

Evaluación del uso de vidrio reciclado en la producción de hormigones cubanos

Evaluating the use of recycled glass in Cuban concrete production

Lianis de los Ángeles Columbié-Lamorú^{1*}, Raida Crespo-Castillo², Leonardo Rodríguez-Suárez¹, Yadira González-Batista¹

¹Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas, La Habana, Cuba.

²Centro de Investigaciones y Desarrollo de la Construcción, La Habana, Cuba.

*Autor para la correspondencia: lianis@ciq.cu

Resumen

En Cuba se realizan investigaciones con el fin de emplear en las mezclas de hormigón vidrio reciclado como sustituto parcial de la arena y el cemento. Este artículo reporta el resultado, a escala de laboratorio, de la sustitución del árido fino y del cemento por vidrio molido en dosificaciones de 25 %, 50 % y 100 % para la primera y de 10 %, 20 % y 30 % para el segundo. Las mezclas obtenidas se compararon con un patrón en cuanto a consistencia y resistencia a la compresión. En las mezclas frescas se obtuvo un aumento directamente proporcional de la consistencia con el porcentaje de reemplazo de la arena, mientras que para el cemento ocurrió lo contrario, sin embargo todas mantuvieron una consistencia apta para el uso. En el intervalo desde los 7 hasta los 28 días de edad de las mezclas la resistencia a la compresión se incrementó gradualmente, obteniéndose en las muestras M1, M4 y M5 valores que sobrepasan el de la muestra patrón. Los resultados avalan a escala de laboratorio la factibilidad de reemplazar por vidrio molido el 25 % de la arena y hasta el 20 % del cemento, sin que se afecte la resistencia a la compresión normada (25-35 MPa) para el hormigón tradicional.

Palabras clave: vidrio molido reciclado; cemento; hormigón; arena; resistencia a la compresión.

Abstract

With the purpose of using recycled glass in concrete mixtures as a partial substitute for sand and cement in Cuba, researches are carried out. This article shows the result at a laboratory scale in substituting fine aggregate and cement with ground glass in dosages of 25%, 50% and 100% for the first one and 10%, 20% and 30% for the second one. The mixtures obtained were compared to a standard for consistency and compressive strength. In the fresh mixes, a directly proportional increase in consistency was obtained with the percentage of replacement of the sand but it was different for cement, however all of them maintained a consistency suitable for use. Compressive strength gradually increased in an interval from 7 to 28 days of mixing's age obtaining values exceeding the standard sample in M1, M4 and M5 samples. The results support at a laboratory scale, the feasibility of replacing 25% of the sand and up to 20% of cement with ground glass, without affecting the standard compressive strength (25-35 MPa) for traditional concrete.

Keywords: recycled ground glass; cement; concrete; sand; compressive strength.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón tradicional o concreto es un material compuesto empleado en la construcción, formado esencialmente por un aglomerante, que en la mayoría de las ocasiones es cemento, al que se añaden partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos específicos. Las partículas de agregados, dependiendo fundamentalmente de su diámetro medio, son los áridos (grava, gravilla y arena).

El uso a futuro del hormigón armado en la construcción pasa por reducir al máximo posible sus costos energéticos y su impacto medioambiental. En el hormigón, el agua y el cemento son insumos que reaccionan hidráulicamente, generando una reacción química que al fraguar permite formar el esqueleto de la mezcla. Estudios realizados han permitido conocer la posibilidad de reciclar diferentes residuos sólidos para incorporarlos como adiciones en el hormigón con el fin de optimizar las mezclas, siendo el vidrio uno de ellos.

El empleo de materiales de construcción no convencionales en la búsqueda de soluciones a problemas de la sociedad, como la construcción de viviendas, viales, etc., reduce el incremento de los costos que ello conlleva con la sustitución parcial o total del consumo de materias primas escasas o ubicadas

en sitios distantes. Asimismo, contribuye a la innovación y al desarrollo con su consecuente beneficio económico, alto impacto social y ecológico.

La utilización de materiales alternativos en la elaboración de hormigones es motivo de estudio de varios organismos y universidades a nivel mundial con el objetivo de disminuir el empleo de las materias primas no renovables que se emplean en estas producciones y, a la vez, estimular el empleo de materiales y productos reciclados como criterio de sostenibilidad, sin perder de vista que al ser evaluados estos deben arrojar resultados de resistencia y durabilidad similares a los de los hormigones tradicionales (Soroushian 2012).

El empleo de adiciones como sustituto de cierto porcentaje de cemento disminuye de forma significativa el costo medioambiental de la construcción, al reducir parte de la generación de CO₂ y explotación minera necesarias para la producción de cemento, además de mejorar la gestión de los residuos reutilizados y evitar su almacenamiento en vertederos (Lam y Poon 2007).

La disposición de los diversos desechos generados por la actividad humana se ha convertido en un problema debido a una serie de factores y posibles consecuencias, entre las cuales se tienen problemas sanitarios, costos de transporte, contaminación, impacto ambiental y desperdicio de recursos materiales en capacidad para ser reutilizados o reciclados.

El vidrio es uno de los materiales depositados en los vertederos que necesita mayor tiempo para su descomposición; por otro lado, el no aprovechar recursos como este implica el uso de combustibles, así como la contaminación durante las etapas de extracción, procesamiento, producción, distribución y comercialización.

De igual manera es preciso mencionar que en temas de impacto ambiental la extracción de materias primas y su procesamiento, producen erosión de terrenos, contaminación de aguas superficiales y subterráneas y una serie de efectos y costos indirectos a ser considerados para validar y justificar su reciclaje (Poveda *et al.* 2015).

El uso del vidrio reciclado a diferentes granulometrías, como sustituto parcial de la arena o el cemento, ha dado buenos resultados internacionalmente (Catalán 2013; Emam y Al-Tersawy 2012; Lam y Poon 2007; Peñafiel 2006; Ramos 2015; Rodríguez y Ruiz 2016; Terro 2005); sin embargo, no obstante a las experiencias sobre el tema, en Cuba se están dando los primeros pasos para utilizarlo de forma apropiada, lo cual daría una solución a la problemática ambiental que se evidencia al tener en vertederos un importante volumen de vidrio, fundamentalmente el proveniente de envases de cerveza.

En Cuba cifras reportadas indican que el 91,9 % de estos envases se recuperan mediante las casas de compra; el 66 % de esta recuperación pertenece a las botellas de cerveza y el 23 % a las botellas de ron (Sánchez 2015).

Estudios realizados en la Universidad de Michigan en Estados Unidos (Soroushian 2012; Nassar y Soroushian 2012a, 2012b) indican que el vidrio puede ser reutilizado en la producción de hormigones, con un tamaño de partículas promedio de 13 μm , para acelerar las reacciones químicas y en su estado endurecido tiene mayor grado de resistencia a la compresión es más duradero y tiene un menor grado de absorción que los hormigones tradicionales.

El efecto puzolánico de la adición del cristal molido al hormigón se hace evidente a edades más altas de los elementos, de 28 a 91 días, obteniéndose buenos resultados con un porcentaje de adición de vidrio de un 10 % (Metwally 2007).

La influencia del vidrio molido en la resistencia a la compresión del concreto ha sido estudiada y se determinó, mediante la distribución *t* Student, que para obtener resistencias iguales o mayor que el concreto convencional se reemplace, como máximo, el cemento por vidrio hasta un 10 % de su peso (Guerson y Walhoff 2017).

Este estudio evaluó, a escala de laboratorio, la posibilidad de sustituir, en mezclas de hormigón, parte de la arena o del cemento por vidrio molido, a dosificaciones de 25 %, 50 % y 100 % para la primera y de 10 %, 20 % y 30 % para el segundo; manteniendo las propiedades de las mezclas dentro de los parámetros del hormigón tradicional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para las pruebas a escala de laboratorio se empleó el árido procedente de la cantera Mariano Pérez Balí (El Purio) en el municipio de Encrucijada en Villa Clara (Figura 1), el cemento Portland (P-35) proveniente de la fábrica Carlos Marx en Cienfuegos y el vidrio molido reciclado de la Empresa de Recuperación de Materias Primas de Villa Clara.



Figura 1. Cantera Mariano Pérez Balí (El Purio) ubicada en el municipio de Encrucijada.

2.1. Caracterización de los áridos

La calidad de los áridos depende de los procedimientos de extracción y de los tratamientos a que hayan sido sometidos para su fraccionamiento y beneficio. Por su tamaño, generalmente se dividen en dos grupos: árido grueso y árido fino (Figuras 2 y 3).



Figura 2. Granito



Figura 3. Árido fino.

Los resultados de análisis químico de la muestra de árido (Tabla 1) demuestran que está formada en su mayoría por carbonatos y óxido de calcio, debido a las características de las rocas calizas del área de procedencia; de ahí también su bajo contenido de sílice.

Tabla 1. Resultados del análisis químico del árido de la cantera Mariano Pérez Balí

Composición química predominante (%)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PPI	RI	Carbonatos totales
0,23	2,90	2,01	53,56	0,17	0,01	40,58	1,09	87,97

PPI: pérdida de masa por ignición. RI: residuo insoluble.

La Tabla 2 muestra la granulometría de los áridos gruesos de la mencionada cantera, donde puede observarse que cumple con los parámetros especificados para ser usada en la mezcla de hormigón y presenta un 2,12 % de partículas finas menores de 0,074 mm.

Tabla 2. Granulometría de la fracción gruesa de la cantera Mariano Pérez Balí

Tamices (mm)	12,7	9,52	4,76	2,38	1,19	0,074
% pasado	98	96	34	9	4	2,12
NC 251:2013	100	90-100	20-55	0-10	0-10	-

El árido grueso es una gravilla que procede de la trituración de rocas calizas de la cantera con un tamaño entre 10 mm y 5 mm. Su litología es de las calizas puras organógenas, duras, compactas, blancas a crema, masivas o levemente brechosas.

La Tabla 3 muestra la granulometría de los áridos finos de la cantera, donde puede percibirse que cumple con los parámetros especificados para ser usada en la mezcla de hormigón y presenta un 3,76 % de partículas finas menores de 0,074 mm.

Tabla 3. Granulometría de la fracción fina de la cantera Mariano Pérez Balí

Tamices (mm)	9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,297	0,149	0,074
% pasado	100	96	81	55	30	16	9	3,76
NC 251:2013	100	90-100	70-100	45-80	25-60	10-30	2-10	-

Las características físico-mecánicas de los áridos empleados (Tabla 4) se encuentran en el rango establecido para sus fracciones gruesa y fina, según la norma NC 251 (2013).

Tabla 4. Características físico-mecánicas de los áridos de la cantera Mariano Pérez Balí

Propiedades		Fracción gruesa		Fracción fina	
		Promedio	Intervalo	Promedio	Intervalo
Masa volumétrica (g/cm ³)	Corriente	2,57	2,55 – 2,58	2,57	2,55 – 2,68
	Aparente	2,68	2,60 – 2,69	2,68	2,75 – 2,70
	Saturado	2,61	2,58 – 2,62	2,61	2,61 – 2,67
Absorción (%)		1,29	1,1 – 1,6	1,29	0,3 – 1,8
Masa volumétrica unitaria (kg/m ³)	Suelto	1368	---	1368	1478 – 1594
	Compactado	1476	---	1476	1656 – 1750
Huecos (%)		40,6	-	36,4	34,7 – 37,1
Partículas planas y alargadas (%)		6,0	0,41 – 12,9	6,0	0,41 – 12,9
Partículas de arcilla (%)		0,0	0 – 1	0,15	0 – 1,7
Equivalente de arena (%)		---	---	89	≥ 70
Azul de metileno (%)		---	---	1,75	---
Módulo de finura		---	---	3,2	2,95 – 3,7

2.2. Caracterización del cemento

El cemento utilizado en la fabricación de las mezclas fue Portland P-35, proveniente de la fábrica Carlos Marx de Cienfuegos. Este cemento posee las propiedades descritas en la Tabla 5, donde se percibe que el mismo cumple con los requisitos establecidos en la norma NC 95 (2017).

Tabla 5. Características del cemento proveniente de la fábrica de Cienfuegos

Cemento P-35	Valores medios									
	Composición química (%)				Superficie específica (m ²)	Tiempo de fraguado		Resistencia a la compresión (MPa)		
	SO ₃	MgO	PPI	RI	SE	FI (min)	FF (h)	3 d	7 d	28 d
Norma NC 95:2011	3,5 máx	5,0 máx	4,0 máx	4,0 máx	2800 mín	45 mín	10 máx	17,0 mín	25,0 mín	35,0 mín
Cemento Cienfuegos	3,1	1,5	1,7	3,0	3153	97	3	28,4	35,9	47,7

En la composición química (Tabla 6) y principales fases (Tabla 7) de este cemento predominan el óxido de calcio y la sílice característico en los cementos Portland, así como las fases alita (C₃S) y belita (C₂S). Estos silicatos en sus proporciones adecuadas ayudan en el proceso de fraguado.

Tabla 6. Composición química del cemento P-35, %

CaO	Si ₂ O	C ₃ A	C ₄ FA	CaO _{libre}
62,64	21,20	10,78	8,22	1,50

Tabla 7. Principales fases del cemento P-35, %

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ FA	CaO _{libre}
41,52	29,46	10,78	8,22	1,50

2.3. Caracterización del vidrio

La composición química del vidrio (Tabla 8) muestra que es un vidrio sódico cálcico pues los óxidos de silicio, calcio y sodio se encuentran en mayor proporción. Este tipo de vidrio es el que se funde con mayor facilidad y el más barato, por lo que la mayor parte del vidrio incoloro y transparente tiene esta composición.

Tabla 8. Composición química del vidrio, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃
72,00	1,90	0,10	8,83	1,05	10,67	5,45

La Tabla 9 ofrece las especificaciones técnicas del vidrio reciclado molido. Debido a la inexistencia de una norma específica para el uso del vidrio reciclado como adición activa en el hormigón en sustitución del árido, la comparación se realizó empleando la norma NC 251 (2015).

Tabla 9. Especificaciones técnicas del vidrio molido (calcín)

Propiedades	Valor obtenido	Valor normado NC 251:2015
Humedad (%)	2,4	< 3
Forma	Se evaluaron dos fracciones <u>Fracción fina de 3,5–5 mm:</u> Son partículas angulosas con una importante proporción de lascas y agujas. El porcentaje de lascas está entre 22–27 % y la proporción de lascas y agujas en 1,8 % <u>Fracción polvo de vidrio ≤ 0,074 mm:</u> Tienen menos angulosidad y las agujas y lascas se encuentra en menor proporción. El porcentaje de lascas está aproximadamente en 0,4 % y la proporción de lascas y agujas en 0,6 %	Partículas angulosas, con una importante proporción de lascas y agujas producidas por el machaqueo <u>Fracción fina de 3,5–5 mm:</u> % de lascas: 20–30 y la proporción de lascas y agujas entre 1–2 % <u>Fracción polvo de vidrio ≤ 0,074 mm:</u> Menos angulosidad y menor proporción de agujas y lascas. % de lascas está en 1 y la proporción de lascas y agujas en 1 %
Peso específico (g/cm ³)	Grueso: 2,43 Fino: 2,47 Polvo de vidrio: 2,56	Grueso: 1,96–2,41 Fino: 2,49–2,52 Polvo de vidrio: 2,54–2,58

Norma NC 251:2015. Áridos para hormigón. Especificaciones de calidad.

Una muestra de la fracción fina de vidrio y el polvo de vidrio se muestra en la Figura 4. Según referencias bibliográficas la coloración verde del vidrio se debe a la presencia en la composición química del óxido de cromo (Cr₂O₃).

El uso del polvo de vidrio favorece la reacción puzolánica y controla la reacción álcali-sílice (Emam y Al-Tersawy 2012).



Figura 4. Fracción fina de vidrio y polvo de vidrio.

El vidrio reciclado, después de molido en un molino de bolas consecuentemente hasta obtener las granulometrías requeridas (fracción fina y fracción polvo), fue objeto de ensayos que evidenciaron su conformidad para ser empleado en las dosificaciones del hormigón como sustitución parcial o total del árido fino y como sustitución parcial del cemento, según se muestra en la Tabla 9 expuesta anteriormente.

2.4. Diseño de experimentos

Las principales propiedades que se evalúan al hormigón atendiendo a su estado son:

- En el hormigón fresco, la consistencia o asentamiento, medida con el ensayo del cono de Abrams basado en la norma NC ISO 1920-2 (2010).
- En el hormigón endurecido, la resistencia a la compresión, que es la máxima carga axial que alcanza una determinada sección de hormigón antes de la falla. Este valor es la medida más común de desempeño empleada al diseñar estructuras de todo tipo y se adopta como patrón la resistencia a las edades de 7 y 28 días, ya que a los 28 días el hormigón puede alcanzar más de 90 % de la resistencia total.

Como variable independiente en la investigación fue tomada la dosificación del hormigón con vidrio reciclado molido en diferentes fracciones granulométricas como reemplazo parcial o total de la arena y el cemento. Como variable dependiente fue tomada la resistencia a la compresión.

Como criterio de diseño, teniendo en cuenta investigaciones anteriores, se tiene:

MP: Muestra patrón. Dosificación tomada como referencia de la bloquera Villa Clara.

M1: Sustitución parcial del árido fino empleando:

- Arena: 50 %
- Vidrio fino: 25 %

M2: Sustitución parcial del árido fino (arena) empleando:

- Arena: 50 %
- Vidrio fino: 35 %
- Polvo de vidrio: 15 %

M3: Sustitución total del árido fino (arena) empleando:

- Vidrio fino: 75 %
- Polvo de vidrio: 25 %

M4: Sustitución parcial del cemento hasta un 10 % con polvo de vidrio.

M5: Sustitución parcial del cemento hasta un 20 % con polvo de vidrio.

M6: Sustitución parcial del cemento hasta un 30 % con polvo de vidrio.

Relación agua/cemento: 0,50. Se emplearon entre 4 L y 5 L de agua por dosificación, excepto en la que se sustituye el cemento, dosificación en la que la relación de agua/cemento es 0,70 y se empleó 4,5 L.

Se elaboraron y ensayaron a compresión seis probetas de hormigón sin vidrio y seis probetas por cada dosificación definida, lo que arrojó un total de 42 muestras (Figura 5). Para la realización de este ensayo se emplearon las normas NC 221 (2002) y NC ISO 1920-3 (2010).



Figura 5. Elaboración y rotura de las probetas de hormigón.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Asentamiento de las mezclas de hormigón empleando el cono de Abrams

Los resultados obtenidos en la determinación de la consistencia o el asentamiento del hormigón en estado fresco se muestran en la Figura 6, donde se observa que en la medida que aumenta el contenido de vidrio en sustitución de la arena aumenta el valor de asentamiento, debido a que mayor porcentaje de vidrio en sustitución de la arena disminuye la absorción del agua en la mezcla mejorando así la docilidad de la misma.

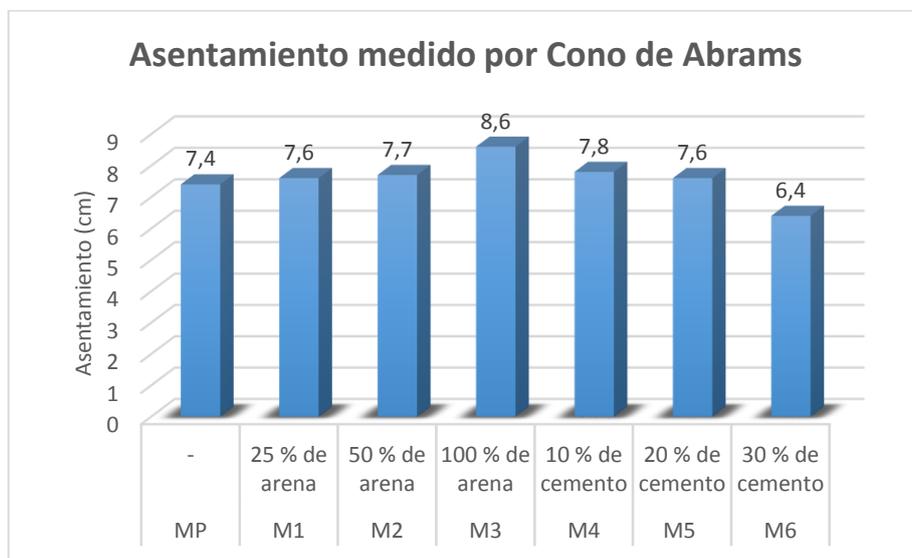


Figura 6. Resultados de la consistencia en el hormigón fresco.

Mientras que en las muestras donde se sustituye parcialmente el cemento por un porcentaje de vidrio, en la medida que este aumenta el asentamiento disminuye, obteniéndose los valores más bajos en la muestra M6 donde se sustituyó el 30 % del cemento, lo que evidencia que el porcentaje de sustitución del cemento no debe exceder al 20 % como sugieren otros investigadores en estudios sobre la temática.

Si bien la docilidad de la mezcla de hormigón en estas muestras disminuye a medida que aumenta el porcentaje de vidrio agregado, pérdida que se puede medir en la disminución del asentamiento del cono; por otro lado, las piezas de hormigón resultan ser más resistentes que los elementos elaborados con hormigón a base de cemento Portland ordinario. Además, la expansión debida a la reacción álcali-sílice es controlada en directa proporcionalidad según sea el porcentaje de vidrio agregado a la mezcla (Metwally 2007).

Sin embargo, todas las muestras tienen una consistencia blanda, adecuada para ser usadas de acuerdo con la norma NC ISO 1920-2 (2010).

3.2. Ensayos de resistencia a la compresión

El comportamiento de la resistencia a la compresión de las muestras a los 7 y 28 días es mostrado en la Figura 7, donde se puede notar que a los 7 días se obtiene un incremento de la resistencia en la muestra M1 con respecto a la muestra patrón, lo que corrobora los resultados de trabajos realizados anteriormente.

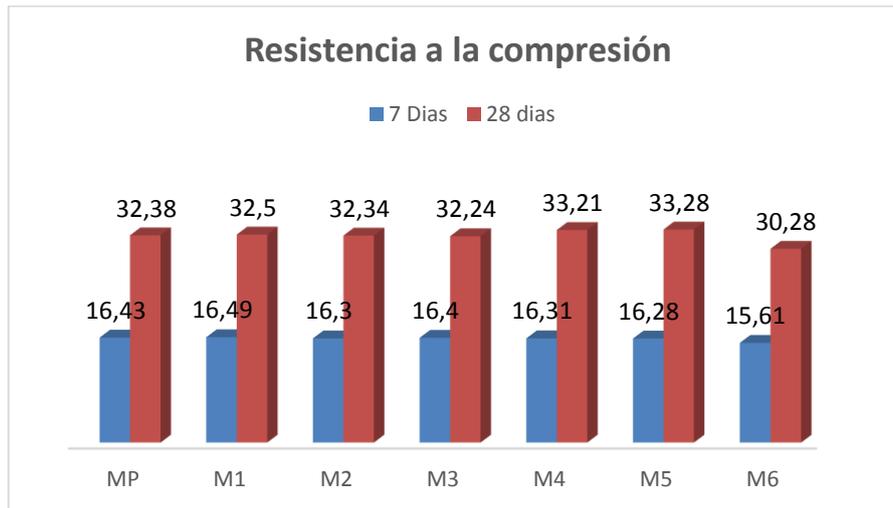


Figura 7. Comportamiento de la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días.

De la edad 7 hasta 28 días se distingue un incremento gradual de la resistencia, como se esperaba para todas las muestras de acuerdo con las literaturas revisadas, alrededor de un 50 % aproximadamente. En el caso de las muestras con sustitución de arena (M1, M2 y M3) se obtuvieron los mejores resultados para la muestra M1 con una sustitución de 25 % de arena por vidrio molido. El valor sobrepasa el de la muestra patrón pero, en la medida que se incrementa el porcentaje de vidrio, tiende a disminuir la resistencia a la compresión, lo que puede estar dado por la disposición no homogénea del vidrio en la mezcla de concreto. Esto pudo afectar la interacción agregado-pasta, atenuando la resistencia mecánica del vidrio; característica vinculada con su fragilidad.

Para el caso de la sustitución parcial del cemento (M4, M5 y M6) en todas las muestras se obtuvo el comportamiento esperado, un aumento de la resistencia a la compresión de los 7 a los 28 días en 49 % aproximadamente. En las muestras M4 y M5 se obtuvieron valores de resistencia superiores a la muestra patrón como se esperaba de acuerdo con la literatura consultada, debido a que el vidrio molido entra en una reacción beneficiosa con los hidratos del cemento, haciendo más fuerte y duradero el mortero. Se trabajó con polvo de vidrio donde el tamaño de partículas es menor que 0,074 mm

para mejorar la calidad de la reacción química y aprovechar su acción puzolánica en el hormigón.

En el caso de la muestra M6, donde se trabajó con 30 % de vidrio molido, se obtuvo el valor más bajo, lo que evidencia que la sustitución parcial del cemento por vidrio molido es factible solo hasta el 20 %, permitiendo mantener la resistencia a la compresión en un rango considerable, similar a los hormigones tradicionales.

Si bien, según los resultados obtenidos, no se apreció una variación significativa en la resistencia a partir de los hormigones patrones, este mismo hecho permite verificar que la inclusión de vidrio en el hormigón es completamente factible, desde el punto de vista de inalterabilidad de las características principales de este material. Es pertinente recomendar entonces la realización de pruebas a escala industrial para comprobar hasta qué punto es reproducible el resultado aquí obtenido.

4. CONCLUSIONES

La investigación a escala de laboratorio indica que:

- El análisis de consistencia o asentamiento en el hormigón fresco, aplicando el método cono de Abrams, arroja que todas las muestras tienen una consistencia apta para ser usadas.
- Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión en el hormigón endurecido evidencian que es factible sustituir hasta un 20 % del cemento por vidrio molido proveniente del reciclaje de botellas con, resultados similares al hormigón tradicional.
- Hasta un 25 % de la arena puede ser reemplazada por vidrio molido sin que se alteren las características del hormigón tradicional.

5. REFERENCIAS

- Catalán, C. 2013: *Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado H15, H20 y H30*. Trabajo de diploma. Universidad Austral de Chile. Consulta: 14/11/2019. Disponible en: cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfcic357e/doc/bmfcic357e.pdf
- Emam, E. y Al-Tersawy, S. 2012: Recycled glass as a partial replacement for the fine aggregate in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 35: 785-791. ISSN: 0950-0618.
- Guerson, M. y Walhoff, T. 2017: *Influencia del vidrio molido en la resistencia a la compresión del concreto y costos de fabricación, comparado con el concreto convencional, Barranca-2016*. Trabajo de diploma. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Perú.

- Lam, C. y Poon, C. 2007: Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass-ASR consideration. *Cement & Concrete Composites*, 29(8): 616-625. ISSN: 0958-9465.
- Metwally, I. 2007: Investigations on the Performance of Concrete Made with Blended Finely Milled Waste Glass. *Advances in Structural Engineering*, 10(1): 47-53. ISSN: 1369-4332.
- Nassar, R. U. D. y Soroushian, P. 2012a: *Field investigation of concrete incorporating milled waste glass*. USA: Michigan State University.
- Nassar, R. U. D. y Soroushian, P. 2012b: *Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement*. USA: Michigan State University.
- Norma NC 251. 2013: Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Norma NC ISO 1920-2. 2010: Ensayos al hormigón -parte 2: propiedades del hormigón fresco. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Norma NC ISO 1920-3. 2010: Ensayos al hormigón -parte 3: elaboración y curado de probetas para ensayos. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Norma NC: 221. 2002: Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Norma NC: 251. 2015: Áridos para hormigón. Especificaciones de Calidad. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Norma NC: 95. 2017: Cemento Portland. Especificaciones. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Peñañiel, D. 2016: *Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino*. Tesis de maestría. Universidad Técnica de Ambato. Consulta: 14/11/2019. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23038>
- Poveda, R.; Granja, V.; Hidalgo, D. y Avila, C. 2015: Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste de adoquines de hormigón tipo A. *Revista Politécnica*, 35(3): 61-71.
- Ramos, W. 2015: *Propuesta de reciclado óptimo de vidrio para su utilización en el sector de la construcción de la ciudad de Quito*. Trabajo de diploma. Universidad de las Américas.
- Rodríguez, M. y Ruiz, M. 2016: Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(2): 53-60. ISSN: 2362-2539.

- Sánchez, J. E. 2015: El reciclaje de los envases de vidrio en Cuba. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. Consulta: 14/11/2019. Disponible en: <http://www.eumed.net/rev/caribe/2015/09/vidrio.html>
- Soroushian, P. 2012: *Towards broad use of recycled glass concrete on must campus*. USA: Michigan State University.
- Terro, M. 2005: Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. *Building and Environment*, 41(5): 633–639. ISSN: 0360-1323.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de intereses que declarar

Contribución de los autores

LACL: Análisis de resultados y redacción del manuscrito. RCC: Experimentación y análisis de resultados. LRS: Análisis de resultados y redacción del manuscrito. YGB: Análisis de resultados y redacción del manuscrito.

ORCID

LACL, <https://orcid.org/0000-0002-0833-0907>

RCC, <https://orcid.org/0000-0002-3815-5898>

LRS, <https://orcid.org/0000-0003-1919-3773>

YGB, <https://orcid.org/0000-0002-6043-6995>

Recibido: 09/01/2020

Aceptado: 10/03/2020