 14, 28 and 56 days of age to know their $f'c$. PVa was characterized by chemical

composition analysis (Comq), x-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and laser ray diffraction (DRL). The CompQ results indicate that PVa contains 63 % SiO₂ and 28.4 % Na₂O as major oxides, implying a potential pozzolanic reaction. The f'c of the mortar with PVa at 7 and 14 days of age were lower than the control in 43.76% and 7.56 % respectively, but at 28 and 56 days it exceeded the control in 47.38 % and 52.3 % respectively, this increase is attributed to the effect physical size of the PVa particles that densify the matrix and mainly the chemical effect of the pozzolanic reaction of SiO₂ with Ca (OH)₂ produced during the hydration of CP.

Keywords: Building material, Portland cement, Silicon oxide, Waste.

INTRUDUCCIÓN

La reactividad puzolánica “se asocia a la estructura física de las partículas y al potencial para reaccionar y formar compuestos cementicos, donde destacan dos parámetros, la cantidad máxima de cal que una puzolana puede combinar y la velocidad con que tal combinación se produce” (Kirk, S. y Zuleta, R. 2000, p.110), es decir, “dependerá de las fases activas que reaccionen con el Ca(OH)₂ liberado durante la hidratación del cemento produciendo mayor contenido de C-S-H, que son fases estables, hidráulicas e insolubles”. (Rosell-Lam, M. *et al*, 2011, p. 644).

Una puzolana es un material silíceo o aluminosilíceo que por sí mismo posee poco o ningún valor cementante pero que, en forma finamente molida y en presencia del agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar compuestos que poseen propiedades cementantes (ASTM C 618, 2019).

Las puzolanas representan una alternativa muy importante en la industria de la construcción ya que pueden sustituir parcialmente al cemento y contribuir a satisfacer su creciente demanda mundial. El cemento portland (CP) es el material cementante de mayor demanda en el mundo para la elaboración de concreto hidráulico (Aitcin, P.C.,2000). De acuerdo con la Cámara Nacional de Cemento (CANACEM) en México, tan sólo en el 2018, se produjeron 39 millones de toneladas de cemento gris y 866 mil toneladas de cemento blanco (CANACEM, 2020).

Desafortunadamente, la producción de CP implica la explotación de recursos naturales no renovables, altos requerimientos energéticos y elevadas emisiones de CO₂ al ambiente; por lo que la industria del cemento consume más del 2 % de la energía mundial y contribuye con aproximadamente 5-7 % de las emisiones

antropogénicas de CO₂, la principal causa del calentamiento global (Worrell, E. *et al.*, 2001).

Existen estudios que reportan que por cada tonelada de cemento portland que se produce, se libera aproximadamente una tonelada de CO₂ a la atmósfera lo que trae consigo grandes problemas climáticos (Anand, S., *et al.*, 2006). Lo anterior hace evidente la búsqueda de materiales que puedan sustituir parcial o totalmente al CP y contribuir en la reducción de estos problemas. El uso de materiales de desecho con propiedades puzolánicas (tales como cenizas volantes, humo de sílice, cenizas de bagazo de caña, de cáscara de arroz y polvos de vidrio) como sustitutos parciales de cemento ha dado resultados prometedores; sin embargo, se requiere continuar con su estudio y caracterización para comprobar su viabilidad de uso. (Frías, M., *et al.*, 2017)

La sustitución de cemento por residuos de vidrio es una alternativa que actualmente se evalúa en varios países, debido a sus dos principales características: estructura amorfa y grandes cantidades de silicio disponible; finamente molido, el vidrio residual es en teoría puzolánico y podría usarse en numerosas aplicaciones relacionados a la elaboración de materiales basados en cemento. (Jani, Y., *et al.* 2014)

Por lo anterior, el presente trabajo se desarrolló con el objetivo de evaluar la reacción puzolánica de polvo de vidrio color ámbar (PVa) y su efecto en la resistencia a compresión (f_c) de morteros hidráulicos base cemento portland (CP) para determinar finalmente, su posible uso como material sustituto de cemento portland.

MATERIALES Y MÉTODOS

El polvo de vidrio (PVa) se obtuvo de la trituración, pulverización y molienda de botellas de desecho color ámbar. Las botellas se lavaron con agua y jabón para eliminar residuos y se dejaron secar a temperatura ambiente por 24 horas. Posteriormente se trituraron, empleando una trituradora de mandíbula, durante tres ciclos de 1 minuto cada uno para obtener partículas de tamaño aproximado de 1 cm, posteriormente las partículas fueron pulverizadas empleando un equipo pulverizador Bico UA® en dos ciclos de 1 minuto y se obtuvieron partículas inferiores a 5 mm, finalmente, las partículas se molieron en un molino de bolas durante 4 horas para obtener polvos con un tamaño promedio de partícula (D_{50}) 5.07 μ m.

El cemento portland (CP) utilizado fue un cemento comercial CPC 30R de la marca Holcim Apasco®, el cual tiene una densidad relativa de 2.86 y cumple con la norma NMX-C-414-ONNCCE.

Como agregado fino, se utilizó arena sílica estándar tipo Ottawa que cumple los requerimientos de la norma ASTM 778-02. El agua de mezclado fue agua bidestilada. En la Figura 1 se muestran los materiales empleados para la elaboración de los morteros.



Figura 1. Materiales empleados para la elaboración de los morteros
De izquierda a derecha a) Polvo de vidrio, b) Cemento y c) Arena sílica

Caracterización del PVa

La composición química se obtuvo utilizando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X Epsilon 3XL[®]. Las pérdidas por ignición se determinaron de acuerdo con la norma ASTM D7348-13. Las fases minerales se identificaron por medio de la técnica de difracción de rayos x (DRX) y se empleó un difractómetro marca Empyrean[®] con un ánodo de Cu. El difractómetro se utilizó a un voltaje de 45 kV y una corriente de 40 mA. La prueba de se llevó a cabo en un rango de 5 a 70° (2-Theta) a una velocidad de exploración de 0.5 s e incrementos de 0.026°. Finalmente, las fases minerales obtenidas por DRX se identificaron utilizando el software X'Pert HighScore Plus[®].

Para determinar la distribución de tamaños de partículas distribuidas por volumen, se empleó la técnica de difracción de rayos láser por vía húmeda, se empleó un analizador de partículas tri-láser marca MICROTRAC[®] modelo S3500 el cual mide ángulos de dispersión entre 0 y 172 grados. El rango de medición fue de 0.243-1408 micrones.

Elaboración de las mezclas

Se diseñaron y elaboraron dos mezclas de mortero: la mezcla control (MC) con 100 % CP y la mezcla a evaluar (MPva) con 80 % de CP + 20 % de PVa. La relación agua/materiales (a/mc) la determinó la prueba de fluidez y la relación arena/materiales cementantes fueron constante 1:2.75.

Para la elaboración de las mezclas se empleó una mezcladora marca Hamilton Beach[®] y el procedimiento fue el siguiente: Se colocó en el tazón de la mezcladora el agua bidestilada, posteriormente se adicionaron el CP y el PV; se inició el mezclado con una velocidad de 140 ± 5 r / min. durante 30 segundos, posteriormente, se agregó

la arena sílica tipo Ottawa lentamente en un periodo de tiempo de 30 segundos. Se detuvo la mezcladora y se cambió a una velocidad de 285 ± 10 r / min. y se mezcló durante 30 segundos más. Se detuvo la mezcladora y se dejó reposar durante 1 minuto y medio. Durante los primeros 15 segundos de este intervalo, se despegó el mortero que pudo quedarse pegado en las paredes del tazón. El resto de tiempo de este intervalo, el tazón se cubrió con su tapa. Finalmente, se reinició el mezclado durante 1 minuto más a velocidad de 285 ± 10 r / min. El proceso de mezclado se presenta en la Figura 2.



Figura 2. Elaboración de mezclas de mortero

a) Colocación del CP en el tazón, b) adición de PV, c) adición de la arena sílica, d) mezclado

Pruebas de fluidez

Se evaluó la fluidez de los morteros empleando una mesa de fluidez de acuerdo con la norma ASTM C230/C230 M y se siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM 1437-01 (Figura 3). La fluidez es el resultado del incremento en el porcentaje de la base de la masa de mortero, expresada como un porcentaje de diámetro base original. La ecuación usada fue la siguiente:

$$F = \frac{(D_1 - D_0)}{D_0} * 100$$

en donde: F es el flujo, D_0 es el diámetro del molde, D_1 es el promedio del diámetro obtenido.

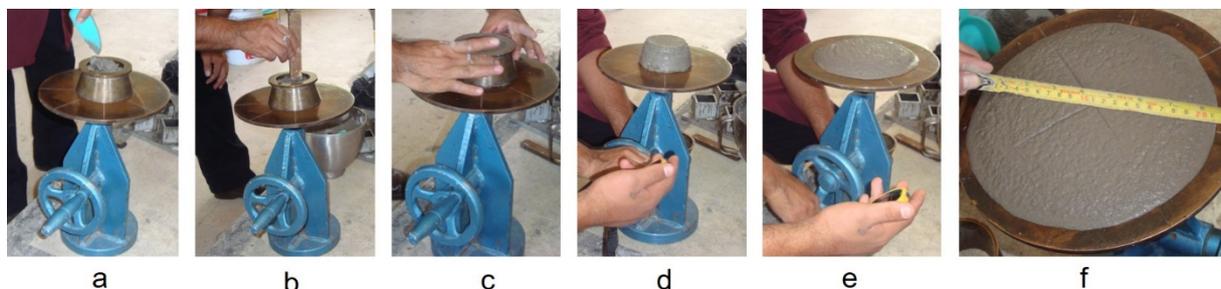


Figura 3. Prueba de fluidez en mezclas de mortero.

a) Colocación del mortero en el cono, b) compactación, c) retiro de molde, d) aplicación de golpes, e) toma de tiempo, d) medición de diámetros

Elaboración de probetas

Se elaboraron dos grupos de cubos de mortero de 50 mm por lado (nueve cubos por grupo). Un grupo se elaboró con la mezcla de mortero control y el otro con la mezcla de mortero a evaluar (80 % de CP + 20 % de PV). Los moldes se llenaron en dos capas, cada una de las capas se vibró durante 5 segundos y para esta etapa se empleó una mesa vibradora, al término de la segunda etapa de vibrado, los moldes se enrasaron y se dejaron a temperatura ambiente durante 24 horas; después de este tiempo, los cubos se desmoldaron y se sumergieron en una solución de hidróxido de calcio al 2 % (curado) y permanecieron en ella hasta las fechas de ensayo, Figura 4.

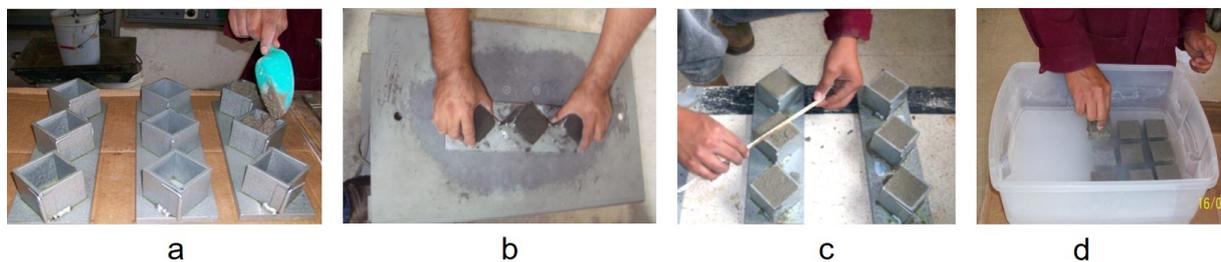


Figura 4. Elaboración de cubos de mortero.

a) Colocación del mortero en los moldes, b) vibración, c) enrase, d) curado

Pruebas de resistencia a compresión

Una vez elaborados los cubos, éstos se ensayaron a compresión a 7, 14 y a 28 días. Para los ensayos se utilizó una prensa hidráulica marca ELVEC® E 659-5 equipada con válvula regulable de aplicación de carga y capacidad de 120 toneladas, Figura 5; los ensayos se realizaron por triplicado.

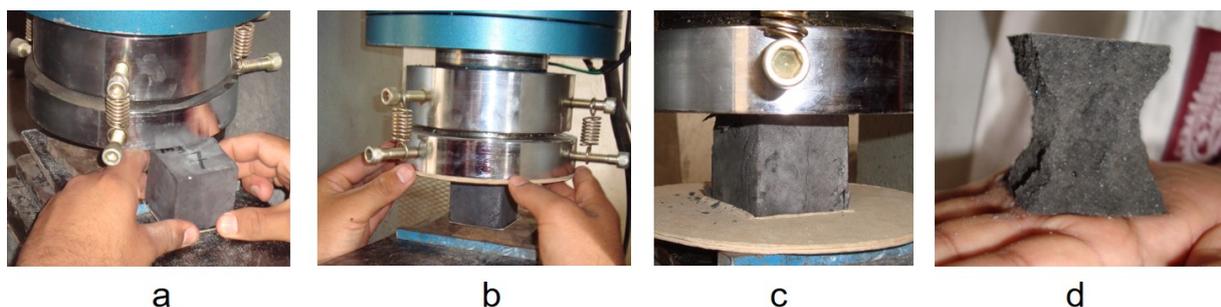


Figura 5. Prueba de resistencia a compresión.

a) Colocación de cubo de mortero en la prensa, b) centrado, c) aplicación de carga, d) cubo ensayado

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la caracterización del PVa

Los resultados de la composición química se presentan en la Tabla 1. Se observa que la suma de los óxidos principales $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}$ es de 64.06 contiene 3.64 % de CaO y 3.47 % de PI. De acuerdo con la Norma ASTM C 618 este material posee

propiedades puzolánicas y propiedades cementantes, lo que indica altas posibilidades de emplearse como sustituto de cemento portland.

Tabla 1.- Composición química del PVa

Elemento/Compuesto	PVa
Óxido de Silicio (SiO ₂)	62.98
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	0.69
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	0.38
Óxido de calcio (CaO)	3.64
Óxido de Magnesio (MgO)	0.02
Óxido de Sodio (Na ₂ O)	28.37
Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.30
Óxido de Titanio (TiO ₂)	0.03
Óxido de Azufre (SO ₃)	0.02
Pérdidas por Ignición (PI)	3.47
Suma: SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃	64.06

El patrón de difracción de rayos x del PVa se presenta en la Figura 6. Se identificaron cuarzo y carbonato sódico como principales fases cristalinas, se observó un halo amorfo entre los ángulos 2θ de 13 y 40° característico del silicoaluminato vítreo, lo que indica que es un material altamente reactivo. (Lee, H., *et al.*, 2018)

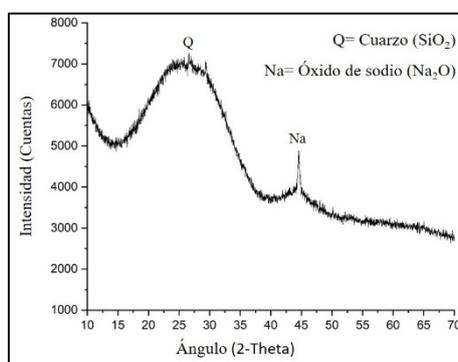


Figura 6. Patrón de DRX del PVa

El tamaño promedio de partícula fue de 5.07µm. El tamaño de partícula es un factor importante en los materiales puzolánicos empleados como sustitutos parciales de CP. (Cordeiro, G. C., *et al.*, 2010)

Resultados de las pruebas de fluidez

Los resultados de las pruebas de fluidez de la mezcla control y de la mezcla de CP+PVa fueron 111 % y 114 % respectivamente; éstos valores se encuentran dentro del rango permitido por la norma ASTM C109/C 109M, por lo que la incorporación del PVa a la mezcla no afecta esta propiedad en estado fresco.

Resultados de las pruebas de resistencia a compresión

Los resultados de las pruebas de resistencia a compresión (f'_c) a diferentes edades se presentan en la Figura 9. Se observa que los valores de f'_c de los morteros incrementa gradualmente con la edad. (Hemalatha, T., *et.al*, 2017) En las dos primeras edades de prueba las f'_c del mortero con polvo de vidrio fueron menores (43.73 y 7.57 % respectivamente) que el control, sin embargo, a 28 días la superó en 43.35%, este incremento se atribuye a la reacción puzolánica del SiO_2 del PVa con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que se produce durante la hidratación del CP. El alto contenido de sílice amorfa del PVa promovió que la reactividad puzolánica fuera más efectiva para formar nuevos productos de C-S-H generando beneficios en las f'_c a esta edad de prueba. Además, efecto físico del tamaño de las partículas del PVa probablemente contribuyen a densificar el matriz cementante del mortero mejorando su resistencia. (Bouchikhi, A., *et.al.*, 2019).

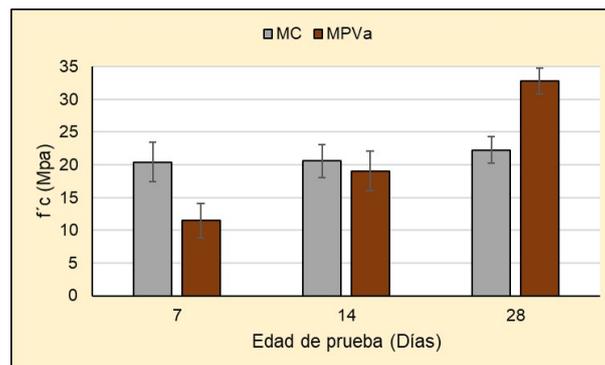


Figura 7. Resultados de las pruebas de resistencia a compresión (f'_c)

Con los beneficios que tiene este estudio, es posible reutilizar un residuo sólido pulverizado como sustituto parcial del cemento portland con ventajas técnicas porque mejora las propiedades de resistencia de los morteros hidráulicos que lo contienen, y ventajas ambientales porque tiene una disposición final adecuada y además, se reduce el uso del cemento portland.

CONCLUSIONES

El polvo de vidrio ámbar, evaluado en este trabajo, puede usarse como material sustituto de cemento portland. La sustitución parcial de 20 % CP por 20 % de PVa mejoró la resistencia a compresión de morteros en 47.35 %, a 28 días de edad, por los efectos físicos asociados con la presencia de partículas muy finas y efectos químicos asociados con reacciones puzolánicas de su alto contenido de SiO_2 . La reacción puzolánica del PVa se dio a la edad de 28 días de prueba, edad de prueba temprana, lo que es benéfico en morteros elaborados con algún material puzolánico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITCIN, P. C. (2000). Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, No. 9, pp. 1349-1359.
- ANAND, S., VRAT P. y DAHIYA, R.P., (2006). Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO2 emissions from the cement industry. *Journal of Environmental Management*. Vol. 79, No. 4, pp.383-398.
- ASTM C 618. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken. PA.
- BOUCHIKHI, A. ... [et al.] (2019). Study of the impact of waste glasses types on pozzolanic activity of cementitious matrix. *Construction and Building Materials*. No. 197, pp. 626-640.
- CANACEM (2020). Producción de cemento en México. Disponible en <https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion/>. Visitado el 29 de abril del 2020.
- CORDEIRO, G. C., TOLEDO, F. R. D. y FAIRBAIRN, E. M. R. (2010). Ultrafine sugar cane bagasse ash: high potential pozzolanic material for topical countries. *Ibracon Structures and Materials Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 50-67.
- FRÍAS, M. ...[et al.] (2017). Advances on the development of ternary cements elaborated with biomass ashes coming from different activation process. *Construction and Building Materials*. No. 136, pp. 73-80.
- HEMALATHA, T. y RAMASWAMY, A. (2017). A review on fly ash characteristics— Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of cleaner production*, No. 147, pp. 546-559.
- JANI, Y. y HOGGLAND, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete-A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, No. 2, pp. 1767-1775.
- KIRK, S., y ZULETA, R. (2000). A study of the volcanic ash originating from Mount Pinatubo. Philippines. Public Works.
- LEE, H. ...[et al.] (2018). Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. *Journal of Cleaner Production*, No. 170, pp. 683-693.
- ROSELL-LAM, M., VILLAR-COCIÑA, E. y FRÍAS, M. (2011). Study on the pozzolanic properties of a natural Cuban zeolitic rock by conductometric method: Kinetic parameters. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 644-650.

WORRELL, E. ...[et al.] (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*. No. 26, pp. 303-329.