

ARTÍCULO ORIGINAL

Evaluación del índice de actividad puzolánica de polvo de vidrio en morteros

Evaluation of the pozzolanic activity index of glass powder in mortars

Luis López Poveda¹

¹llopez@iccsa.com.ni

 <https://orcid.org/0009-0003-5715-932X>

ICCSA

Eddisson Francisco Hernández²

eddisson.hernandez@uam.edu.ni

 <https://orcid.org/0000-0002-9602-5805>

Universidad Americana

Datos del artículo:

Recibido: 22/09/2025

Aceptado: 19/10/2025

Palabras clave:

Vidrio activado,
reacción puzolánica,
durabilidad, silicato
de calcio hidratado,
portlandita

Resumen

El vidrio reciclado y triturado puede ser utilizado como material puzolánico en mezclas de concreto, para desarrollar un buen desempeño mecánico y durabilidad y a la vez reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. En este estudio se evaluó el efecto del vidrio triturado como material puzolánico y del hidróxido de sodio (NaOH), como activador alcalino de la reacción en mezclas de mortero. Se analizó el comportamiento de la consistencia y resistencia de mezclas de mortero. En la fase de evaluación del mortero fresco, se observó que al añadir 5% de vidrio triturado se incrementó el flujo respecto a la muestra de control. Sin embargo, al aumentar el contenido a 10% y 15%, la fluidez disminuyó, especialmente cuando se incorporó NaOH. Este comportamiento difiere de lo que han documentado estudios anteriores, donde el vidrio triturado mejora la trabajabilidad del mortero o concreto. En cuanto a la resistencia a la compresión a los 14 días, los resultados mostraron que, en todos los casos, el índice de actividad puzolánica (IAP) fue igual o superior al 75% respecto a la muestra de control, cumpliendo con la norma ASTM C1866/C1866M-20. Las mezclas que no fueron activadas con NaOH presentaron una disminución del IAP al aumentar el contenido de vidrio, lo cual refleja la importancia del activador en la reacción puzolánica a edades tempranas. Las mezclas con 4% de NaOH obtuvieron las mayores resistencias y mostraron menor sensibilidad al contenido de vidrio.



Abstract

Keywords:

Activated glass,
pozzolanic reaction,
durability, hydrated
calcium silicate,
portlandite.

Crushed recycled glass can be used as a pozzolanic material in concrete mixtures to achieve good mechanical performance and durability while simultaneously reducing carbon dioxide emissions into the atmosphere. This study evaluated the effect of crushed glass as a pozzolanic material and sodium hydroxide (NaOH) as an alkaline activator in mortar mixtures. The consistency and compressive strength behavior of the mortar mixes was analyzed. In the fresh mortar evaluation phase, it was observed that adding 5% crushed glass increased the flow compared to the control sample. However, when the content was increased to 10% and 15%, workability decreased, especially when NaOH was incorporated. This behavior differs from previous studies, which reported that crushed glass improves the workability of mortar or concrete. Regarding compressive strength at 14 days, the results showed that, in all cases, the pozzolanic activity index (PAI) was equal to or greater than 75% compared to the control sample, meeting the requirements of ASTM C1866/C1866M-20. The mixtures that were not activated with NaOH showed a decrease in PAI as the glass content increased, highlighting the importance of the activator in the pozzolanic reaction at early ages. The mixtures with 4 % NaOH achieved the highest compressive strengths and exhibited lower sensitivity to the glass content.

1. Introducción

Debido al desarrollo del mundo moderno, el concreto hidráulico se ha convertido en uno de los materiales de construcción más utilizados producto de su conocida durabilidad, resistencia y versatilidad (International Finance Corporation, 2022). Sin embargo, la creciente demanda de este producto, junto con la necesidad de reducir la huella de carbono generada por su elaboración, ha impulsado investigaciones para evaluar la viabilidad de incorporar en el concreto, materiales puzolánicos alternativos de origen natural o desechos industriales (Aygün, 2021).

El empleo de materiales puzolánicos en la producción de concreto tiene raíces que se remontan a la antigüedad. La historia registra el uso de cenizas volcánicas en la Antigua Roma, en el siglo I a. C, para mejorar las propiedades del concreto y prolongar su durabilidad (Mogetta, 2021). La palabra “puzolánico” proviene de la región italiana de Pozzuoli, donde se descubrieron los

beneficios de las cenizas volcánicas cuando se mezclaban con cal hidratada, formando un material resistente y duradero (Siddall, 2000).

En el siglo XX, con el avance de la ciencia de materiales de construcción, se empezó a explorar el potencial de otros residuos industriales y naturales como aditivos puzolánicos. La incorporación de cenizas volantes, escorias de alto horno y restos de minerales con alto contenido de sílice ha extendido las aplicaciones de materiales puzolánicos en la industria del concreto hidráulico, reduciendo los costos de construcción, los desechos sólidos y las emisiones de efecto invernadero (Ahmed et al., 2019).

Entre los materiales que se han estudiado como materia prima alternativa para el concreto se encuentra el vidrio triturado, debido a su abundancia y bajo costo. Diversos estudios han demostrado que el vidrio pulverizado al incluirse en mezclas de concreto hidráulico puede comportarse como puzolana y mantener o mejorar las

propiedades de los concretos en los que se incluye (Du y Tan, 2014).

El tamaño al que se logran reducir las partículas de vidrio durante la trituración es el factor que define si este tendrá propiedades puzolánicas o no (Islam et al., 2017). En los casos en que el vidrio no se logra pulverizar a tamaños suficientemente pequeños, este se comportará como un agregado fino, pero puede presentar una perjudicial reacción álcali-sílice (Lemesre et al., 2024).

Por lo antes expuesto, es importante comprender y optimizar la reacción puzolánica del vidrio triturado, así como evaluar sus efectos a largo plazo en las propiedades del concreto. La aplicación segura y eficiente de esta práctica genera un área de investigación válida y relevante para empresas privadas e instituciones públicas, dado que contribuye a la reducción de residuos sólidos no biodegradables y a la disminución en el consumo de recursos naturales, en línea con principios de economía circular y sostenibilidad ambiental (Du y Tan, 2013).

En este estudio se midió el índice de actividad puzolánica (IAP) de muestras de mortero en las que se sustituyó parte del cemento por distintos contenidos de vidrio triturado (p/p). Además, se incluyó en el experimento la adición de un catalizador en varias concentraciones, para favorecer un ambiente alcalino y activar la disolución y reacción de la sílice contenida por el vidrio, con el propósito de cuantificar el efecto de estos dos factores en la resistencia a compresión e IAP del mortero.

2. Aspectos Teóricos

Una reacción puzolánica es una reacción química ácido-base que se produce en los cementos Portland que contienen puzolana cuando entran en contacto con el agua. El agua activa el proceso de hidratación del cemento que produce varios compuestos, entre los que se encuentra la portlandita o hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). A continuación, este compuesto básico reacciona con el ácido silícico (H_4SiO_4) o la sílice amorfa (SiO_2) que se encuentra presente en materiales puzolánicos y el vidrio para formar silicato de calcio hidratado (CSH).

El CSH es el principal constituyente de la matriz de concreto hidráulico y le proporciona densidad, resistencia mecánica y durabilidad (Omran et al., 2018).

Para que se produzca la reacción puzolánica en el concreto, se necesita que la portlandita y la sílice se encuentren en un ambiente altamente alcalino. Este ambiente alcalino es generado, en principio, por la solución de poro de la pasta de cemento que contiene iones hidroxilos -OH-. En los casos en que se añada vidrio pulverizado al concreto, el ambiente alcalino deseado puede ser potenciado al agregar un agente como el hidróxido de sodio (NaOH) que, al disolverse

en agua, libere iones hidroxilos que disuelvan la sílice amorfa en el vidrio y activen la reacción puzolánica con la portlandita (Du y Tan, 2014).

Se ha demostrado que uno de los factores que gobierna la efectividad de la reacción puzolánica es el tamaño al que se logran tritular las partículas de vidrio. Para polvo de vidrio que pasa el tamiz de 38 μm se ha encontrado que la resistencia a compresión del concreto producido comparado con muestras de control, no disminuye después de 90 días de curado (Shao et al., 2000). A partir de la experiencia de diversos experimentos, la producción de vidrio

Figura 1.

Resistencia a compresión de concreto para distintas edades y contenidos de polvo de vidrio, Tomado de (Ibrahim, 2023, p. 5).

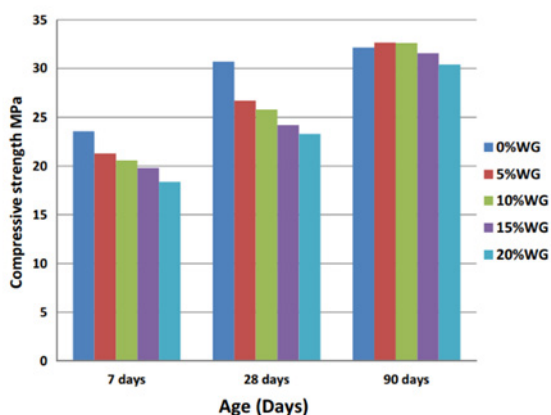
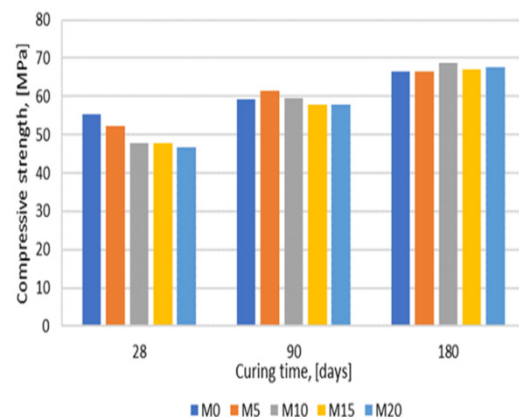


Figura 2.

Resistencia a compresión de mortero para distintas edades y contenidos de polvo de vidrio. Tomado de (Dobiszewska et al., 2023, p. 6).



triturado se ha efectuado mediante molinos de bolas en los que se muele durante periodos de 6, 8 o 12 horas (Lemesre et al., 2024; Hong et al., 2024).

La ganancia de resistencias de muestras de mortero preparadas con vidrio triturado depende del contenido de vidrio empleado y de la edad de las muestras. En general, se sabe que a edades menores a 28 días, la resistencia a compresión de especímenes que contienen puzolanas tiende a ser menor que la de muestras de control con un contenido equivalente de material cementante. Se ha explicado que lo anterior se debe a que en edades tempranas el material puzolánico no desarrolla toda su reacción y se comporta como material fino inerte, por tanto, mientras mayor sea el contenido de vidrio triturado adicionado, más grande será la reducción de resistencia a compresión. Sin embargo, en la medida en que el tiempo avanza y el silicio del vidrio reacciona para formar CSH, el comportamiento se invierte a edades de 90 y 180 días (Dobiszewska et al., 2023).

En las investigaciones en las que se evalúa el polvo de vidrio como reemplazo parcial

del cemento, usualmente se estudian contenidos de 0 a 20 %. Se ha observado que a medida que el contenido de polvo de vidrio aumenta, la resistencia a compresión alcanza un valor máximo alrededor del 5 a 10 % de polvo de vidrio para especímenes que tengan edades muy avanzadas (Dobiszewska et al., 2023; Ibrahim, 2023). El valor máximo de resistencia a compresión que se alcanza tiende a ser ligeramente superior en comparación con los demás contenidos estudiados, de modo que el reemplazo de un 5 % de cemento por vidrio en comparación con un 20 %, exhibe una pérdida de resistencia a compresión poco significativa en comparación con el volumen de cemento que se reemplaza.

En los siguientes gráficos se ilustran los resultados que se han descrito antes en relación con la ganancia de resistencia a compresión para distintas edades y contenidos de polvo de vidrio. A pesar de que, en un caso la muestra ensayada fue concreto y en el otro mortero, el comportamiento resulta similar.

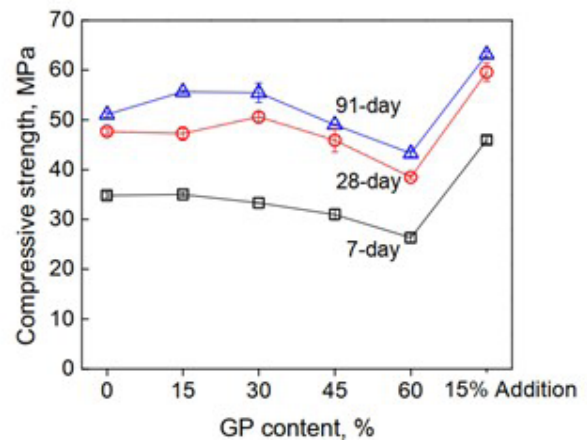
Existen experimentos en los que se ha empleado muestras de concreto para evaluar el efecto de altos contenidos de polvo de vidrio en parámetros como la resistencia a compresión o el consumo de portlandita.

Estos trabajos, en general, muestran comportamientos similares a los expuestos para contenidos de polvo de vidrio más bajos. En estos casos el contenido óptimo de polvo de vidrio ha resultado alrededor del 15 a 30 % a edades de 28 y 91 días y se ha encontrado que la resistencia a compresión no disminuye en relación con la muestra de control. La sustitución de cemento por polvo de vidrio en contenidos superiores a 30 % si muestra reducciones significativas en la resistencia a compresión, que se ha explicado por el hecho de que en proporción el contenido disponible de portlandita (aportada por la hidratación del cemento) es bajo para reaccionar con la sílice del vidrio (Du y Tan, 2014). En la figura 3 se ilustra el comportamiento explicado.

La literatura publicada en relación con la activación de polvo de vidrio en medios alcalinos resalta la importancia de controlar

Figura 3.

Resistencia a compresión de concreto para distintas edades y contenidos de polvo de vidrio. Tomado de (Du y Tan, 2014)



la cantidad de catalizador como uno de los factores que afectan el resultado de resistencia a compresión. En el caso del hidróxido de sodio se ha encontrado que el contenido más eficaz tiende a ubicarse en una magnitud óptima, de modo que valores muy bajos o altos perjudican la resistencia a la compresión. Se ha demostrado que concentraciones de hidróxido de sodio de 1 y 10 mol/L resultaban en resistencias a la compresión bajas, mientras que concentraciones de 3 a 5 mol/L producían la resistencia a la compresión más alta

(Cyr et al., 2012). En otros trabajos se ha establecido que la concentración óptima de hidróxido de sodio es de 3 mol/L y que es equivalente a 3.5 % por masa de vidrio triturado (Lemesre et al., 2024).

De acuerdo con ASTM C1866/C1866M, la puzolana de vidrio triturado debe cumplir con ciertos requerimientos químicos y físicos para utilizarse en concreto. Una de las medidas recomendadas en ASTM C1866/C1866M para mitigar la reacción álcali-sílice en puzolanas provenientes de vidrio triturado, es restringir el contenido de lavado de partículas retenidas en el tamiz No. 325 (45 μm) a 5.0 % (Kaminsky et al., 2020). Dentro de los requerimientos físicos a cumplir se encuentra el alcanzar un IAP mayor al 75 % a 7 días y superior a 85 % a 28 días de curado para el vidrio proveniente de envases de botellas (ASTM International, 2020). Donde el IAP (índice de actividad puzolánica) se define como el cociente entre la resistencia a compresión de muestras dosificadas parcialmente con puzolanas y una muestra de control dosificada con cemento.

3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo experimental con un enfoque cuantitativo, con recolección de datos de fuentes primarias a partir de experimentos en laboratorio bajo condiciones de trabajo controladas para poder identificar las relaciones causa-efecto existentes entre las variables seleccionadas.

3.2 Diseño de experimento

El análisis desarrollado en esta investigación se llevó a cabo sobre la base de una metodología estructurada, en la cual se identificaron las variables pertinentes cuya influencia, interacción y variación ejercía un efecto de causalidad sobre la variable investigada. La selección de estas variables explicativas y sus magnitudes físicas se efectuó a partir de la revisión bibliográfica expuesta en la sección “Aspectos Teóricos”. En general, las variables seleccionadas consistieron en las proporciones en que se dosifican algunos de los materiales.

Las proporciones de algunos materiales se fijaron como valores constantes en el

estudio, para evitar que influyan en los resultados, como el contenido de material cementante (cemento GU más polvo de vidrio), la relación agua cemento ($Ra/c = 0.55$), el contenido de aditivo reductor de agua de alto rango (8.5 ml de aditivo/kg de material cementante) y el contenido de agregado fino y su cociente con el material cementante (2.75), de acuerdo con ASTM C 109 y ASTM C 311 (ASTM International, 2024; ASTM International, 2024).

Las variables independientes o explicativas del experimento se definieron como las proporciones en que se dosificó el polvo de vidrio y el hidróxido de sodio para fabricar los baches de mortero, así como la edad a la que se fallaron los especímenes. El polvo de vidrio se agregó realizando una sustitución parcial del cemento, en cuatro proporciones de 0, 5, 10 y 15 % de la masa del cemento, con el objeto de estudiar el efecto de esta sustitución en la resistencia a la compresión.

El NaOH se aplicó en tres proporciones de 0, 2 y 4 % de la masa del polvo de vidrio, a fin de estudiar su efecto en la activación de la reacción puzolánica.

Los ensayos a compresión se efectuaron a edades de 7, 14, 28 y 180 días para identificar la ganancia de resistencia a la compresión en el tiempo. Las variables dependientes o resultados se midieron mediante ensayos de laboratorio como el flujo del mortero fresco para cada bache reproducido y la resistencia a la compresión de cubos de mortero.

El flujo de mortero se midió una sola vez para cada bache mientras que la resistencia a la compresión se midió por triplicado en cada condición evaluada. A partir de los ensayos de resistencia a la compresión se calcula el IAP como parámetro para evaluar la ganancia relativa de resistencia a la compresión de las muestras en relación con la muestra de control. La tabla 1 muestra las formas en que se permutaron las variables y tratamientos para los ensayos de resistencia a la compresión.

3.3 Materiales y especímenes de ensayo

En la elaboración de baches de mortero para este experimento se utilizaron los siguientes materiales:

Tabla 1.

Diseño de experimento para el ensayo de resistencia a la compresión

| Tratamiento | Condiciones | Vidrio triturado | NaOH | Edades | Especímenes | Total |
|-----------------|-------------|------------------|-----------|---------------------|-------------|-------|
| Control | Valores: | 0 % | 0 % | 7, 14, 28, 180 días | | |
| | Cantidad: | 1 | 1 | 4 | 3 | 12 |
| Vidrio activado | Valores: | 5, 10, 15 % | 0, 2, 4 % | 7, 14, 28, 180 días | | |
| | Cantidad: | 3 | 3 | 4 | 3 | 108 |
| Total | | | | | | 120 |

Tabla 2.

Materiales utilizados en el experimento

| Material | Fuente/ fabricante | Certificación |
|--------------------------------|-----------------------|---------------|
| Agregado fino | Banco Cofradía | - |
| Vidrio de botellas | Cerveza Toña | - |
| Cemento GU | Canal | - |
| Hidróxido de sodio (NaOH) | Fisher Chemical | ACS |
| Reductor de agua de alto rango | Ultraflow IMI | - |

3.3.1 Preparación de materiales

La arena utilizada en el estudio fue material fino triturado del banco de materiales Cofradía, que fue modificada en este estudio para que cumpliera con la columna de

“arena graduada” establecida en la tabla 1 de ASTM C 778 (ASTM International, 2021). En las siguientes tablas se muestran la granulometría y propiedades físicas de la arena graduada.

Tabla 3.

Granulometría de arena para baches de mortero (ASTM C 778)

| Tamiz | | Material que pasa (%) | | |
|-------|-------|-----------------------|------|------|
| No. | mm | Resultado | Mín. | Máx. |
| N.16 | 1.180 | 100 | 100 | 100 |
| N.30 | 0.600 | 98 | 96 | 100 |
| N.40 | 0.425 | 75 | 65 | 75 |
| N.50 | 0.300 | 30 | 20 | 30 |
| N.100 | 0.150 | 4.0 | 0 | 4 |

Tabla 4.

Propiedades físicas de la arena graduada

| Parámetro | Resultado |
|----------------------------|-----------|
| Gravedad específica bruta: | 2.86 |
| Absorción de agua (%): | 1.24 |

Las botellas de vidrio se recolectaron, limpiaron y se trituraron inicialmente con mazos mediante impactos para obtener 2000 g. Posteriormente, el material se afinó más en una Máquina de los Ángeles mediante el empleo de una carga de abrasión e impacto de 12 bolas de (5.0 kg) durante 2000 revoluciones. La siguiente tabla muestra las propiedades físicas resultantes del material obtenido.

Tabla 5.

Propiedades físicas del polvo de vidrio

| Parámetro | Resultado |
|---|-----------|
| Material que pasa el tamiz No. 200 (%): | 100 |
| Gravedad específica bruta: | 2.54 |
| Absorción de agua (%): | 0.27 |

El cemento utilizado en el estudio fue de uso general (GU) de la marca Canal que cumple

con ASTM C 1157 y tiene una gravedad específica bruta de 3.09. Se preparó empleando una relación agua/material cementante de 0.55.

El aditivo reductor de agua de alto rango utilizado es comercializado por IMI como Ultraflow y su formulación está basada en la tecnología del policarboxilato. El aditivo tiene una gravedad específica bruta de 1.1.

El hidróxido de sodio utilizado es comercializado en estado sólido y en forma granular. Estos granos fueron disueltos en el agua de mezclado previo a su adición en la mezcla. Sobre la base de las experiencias expuestas en la sección de “Aspectos Teóricos” se decidió dosificar el hidróxido de sodio para obtener una proporción del 2.0 y 4.0 % por masa seca de vidrio triturado.

3.3.2 Dosificación y preparación de especímenes de ensayo

Los ensayos de resistencia a la compresión de mortero se efectuaron a partir de especímenes fabricados en moldes cúbicos de 50 x 50 x 50 mm de acuerdo con

ASTM C 109 (ASTM International, 2024). Se prepararon en laboratorio baches de mortero para una mezcla de control y seis mezclas que contenían vidrio activado y tres con vidrio sin activar. Todas las mezclas se prepararon con los mismos contenidos de arena, agua, reductor de agua, relación agua/material cementante (0.55) y relación arena/material cementante (2.75).

En la mezcla de control el material cementante se compuso en el 100 % por cemento GU y sin incorporar polvo de vidrio. Para las mezclas que contenían vidrio activado y sin activar se realizó una sustitución parcial de cemento por vidrio, de modo que el material cementante fue la combinación de cemento con vidrio, como se muestra en la tabla 6.

3.3.3 Métodos de ensayo

Los baches de mortero fresco se mezclaron siguiendo el procedimiento estandarizado indicado en ASTM C 305 y el siguiente protocolo para uniformar el orden y tiempo en que se mezclaron los materiales.

Los baches de mezcla fresca se ensayaron para evaluar que su consistencia y fluidez ofrecieran una trabajabilidad apropiada (ASTM C 1437).

Finalmente, se fabricaron especímenes cúbicos para someterlos a ensayos de resistencia a la compresión. A partir de los ensayos a compresión de especímenes cúbicos de mortero se determinó el IAP como medida para cuantificar la reactividad del vidrio triturado.

Los ensayos de resistencia a la compresión se efectuaron en una máquina hidráulica marca Utest con capacidad de 1300 kN de acuerdo con ASTM C 109. Los ensayos efectuados fueron los siguientes. (Tabla 8)

Tabla 6.

Composición de los baches de mortero de arena con vidrio

| Tratamiento | Cemento (g) | Bache | Variables explicativas | | Constantes | | | |
|-----------------|-------------|-------|------------------------|-----------------|------------|-----------|----------|----------------------|
| | | | Polvo de vidrio (g) | Vidrio activado | NaOH (g) | Arena (g) | Agua (g) | Reductor de agua (g) |
| Control | 805.3 | B | 0 | No | 0 | | | |
| | | C | | No | 0 | | | |
| Polvo de vidrio | 765 | D | 40.3 | Si | 0.81 | 2214.5 | 470.4 | 7.53 |
| | | E | | Si | 1.61 | | | |
| | | F | | No | 0 | | | |
| | 724.7 | G | 80.5 | Si | 1.61 | | | |
| | | H | | Si | 3.22 | | | |
| | | I | | No | 0 | | | |
| | | 684.5 | J | 120.8 | Si | | | |
| K | | | Si | 4.83 | | | | |

Tabla 7.

Protocolo de mezclado de baches de mortero

| Paso | Materiales | Tiempo de mezcla (s) |
|------|---|----------------------|
| 1 | Agregar agua de mezclado al tazón | - |
| 2 | Agregar reductor de agua disolver y mezclar con el agua | 30 |
| 3 | Agregar NaOH disolver y mezclar | 30 |
| 4 | Agregar cemento y mezclar | 30 |
| 5 | Agregar arena y mezclar | 60 |
| 6 | Dejar el bache en reposo | 90 |
| 7 | Mezclado final de los materiales | 60 |

Tabla 8.

Ensayos realizados para preparar los baches y especímenes de ensayo

| Ensayo | Estándar | Tamaño del espécimen |
|-----------------------------|-------------|----------------------|
| Mezclado de mortero fresco | ASTM C 305 | 1500 ml |
| Mesa de flujo | ASTM C 1437 | 300 ml |
| Resistencia a la compresión | ASTM C 109 | 50 x 50 x 50 mm |

4. Resultados y Discusión

4.1 Efecto del vidrio triturado en el flujo de mortero fresco

Las mezclas preparadas fueron ensayadas en una mesa de flujo para evaluar el efecto del contenido de vidrio triturado y NaOH en la consistencia del mortero fresco. En las siguientes figuras se ilustran algunos de los resultados.¶

Los resultados exponen que los baches que se prepararon con un contenido de vidrio triturado del 5 % experimentaron un incremento del flujo en comparación con la muestra de control. Sin embargo, para los baches preparados al 10 y 15 % de vidrio triturado se observa que el flujo se reduce en la medida en que se aumentaba

el contenido de vidrio. La siguiente tabla presenta las variaciones porcentuales del flujo en comparación con la muestra de control.

Figura 4.

Flujo de muestra de control (sin vidrio)

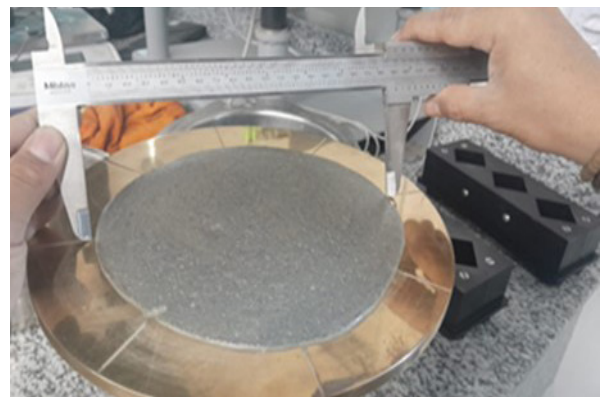


Figura 5.

Flujo de muestra con 10 % de vidrio y 4 % NaOH



Tabla 9.

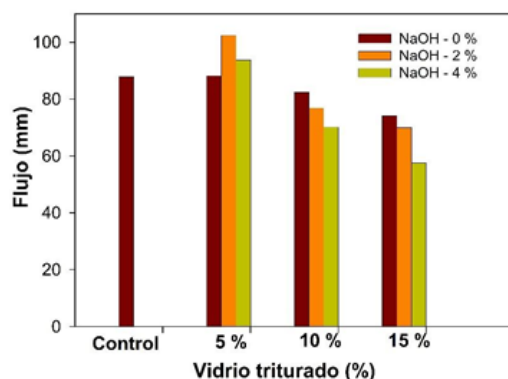
Variación porcentual del flujo en relación con la muestra de control

| Vidrio triturado (%) | NaOH (%) | | |
|----------------------|----------|-------|-------|
| | 0 | 2 | 4 |
| 5 | 0.5 | 16.6 | 6.7 |
| 10 | -6.2 | -12.5 | -20.2 |
| 15 | -15.6 | -20.3 | -34.5 |

En la figura 6 se muestra que el flujo para baches de mortero con 10 y 15 % de vidrio triturado no siguió el comportamiento típico que se ha documentado en otros estudios, en los que la adición de vidrio triturado mejora la consistencia de las mezclas (Islam et al., 2017).

Figura 6.

Contenido de vidrio vs flujo de mortero fresco



NaOH desde 2 hasta 4 % produjo una reducción en la magnitud del flujo del mortero fresco (Figura 7). Dado que la relación agua/cemento, contenido de agua y aditivo, entre otros, se mantuvieron constantes, se considera que el comportamiento observado solo puede ser explicado por la adición de NaOH a la mezcla o a la finura del vidrio preparado para este experimento.

Figura 7.

Contenido de NaOH vs flujo de mortero fresco

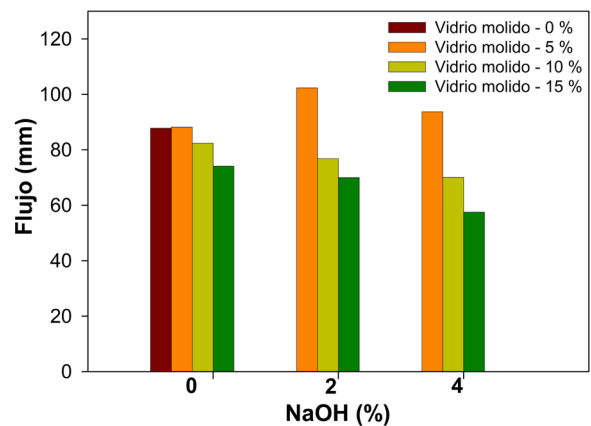


Figura 8.

Ensayo de resistencia a la compresión de muestra de control (prensa hidráulica UTEST)



4.2 Efecto del vidrio triturado en el índice de actividad puzolánica de mortero

La siguiente imagen ilustra la ejecución de los ensayos de resistencia a la compresión.

Los resultados indican que, en general, la sustitución parcial de cemento por los contenidos de vidrio propuestos permitió que el IAP a 7 y 28 días resultara igual o superior al 75 y 85 % de la resistencia a la compresión de la muestra de control en la mayoría de los casos evaluados como lo requiere ASTM C1866/C1866M-20. La siguiente tabla resume la información obtenida.

Tabla 10.

Efecto de las distintas variables estudiadas en el IAP del mortero

| Edad (días) | Vidrio triturado (%) | NaOH (%) | | |
|-------------|----------------------|----------|-----|-----|
| | | 0 | 2 | 4 |
| 7 | 5 | 88 | 93 | 94 |
| | 10 | 77 | 74 | 79 |
| | 15 | 67 | 77 | 81 |
| 14 | 5 | 108 | 84 | 95 |
| | 10 | 83 | 75 | 97 |
| | 15 | 79 | 77 | 94 |
| 28 | 5 | 126 | 108 | 109 |
| | 10 | 89 | 83 | 115 |
| | 15 | 96 | 78 | 74 |

Las siguientes figuras muestran el comportamiento de la resistencia a la compresión e IAP a 7 días para los distintos contenidos de vidrio triturado e hidróxido de sodio. Se observa que el aumento del contenido de vidrio reduce significativamente la resistencia a la compresión e IAP, sin embargo, la adición de hidróxido de sodio incrementa ligeramente el resultado de estos dos parámetros. Solo dos muestras con 10 y 15 % de vidrio y 2 y 0 % NaOH, respectivamente, no alcanzaron un IAP de 75 %.

En cambio, los especímenes ensayados a edades de 14 días muestran un aumento en la resistencia a la compresión y un comportamiento similar a los anteriores, en las tendencias de sus gráficos.

El aumento de NaOH de 2 a 4 produce un incremento claro de resistencia e IAP en todos los casos. Todas las muestras ensayadas resultaron con un IAP igual o superior a 75 %.

Figura 9.

Resistencia a la compresión vs contenido de vidrio triturado (7 días)

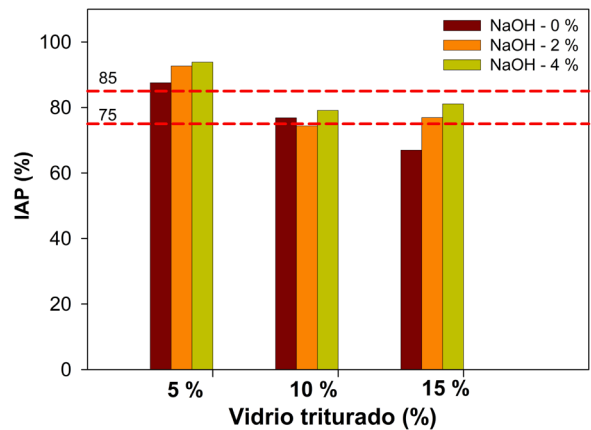


Figura 10.

IAP vs contenido de vidrio triturado (7 días)

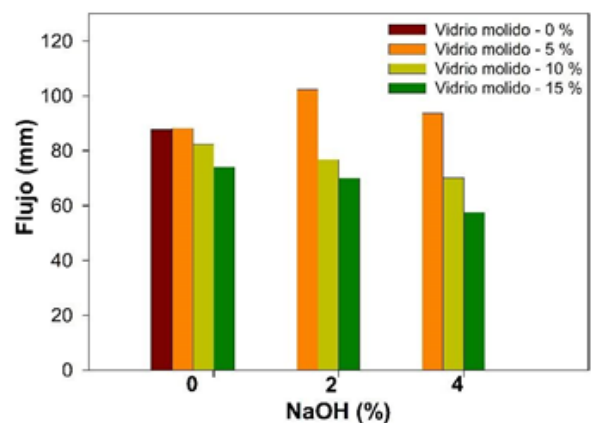


Figura 11.

Resistencia a la compresión vs contenido de vidrio triturado (14 días).

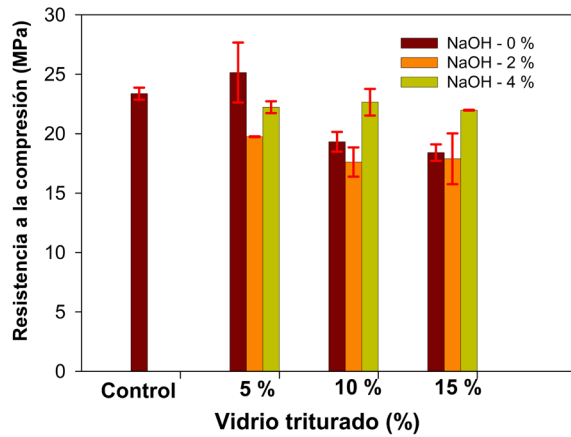


Figura 12.

IAP vs contenido de vidrio triturado (14 días)

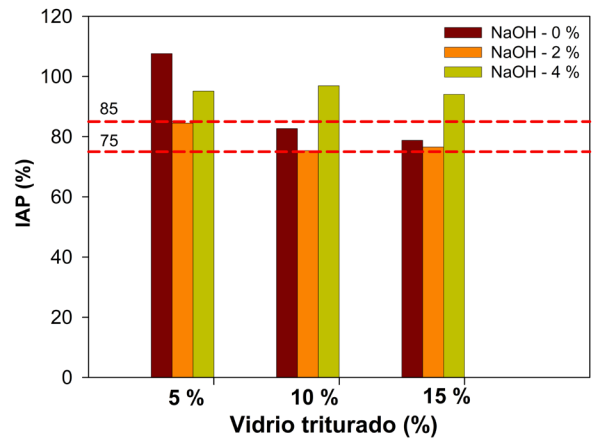


Figura 13: Resistencia a la compresión vs contenido de vidrio triturado (28 días)

Los especímenes ensayados a edades de 28 días muestran un aumento en la resistencia a la compresión. El aumento de NAOH de 2 a 4 produce un incremento claro de resistencia e IAP solo en la muestra con 10 % de vidrio. Por el contrario, los especímenes con 15 % de vidrio y 4 % de NAOH presentaron reducciones en el IAP. Seis de nueve muestras resultaron con un IAP igual o superior a 85 %, especialmente las que tienen 5 y 10 % de vidrio.

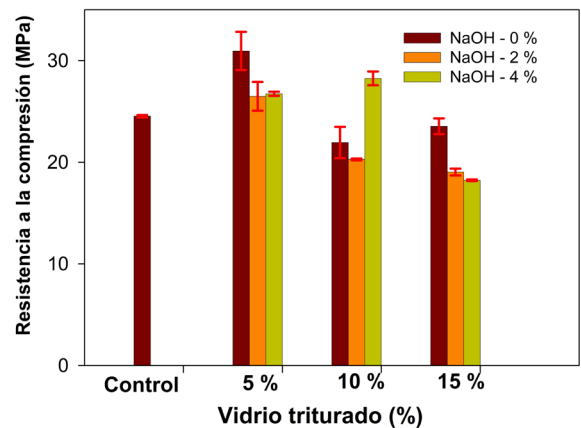
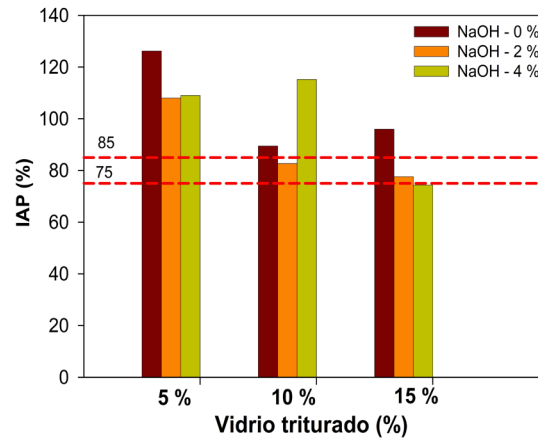


Figura 14.

IAP vs contenido de vidrio triturado (28 días)



Conclusiones

A partir de los resultados de ensayos parciales del experimento llevado a cabo, se plantean las siguientes conclusiones:

1. La adición de vidrio triturado al 5 % a las mezclas de mortero fresco produjo un aumento relativo del flujo en comparación con la muestra de control. Sin embargo, para los contenidos de 10 y 15 % de vidrio y con todos los contenidos de hidróxido de sodio se produjo una reducción en el flujo en la medida en que se incrementaba el contenido de vidrio e hidróxido de sodio.
2. Dado que la relación agua/cemento, contenido de agua y aditivo entre otras

variables se mantuvieron constantes, se considera que el comportamiento observado en el flujo del mortero fresco se debe a la adición de hidróxido de sodio y contenido de vidrio.

3. El IAP a la edad de 7 días de los especímenes de mortero tratados con vidrio superó el 75 % de la resistencia de la muestra de control en 7 de los 9 casos estudiados. Mientras que, a 28 días, 6 de 9 casos de estudio, presentaron IAP iguales o mayores al 85 %. Por consiguiente, la mayoría de las muestras en las que se sustituyó cemento por vidrio triturado o se activaron con hidróxido

de sodio, cumplieron con lo requerido por ASTM C1866/C1866M-20.

4. En general, se observa que, en la medida que se realizaron mayores sustituciones de cemento por vidrio en el mortero, se producen reducciones significativas en la resistencia a la compresión e IAP.

5. En las mezclas en las que el cemento se sustituyó por un 5 % de vidrio se observó que se alcanzaron las resistencias e IAP más altos del estudio, y que superaron considerablemente los límites mínimos de 75 y 85 % a 7 y 28 días, respectivamente. Esto se podría explicar por el hecho de que el contenido de cemento se redujo poco en relación con la muestra de control y a que el vidrio triturado haya tenido una potente reacción puzolánica.

6. En los otros dos casos que se efectuaron sustituciones mayores de vidrio (10 y 15 %), a pesar que el desempeño mecánico fue relativamente inferior, se demostró que en general se obtienen un IAP que se aproxima o supera el 75 y 85 %.

7. En el caso del hidróxido de sodio se concluye que su adición a la mezcla, a edades menores a 28 días, aumenta levemente la resistencia de los especímenes. Al comparar las mezclas con 4 % de hidróxido de sodio con las que tenían 2 %, se observa que la resistencia y el IAP de los morteros (para todos los contenidos de vidrio) en general aumentó o se mantuvo, lo cual indica que la reacción puzolánica resultó potenciada.

Referencias

- Ahmed, A., Kamau, J., Pone, J., Hyndman, F., & Fitriani, H. (2019). Chemical reactions in pozzolanic concrete. *Modern Approaches on Material Science*, 1, 128–133. <https://doi.org/10.32474/mams.2019.01.000120>
- ASTM International. (2020). *ASTM C1866/C1866M-20: Standard specification for ground-glass pozzolan for use in concrete*. https://store.astm.org/c1866_c1866m-20.html
- ASTM International. (2021). *ASTM C778-21: Standard specification for standard sand*.

- <https://store.astm.org/standards/c778>
- ASTM International. (2024). ASTM C109/C109M-24: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 50 mm [2 in.] cube specimens). https://store.astm.org/c0109_c0109m-24.html
- ASTM International. (2024). ASTM C311/C311M-24: Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in Portland-cement concrete. https://store.astm.org/c0311_c0311m-24.html
- Aygün, B. F. (2021). An overview of the impact of using glass powder on mechanical, durability properties in self-compacting concrete. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 6, 116–123. <https://doi.org/10.29187/jscmt.2021.67>
- Cyr, M., Idir, R., & Poinot, T. (2012). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science*, 47, 2782–2797. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6107-2>
- Dobiszewska, M., Pichór, W., Tracz, T., Petrella, A., & Notarnicola, M. (2023). Effect of glass powder on the cement hydration, microstructure and mechanical properties of mortar. *Materials Proceedings*, 13. <https://doi.org/10.3390/materproc2023013040>
- Du, H., & Tan, K. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part II—Alkali-silica reaction and mitigation methods. *Cement and Concrete Composites*, 35, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.029>
- Du, H., & Tan, K. (2014). Waste glass powder as cement replacement in concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12, 468–477. <https://doi.org/10.3151/jact.12.468>
- Hong, Y., Xu, X., Zhang, C., Cheng, Z., & Yang, G. (2024). Microscopic mechanism and reagent activation of waste glass powder for solidifying soil. *Buildings*, 14. <https://doi.org/10.3390/buildings14051443>
- Ibrahim, K. (2023). The effect of using glass powder as cement substitution and its mixing method on the concrete characteristics. *Journal of Building*

- Pathology and Rehabilitation*, 8. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00272-8>
- International Finance Corporation. (2022). *Strengthening sustainability in the cement industry*.
- Islam, G. S., Rahman, M. H., & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.10.005>
- Kaminsky, A., Krstic, M., Rangaraju, P., Tagnit-Hamou, A., & Thomas, M. (2020). Ground-glass pozzolan for use in concrete. *Concrete International*, 42, 24–32.
- Khatri, R., Sirivivatnanon, V., & Gross, W. (1995). Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 25, 209–220. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)00128-L](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)00128-L)
- Lemesre, L., Idir, R., & Cyr, M. (2024). Strength development and environmental impact of waste-glass-based cements activated with Portland cement, NaOH, Na-silicate or Na-carbonates at ambient temperature. *Materials*, 17. <https://doi.org/10.3390/ma17205097>
- Mogetta, M. (2021). *The origins of concrete construction in Roman architecture: Technology and society in Republican Italy*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108990516>
- Omran, A., Soliman, N., Zidol, A., & Tagnit-Hamou, A. (2018). Performance of ground-glass pozzolan as a cementitious material: A review. *Advances in Civil Engineering Materials*, 7, 237–270. <https://doi.org/10.1520/ACEM20170125>
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30, 91–100. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6)
- Siddall, R. (2000). The use of volcaniclastic material in Roman hydraulic concretes: A brief review. *Geological Society Special Publication*, 171, 339–344. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.171.01.24>