

Diseño de Mezcla de Hormigón Utilizando Vidrio Reciclado de Botellas como Parte del Agregado Fino y Cemento Adicionado con Escoria de Alto Horno

*Eliseo Toledo Rodríguez, BSCE, PE
Maestría en Ingeniería Civil
Prof. Héctor Cruzado Vélez, PhD, PE
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

Resumen — *El presente estudio es la continuación de un proyecto donde se realizaron pruebas a hormigones con vidrio reciclado en sustitución de agregado fino en un 10%, 20% y 30%. En esta nueva etapa, el vidrio fue recolectado de los desperdicios del comercio tradicional del municipio de Ponce y llevado a través del proceso industrial tradicional de trituración en la manufactura de arena en una cantera. Al vidrio ya triturado se le realizaron pruebas de granulometría, gravedad específica, absorción y humedad. Se prepararon 12 diseños de mezclas de hormigón con tres diferentes porcentajes de sustitución de vidrio por agregado fino en un 0%, 8%, 16% y 25%, también tres diferentes relaciones agua cemento de 0.30, 0.50 y 0.70. Se compararon los resultados de resistencias a la compresión. También, a las muestras con relación agua cemento de 0.30, se le realizaron pruebas de permeabilidad de iones de cloruro. Se confirmó que no hay efectos negativos en los resultados de resistencias, sin embargo se encontró que, a medida que se aumenta el porcentaje de vidrio, aumentó también la permeabilidad a cloruros.*

Palabras claves — *absorción, “alkali-silica”, curvas de relación agua cemento vs. resistencia a la compresión, granulometría, gravedad específica, permeabilidad.*

INTRODUCCIÓN

El presente estudio es una continuación del proyecto realizado por Santiago Nieves [1], donde se realizaron pruebas de hormigón de resistencia de 3,000 libras por pulgada cuadrada (psi) con vidrio reciclado en sustitución de agregado fino en un 10%, 20% y 30%. Dicho proyecto partió de la premisa que la situación actual es que “la disposición y de botellas de vidrio representa un

gran problema para los municipios, ya que desde el 2009 no existe un plan para reciclar los mismos”.

Para este proyecto se diseñaron 12 mezclas de hormigón con relaciones agua cemento de 0.30, 0.50, y 0.70 como mezclas control, también utilizando 8%, 16% y 25% de vidrio reciclado en sustitución de agregado fino para cada relación agua cemento respectivamente, y se compararon los resultados con las pruebas de control. Además, se preparó una mezcla control para comparar los resultados. A las mezclas se le realizaron diferentes pruebas en su estado plástico y en su estado endurecido. Las pruebas realizadas fueron las siguientes: asentamiento, temperatura, peso unitario, resistencia a la compresión, y permeabilidad a iones de cloruro. En adición, al vidrio triturado para ser utilizado en las mezclas, se le realizaron las pruebas de granulometría, gravedad específica y absorción para comparar con la arena. Con los resultados obtenidos se pudo determinar que la utilización del vidrio triturado en sustitución de agregado fino es una alternativa viable que puede contribuir de manera significativa a la reducción de botellas en los rellenos sanitarios del país. La Figura 1 muestra el vidrio triturado de botellas de vidrio recuperadas de los desperdicios de los comercios tradicionales en el Municipio Autónomo de Ponce.



Figura 1
Vidrio Triturado Reciclado

REVISIÓN DE LITERATURA

En estudio realizado por Santiago Nieves en la Universidad Politécnica de Puerto Rico [1], se determinó que el uso de vidrio reciclado en sustitución de agregado fino en hormigón era viable como una alternativa para lidiar con el manejo de estos desperdicios y evitar que los mismos fueran a parar a los vertederos del país. En este estudio observó el comportamiento del hormigón en su estado plástico y endurecido de mezclas de prueba con 10%, 20% y 30% de vidrio triturado en sustitución de agregado fino. Utilizando una mezcla control de resistencia de 3,000, psi se realizaron sus comparativas donde, hasta un 20%, los resultados fueron satisfactorios.

Existe otro estudio [2] donde se ha documentado también la problemática del manejo del vidrio en la ciudad de Hong Kong. Se realizaron pruebas para reciclar vidrio en productos derivados del hormigón como bloques, morteros arquitectónicos y hormigón autocompactante. En dicho estudio se encontraron resultados prometedores, pero existe la problemática de la legislación gubernamental donde se establezca el método de disposición final del vidrio para que se pueda viabilizar su reciclaje.

Se han realizado estudios con vidrio reciclado en hormigón hace más de 50 años [3], pero en su mayoría fueron con propósitos arquitectónicos, sustituyendo agregado fino y grueso. Dichos estudios también recomiendan la utilización de otros tipos de cemento con bajos contenidos de álcalis para reducir el potencial de reacciones perjudiciales a los hormigones como la Reacción Alcali Silice (ASR, por sus siglas en inglés).

Shayan [4] - [5] realizó estudios utilizando el vidrio pulverizado, ya que en ese tamaño el vidrio posee propiedades puzolánicas y puede utilizarse como reemplazo de cemento en el hormigón, haciendo económicamente viable su utilización, aún con el alto costo de producción. La utilización del vidrio en polvo produjo una matriz de hormigón más densa, mejorando la durabilidad. Concluyó en su estudio que es posible reemplazar hasta un 30%

de cemento o agregado fino por vidrio pulverizado sin causar efectos adversos al hormigón.

Nassar y Soroushian [6] realizaron estudios donde utilizaron agregados reciclados de hormigón y vidrio pulverizado. Obtuvieron resultados satisfactorios ya que encontraron que el vidrio pulverizado y la pasta del hormigón reciclado lograban producir gel que aglutina o pega todos los componentes del hormigón, mejorando la micro estructura de la matriz del hormigón.

La mayoría de los estudios realizados [7] - [8] coinciden que la mayor preocupación en la utilización del vidrio triturado o pulverizado en hormigón es el potencial desarrollo de ASR. También coinciden que el vidrio contiene propiedades puzolánicas que aportan a mejorar la micro estructura de la matriz del hormigón, mejorando la durabilidad y la resistencia a la compresión del hormigón. También la utilización de vidrio pulverizado como reemplazo de cemento ayuda a la reducción de emisiones de CO₂, además de aliviar la carga de los rellenos sanitarios en el entorno.

OBJETIVOS

Para este proyecto se establecieron los siguientes objetivos:

- Demostrar que el vidrio de botella, luego de un proceso de trituración a nivel industrial simple, puede utilizarse como parte del agregado fino en una mezcla de hormigón.
- Observar las diferencias en las resistencias de los hormigones al utilizar porcentajes de vidrio reciclado triturado a los utilizados por Santiago Nieves [1].
- Observar el comportamiento en términos de resistencias a la compresión y permeabilidad a iones de cloruro, con la utilización de un cemento Portland Tipo IS adicionado con 15% de escoria de alto horno ("slag"), disponible en Puerto Rico, diferente del Cemento Portland Tipo I producido en Puerto Rico.

- Realizar pruebas adicionales como peso unitario y resistencia a permeabilidad de iones de cloruro.

METODOLOGÍA

Se estableció el procedimiento de recolección de botellas de la manera más práctica, sin ningún tipo de clasificación por colores, tamaños o formas, procedentes de los desperdicios de varios comercios. Luego, las botellas recopiladas fueron procesadas a nivel industrial en una cantera de procesamiento de agregados, donde se recuperó solo la porción clasificada como agregado fino o arena pasando el tamiz # 4. Se le realizaron pruebas de gradación de acuerdo al ASTM Standard C136-01. En la Tabla 1 se muestran los resultados de gradación obtenidos. En la Figura 2 se muestran los tamices utilizados con el material retenido en cada uno de ellos y en la Figura 3 se muestra la gráfica de granulometría del vidrio triturado, en esta grafica se pudo observar que el 0.29% de las partículas es mayor de 4.75mm, el 50.18% de las partículas es mayor de 2.36mm, el 34.62 de las partículas es mayor de 1.18mm, el restante 14.90% se distribuye entre 0.70mm a .075mm y el pan. Si comparamos estos resultados con el rango requerido por el ASTM Standard C-33 para una arena utilizada para hormigones, coloca al vidrio en la zona gruesa.

Se realizó el procedimiento para obtener la gravedad específica de acuerdo al ASTM Standard D 854-10. En la Figura 4 se muestra parte del procedimiento. También se realizó la prueba para determinar la absorción del vidrio de acuerdo al ASTM C128-01. En la Figura 5 se muestra parte del procedimiento de la prueba.



Figura 2
Material Retenido en los Tamices

Tabla 1
Resultados Granulometría del Vidrio

No. Tamiz	Peso Retenido	% Retenido	% Acumulado Retenido	% Pasando
3/8	0	0.00%	0.00%	100%
4	1.46	0.29%	0.29%	99.71%
8	250.92	50.18%	50.48%	49.52%
16	173.11	34.62%	85.10%	14.9%
30	38	7.60%	92.70%	7.30%
50	20.67	4.13%	96.83%	3.17%
100	7.02	1.40%	98.24%	1.76%
200	2.28	0.46%	98.69%	1.31%
Pan	6.54	1.31%	99.54%	0%

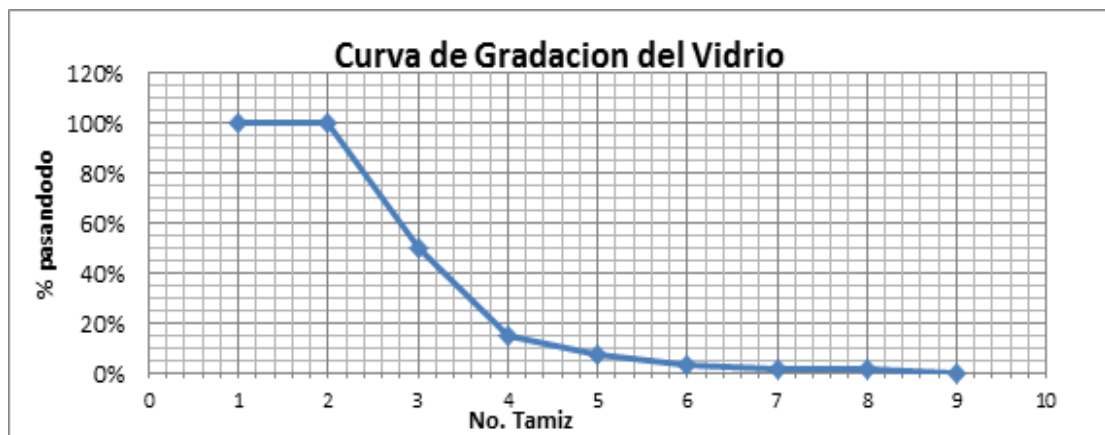


Figura 3
Granulometría del Vidrio Triturado

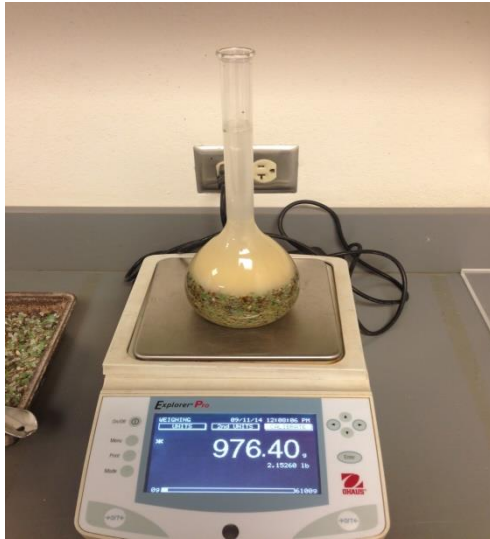


Figura 4
Prueba de Gravedad Especifica del Vidrio



Figura 5
Prueba Absorción del Vidrio

Diseño de Mezclas

Para este proyecto se diseñaron 12 mezclas de hormigón en total, con relaciones agua cemento de 0.30, 0.50, y 0.70. Se prepararon tres mezclas control con relaciones agua cemento de 0.30, 0.50 y 0.70, también se prepararon nueve mezclas de hormigón para cada relación agua cemento

utilizando 8%, 16% y 25% de vidrio reciclado en sustitución de agregado fino, respectivamente. En la Tabla 2 se desglosan las características de las mezclas de hormigón utilizadas.

Tabla 2
Características de las Mezclas de Hormigón

Relación Agua Cemento W/C	% de sustitución de vidrio	Descripción
0.30	0	Control
0.50	0	Control
0.70	0	Control
0.30	8%	Prueba
0.50	8%	Prueba
0.70	8%	Prueba
0.30	16%	Prueba
0.50	16%	Prueba
0.70	16%	Prueba
0.30	25%	Prueba
0.50	25%	Prueba
0.70	25%	Prueba

El cemento utilizado para las muestras fue Portland Adicionado Tipo IS, regido por el ASTM Standard C 595. El agregado fino utilizado fue de procedencia caliza y el agregado grueso de procedencia basáltica. El agua utilizada fue potable del sistema público de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de PR. También se utilizaron los aditivos Polyheed 897, que es un retardador y reductor de agua de mediano rango, y Glenium 3030, que es un reductor de agua de alto rango, ambos de la casa BASF Construction Chemicals. Las gravedades específicas y las absorciones de los materiales se pueden observar en la Tabla 3; estas fueron determinadas mediante pruebas de laboratorio de acuerdo al ASTM C-128 y la del cemento provista por el fabricante, CEMEX Puerto Rico. La absorción de los materiales fue

determinada de acuerdo a ASTM Standard C-117. Se determinó la humedad de los agregados de acuerdo al ASTM Standard C 566/566M-12. En la Tabla 3 también se muestra el porcentaje de humedad de los materiales utilizados para las mezclas de hormigón.

Tabla 3
Propiedades de los Materiales Utilizados en las Mezclas

Material	Gravedad Específica	Absorción (%)	Humedad (%)
Agua	1.00	N/A	N/A
Cemento	3.02	N/A	N/A
Agregado Grueso	2.72	4.30	2.70
Agregado Fino	2.52	1.00	4.84
Vidrio	2.51	0.00	0.00

Se prepararon las mezclas de hormigón de 1.60 pies cúbicos cada una utilizando una mezcladora de tambor de acuerdo con el ASTM Standard C 192/C 192M – 02. Se le practicaron también pruebas en su estado plástico de:

- Temperatura, de acuerdo al ASTM Standard 1064/C 1064M-012.
- Asentamiento, de acuerdo al ASTM Standard C 143/C 143M-12. Peso unitario de acuerdo al ASTM C 138/C 138M-12. Se prepararon 10 cilindros de 4” de diámetro y 8” de alto para cada mezcla según el ASTM Standard C 192/C 192M – 02.

Luego realizaron las siguientes pruebas en su estado endurecido:

- Ensayos para determinar resistencias a la compresión en libras por pulgada cuadrada (psi) a los 3, 7, y 28 días, según el ASTM Standard C39/C39M-01.
- Permeabilidad, de acuerdo al ASTM Standard C-1202, donde se determinó la resistencia a la penetración de iones de cloruro en colombos, luego de someter las muestras a un proceso de curado acelerado de acuerdo al ASTM Standard C 918/C 918M-13.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los hormigones en su estado fresco se muestran en la Tabla 4, durante el proceso de preparación de las mezclas de pruebas se pudo notar que, a medida que se aumentaba el porcentaje de sustitución de vidrio por arena o agregado fino, hubo una reducción en la demanda de agua de las mezclas. También se pudo observar un aumento en el peso unitario de las mezclas. Aunque se muestran unos resultados de asentamientos diferentes o erráticos, la diferencia es a consecuencia de la reducción en demanda de agua de las mezclas a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución del vidrio.

Tabla 4
Resultados de Hormigón en su Estado Plástico

Mezcla	Asentamiento (in)	Temperatura (F°)	Peso Unitario (lb/ft ³)
W/C=0.30 Control	8	88.5	147.68
W/C=0.50 Control	8	91.9	147.36
W/C=0.70 Control	7.5	91.9	146.32
<hr/>			
W/C=0.30 8% Vidrio	8	89.7	146.84
W/C=0.50 8% Vidrio	8.75	90.0	146.48
W/C=0.70 8% Vidrio	8	91.0	145.68
<hr/>			
W/C=0.30 16% Vidrio	10.25	88.5	148.16
W/C=0.50 16% Vidrio	7.5	88.5	146.24
W/C=0.70 16% Vidrio	5	84.50	145.92
<hr/>			
W/C=0.30 25% Vidrio	10.75	86	150.16
W/C=0.50 25% Vidrio	7.5	85	146.08
W/C=0.50 25% Vidrio	4	83.4	144.84

En la Tabla 5 se presentan los resultados de resistencia a la compresión de las 12 mezclas de pruebas realizadas. En la Figura 6 se muestra una comparación de los resultados de las resistencias a la compresión vs. el porcentaje de vidrio para cada mezcla donde claramente se pudo observar una tendencia, a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de vidrio reciclado triturado por arena, las resistencias a la compresión del hormigón aumentaron en comparación con los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas de prueba control. Esto puede atribuirse al aporte de las características puzolánicas que posee el vidrio pulverizado en combinación con la cal libre del cemento redundando en la formación del “gel” que aglutina o pega las partículas en el hormigón [6].

También, el tener menos demanda de agua y una matriz de hormigón más densa, contribuyen al desarrollo de resistencias a la compresión más altas. En la Figura 7 se muestra la evolución de resistencias para cada una de las mezclas con respecto al tiempo donde se puede notar la tendencia al aumento en resistencias.

También se puede observar que a menor relación agua cemento se amplía el diferencial en resistencias a la compresión y, en las mezclas de menor relación agua cemento, se reduce ese margen. Tampoco existe un margen muy amplio en términos de resistencias entre el 16% y el 25% de sustitución de vidrio por agregado fino en las mezclas.

Tabla 5
Resultados Pruebas de Compresión

Mezcla	Resistencia en Compresión (psi)		
	3 días	7 días	28 días
W/C=0.30	7,517	8,085	10,140
Control	7591	8,290	10,141
		7,930	10,770
F'c Promedio	7,554	8,102	10,350
W/C=0.50	3,467	4,195	5,714
Control	3,634	3,955	5,625
		4,320	5,711
F'c Promedio	3,551	4,157	5,683
W/C=0.70	1,767	1,870	2,806
Control	1,662	1,755	2,806
		1,870	2,934
F'c Promedio	1,715	1,832	2,849

Mezcla	Resistencia en Compresión (psi)		
	3 días	7 días	28 días
W/C=0.30	8,775	10,375	12,112
16% Vidrio	8,909	10,410	12,126
		10,705	11,585
F'c Promedio	8,842	10,497	12,074
W/C=0.50	4,773	5,640	6,626
16% Vidrio	4,728	4,665	6,667
		5,355	6,667
F'c Promedio	4,751	5,220	6,653
W/C=0.70	2,623	2,870	4,057
16% Vidrio	2,628	2,955	4,148
		2,795	4,037
F'c Promedio	2,626	2,873	4,081

Mezcla	Resistencia en Compresión (psi)		
	3 días	7 días	28 días
W/C=0.30	7,547	7,775	10,010
8% Vidrio	7,465	7,710	10,121
		7,745	10,498
F'c Promedio	7,506	7,743	10,210
W/C=0.50	3,845	4,190	5,161
8% Vidrio	3,935	4,205	5,363
		4,185	5,272
F'c Promedio	3,890	4,193	5,265
W/C=0.70	2,273	2,275	3,273
8% Vidrio	2,153	2,215	3,201
		2,380	3,093
F'c Promedio	2,213	2,290	3,189

Mezcla	Resistencia en Compresión (psi)		
	3 días	7 días	28 días
W/C=0.30	9,124	9,560	12,781
25% Vidrio	8,652	10,350	12,673
		10,200	12,371
F'c	8,888	10,037	12,608
W/C=0.50	4,667	4,950	7,001
25% Vidrio	4,554	5,105	6,824
		5,250	7,295
F'c Promedio	4,611	5,102	7,040
W/C=0.70	2,615	3,185	4,079
25% Vidrio	2,806	2,930	4,200
		3,100	4,089
F'c Promedio	2,711	3,072	4,123

En la Figura 8 se puede observar una curva de tres puntos para cada una de las mezclas para cada porcentaje de sustitución de vidrio por agregado fino. Estas curvas sirven como herramienta para estimar las resistencias a la compresión del hormigón a diferentes porcentajes y relaciones agua cemento.

En la Tabla 6 se muestran los resultados de las pruebas de resistencia a la penetración de iones de cloruro (Permeabilidad) realizadas a las muestras con relación agua cemento de 0.30. Se pudo observar que la sustitución de vidrio en porcentajes menores de 8% no implican una diferencia significativa en los resultados de permeabilidad, sin embargo a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de vidrio por agregado fino hubo un aumento en los resultados de permeabilidad de iones de cloruro, lo que indica que hubo mayor paso de los iones a través de la matriz del hormigón. En la Figura 9 se puede observar la tendencia de los resultados a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de vidrio por agregado fino.

En estos resultados también se pudo observar que, con la utilización de un cemento adicionado con escoria de al horno en un 15% (“slag”), se obtuvieron hormigones con muy baja permeabilidad.

Tabla 6
Resultados Pruebas de Permeabilidad

Sustitución de vidrio (%)	Resistencias a Permeabilidad (Culombs)
0	397
8	397
16	905
25	1136

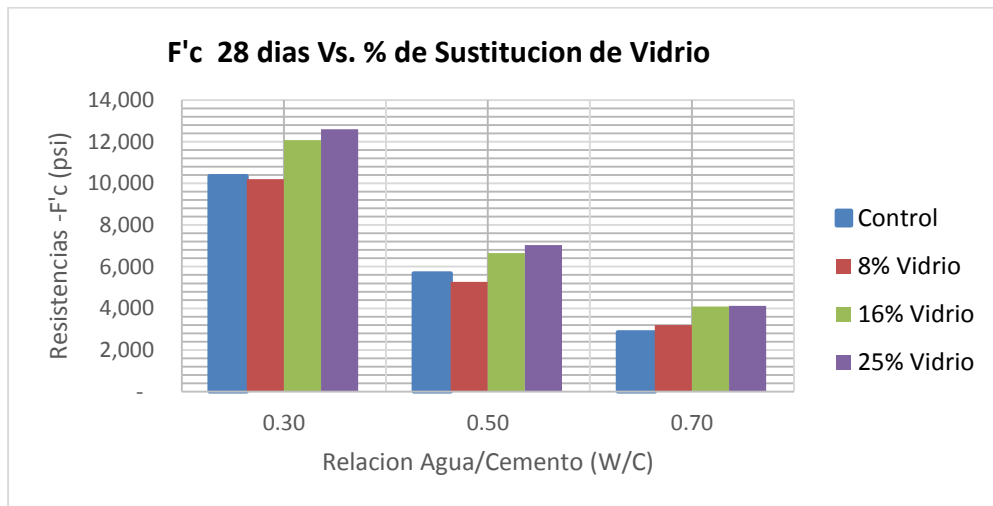


Figura 6
Gráfica de Barras de Resistencias vs. % de Sustitución de Vidrio

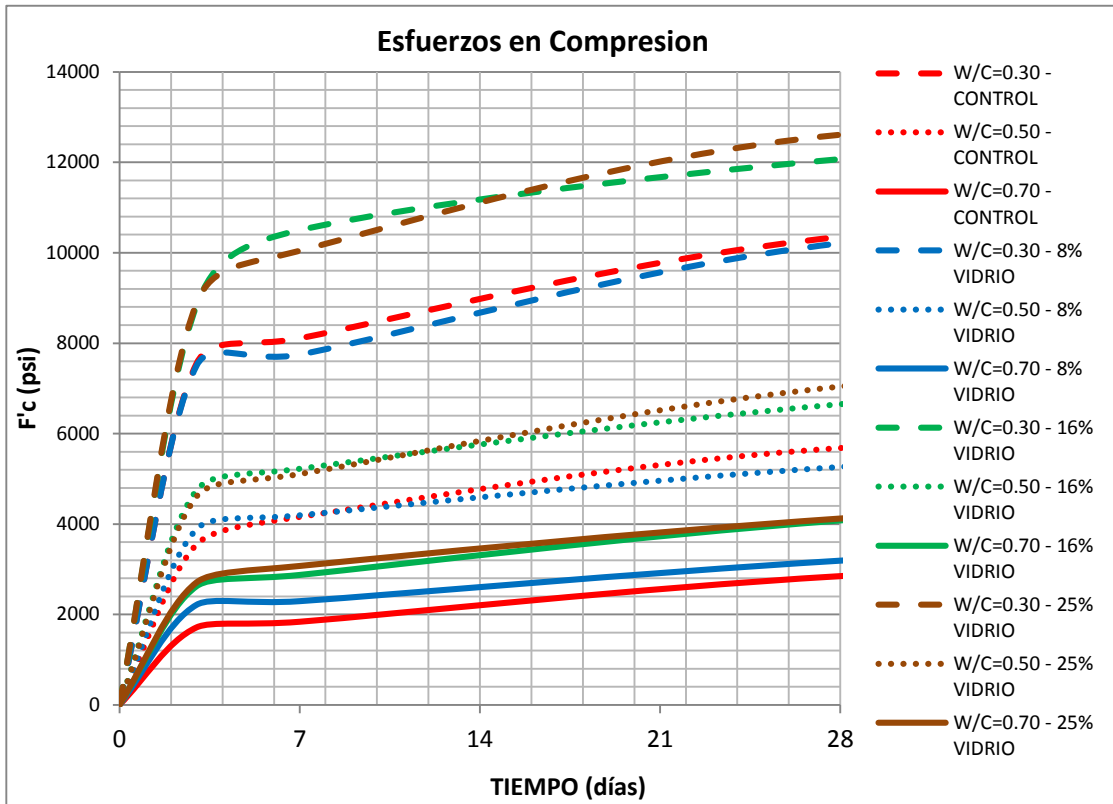


Figura 7
Gráfica de Resistencias en Compresión (psi) vs. Tiempo (días)

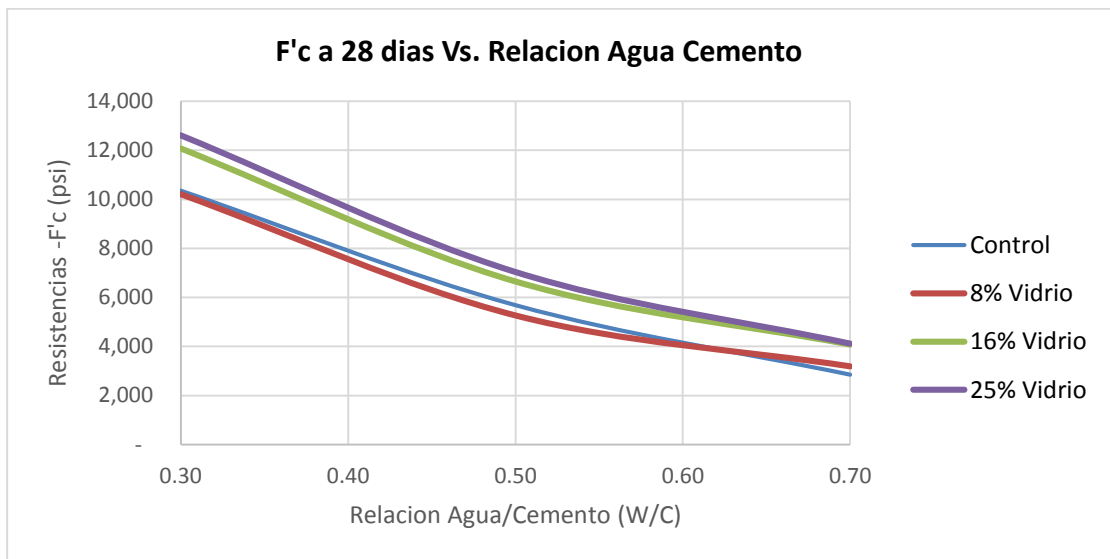


Figura 8
Curva de Resistencias vs. Relación Agua Cemento

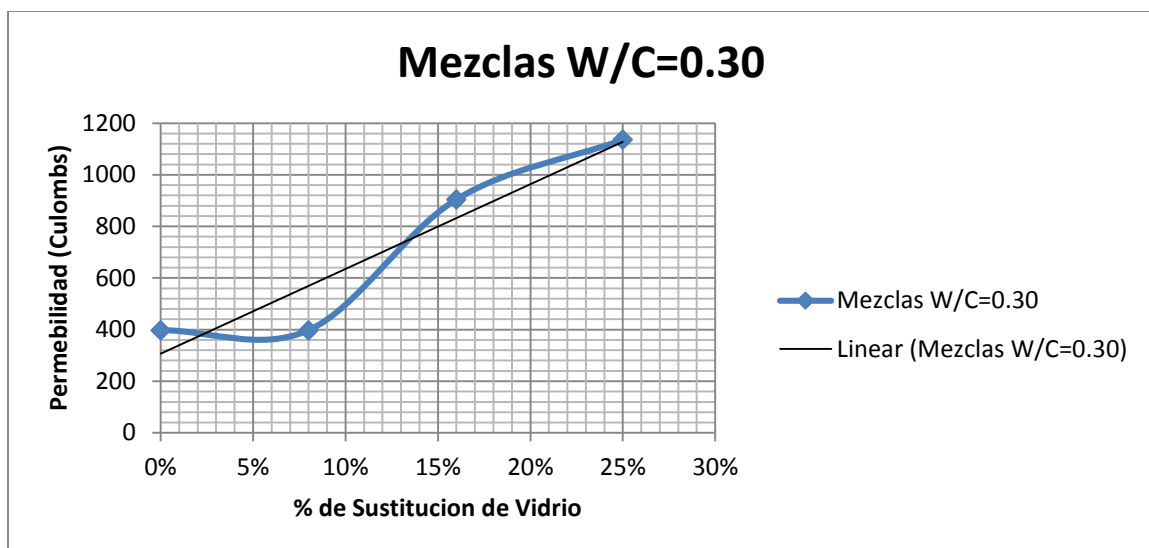


Figura 9
Gráfica de Resistencias a la Permeabilidad vs. Porcentaje de Sustitución de Vidrio

CONCLUSIÓN

Con los resultados obtenidos se concluye que las botellas pueden ser procesadas en una cantera de agregados convencionales para obtener vidrio triturado. Luego, el vidrio triturado puede ser utilizado en la producción de hormigones.

Los resultados de resistencias a la compresión demostraron un aumento significativo en las resistencias a la compresión de los hormigones, aun cuando se utilizó un cemento Tipo IS. Este aumento en resistencia es atribuible a la combinación de las propiedades puzolánicas que posee el vidrio pulverizado y la cal libre del cemento redundando en la formación del “Gel” o pegamento que aglutinan todos los componentes en una mezcla de hormigones. Estos resultados muestran que no hay un efecto negativo en la evolución de resistencias de los hormigones a temprana edad; tampoco en los resultados a los 28 días.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la penetración de iones de cloruro realizadas a las muestras con relación agua cemento de 0.30 demostraron que la sustitución de vidrio en porcentajes menores de 8% no implican una diferencia significativa en los resultados de permeabilidad. Sin embargo, a medida que aumenta

el porcentaje de sustitución de vidrio, hay una tendencia al aumento en los resultados de resistencia a la permeabilidad de iones de cloruro.

TRABAJOS FUTUROS

En este estudio se pudo demostrar que la adición de vidrio triturado en mezclas de hormigón es viable, trayendo beneficios significativos a los hormigones así como al ambiente, contribuyendo al reúso, y reducción del volumen de botellas de vidrio que se depositan en los rellenos sanitarios de Puerto Rico.

Los posibles trabajos futuros se pueden realizar las siguientes pruebas:

- Observar la estabilidad dimensional de los hormigones a largo plazo.
- Observar si pudiera ocurrir reacción “Alkali-Silica” o ASR.
- Realizar análisis petrográficos para observar la matriz de los hormigones y si existe la creación de la estrigita.
- Realizar pruebas de modulo de rotura o resistencia a flexión de los hormigones.
- Realizar pruebas con vidrio pulverizado en sustitución de cemento.

REFERENCIAS

- [1] Santiago L. E. & Cruzado H. J. "Diseño de Mezcla de Hormigón Utilizando Vidrio Reciclado de Botella como Parte del Agregado Fino", *Proyecto de Maestría*, Universidad Politécnica, San Juan, PR, Rep. 2013.
- [2] Tung-Chai L., Chi-Sun P. & Hau-Wing W. "Management and Recycling of Waste Glass in Concrete Products: Current Situation Hong Kong", *Resources, Conservation and Recycling* 70, 2013, pp. 25–31. Retrieved from: Elsevier B.V.
- [3] Liang H., Zhu H. & Byars E. A., "Use of Waste Glass as Aggregate in Concrete" In Proc. 7th Annu. UK Care Conf., *UK Chinese Association of Resources and Environment*, Greenwich, 2007, pp. 1–7.
- [4] Shayan A., "Value-added Utilization of Waste Glass in Concrete", *IABSE Symposium Melbourne*, 2002.
- [5] Shayan A. & Xu A., "Performance of Glass Powder as a Pozzolanic Material in Concrete: A Field Trial on Concrete Slabs", *Cement and Concrete Research* 36, 2006, pp. 457–468. Retrieved from: Elsevier B.V.
- [6] Roz-Ud-Din N. & Parviz S., "Strength and Durability of Recycled Aggregate Concrete Containing Milled Glass as Partial Replacement for Cement", *Construction and Building Materials* 29, 2012, pp. 368–377. Retrieve from: Elsevier B.V.
- [7] Degirmenci N., Yilmaz A. & Cakir O. A., "Utilization of Waste Glass as Sand Replacement in Cement Mortar", *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 18, August, 2011, pp. 303–308.
- [8] Bajad M. N., Modhera C. D. & Desai A. K., "Factors Affecting the Properties of Conglasscrete", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334x, vol. 11, Issue 2 Ver. IV, Mar-Apr., 2014, pp. 43–48.