

## ***Diseño de mezcla de hormigón utilizando vidrio reciclado de botella como parte del agregado fino***

Luis E. Santiago Nieves, BSCE  
Maestría en Ingeniería Civil  
Prof. Héctor Cruzado Vélez, PhD  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Universidad Politécnica de Puerto Rico

**Resumen** — Desde el 2009 no existe un plan de reciclaje de vidrio en Puerto Rico. Es por esto que se desea encontrar otro uso a este material para que no termine en los vertederos. Este proyecto consiste en el diseño de 3 mezclas de hormigón de 3,000 psi utilizando 10%, 20% y 30% de vidrio como parte del agregado fino. También se diseñó una mezcla control para comparar los resultados. Se prepararon 9 cilindros para cada mezcla y se rompieron a los 7, 14 y 28 días. En adición a las mezclas se realizaron las pruebas de granulometría, gravedad específica y absorción al vidrio para comparar las mismas con las de la arena. Los resultados muestran que este material se puede utilizar satisfactoriamente como parte del agregado fino en una mezcla de hormigón siempre y cuando sea 20% o menos.

**Palabras claves** — absorción, granulometría, gravedad específica, picnómetro.

### **INTRODUCCIÓN**

La disposición de botellas de vidrio representa un gran problema para los municipios ya que desde el 2009 no existe un plan para reciclar los mismos. Una alternativa para resolver este problema es utilizando el vidrio de botella como parte del agregado fino en una mezcla de hormigón. El uso del vidrio como material de construcción es una de las opciones más atractivas debido al volumen de material envuelto, el no tener que clasificar este material por colores y las diferentes aplicaciones de construcción que permiten pequeñas variaciones en su composición y forma.

Para este proyecto se diseñaron 3 mezclas de hormigón de 3,000 psi utilizando 10%, 20% y 30% de vidrio como parte del volumen del agregado

fino. Además, se preparó una mezcla control para comparar los resultados. En adición a las mezclas, se realizaron las pruebas de granulometría, gravedad específica y absorción al vidrio para comparar las mismas con las de la arena. La Figura 1 muestra el tipo de botellas de vidrio utilizadas para este proyecto.



**Figura 1**  
**Material a ser reciclado**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

Algunos estudios [1] - [2], se han realizado para examinar la posibilidad de reusar el vidrio en la industria de la construcción como una alternativa para reducir la cantidad de desperdicio y establecer las bases para entender el comportamiento del mismo, además de crear un precedente para realizar futura investigación sobre este asunto. Estos estudios se concentran en la reacción alkali-silica (ASR) en el hormigón y las diferentes maneras de mitigarlo, como por ejemplo utilizando cemento bajo en alkali, “flyash”, nitrato de litio y otros. El producto del ASR es un gel que tiene la característica de absorber agua y aumentar en volumen, esto causa que el hormigón se expanda y

se agriete. Este problema es uno que se manifiesta e incrementa con el tiempo por lo que estos experimentos requirieron años de investigación.

También estos estudios experimentan con otros porcentos de vidrio, no solo como parte del agregado fino sino también como parte del agregado grueso y del cemento. Se encontró que el vidrio no funciona como parte del agregado grueso ni cuando se utiliza más del 50% como parte del agregado fino. En cuanto a utilizar el vidrio como parte del cemento, los estudios demostraron que hubo una disminución en la resistencia de las mezclas.

### OBJETIVOS

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Reducir la cantidad de desperdicios sólidos al utilizar vidrio como parte del agregado fino.
- Demostrar que el vidrio de botella puede utilizarse como parte del agregado fino en una mezcla de hormigón.
- Observar la diferencia en la resistencia del hormigón al utilizar diferentes porcentos de vidrio como parte del agregado fino.
- Medir algunas propiedades del vidrio tales como absorción y gravedad específica.
- Establecer las bases para futuras investigaciones.

### METODOLOGÍA

Se recopilaron botellas de vidrio de 3 colores distintos: transparente, verde y ámbar. Estas botellas fueron limpiadas para poder remover de estas plástico, papel, azúcares y otros contaminantes químicos que puedan afectar la mezcla. Luego se rompieron y granularon manualmente para ser utilizadas en el laboratorio. Ya en el laboratorio lo primero que se hizo fue realizar la prueba de granulometría del vidrio de acuerdo al ASTM Standard C 136-01 [3]. Sólo se usó el material acumulado entre los tamices #4 y #100. El material que paso el tamiz #100 fue

descartado por ser uno muy fino y el material retenido en el tamiz #4 por ser uno muy grueso. En la Figura 2 se pueden ver las partículas del material retenido en el tamiz #50. Los porcentos de material retenido en los tamices pueden observarse en la Tabla 1. La Figura 3 muestra la gráfica de distribución de tamaños de partículas donde se puede observar una distribución uniforme del material.



**Figura 2**  
Material retenido en el tamiz #50

**Tabla 1**  
Resultados granulometría del vidrio

Tamiz	W Acumulado	% Acumulado
3	0.00	0.00%
4	0.004	0.38%
8	0.496	44.97%
16	0.809	73.39%
30	0.96	87.22%
50	1.055	95.66%
100	1.100	99.76%
200	1.102	99.94%
Pan	1.103	100.00%

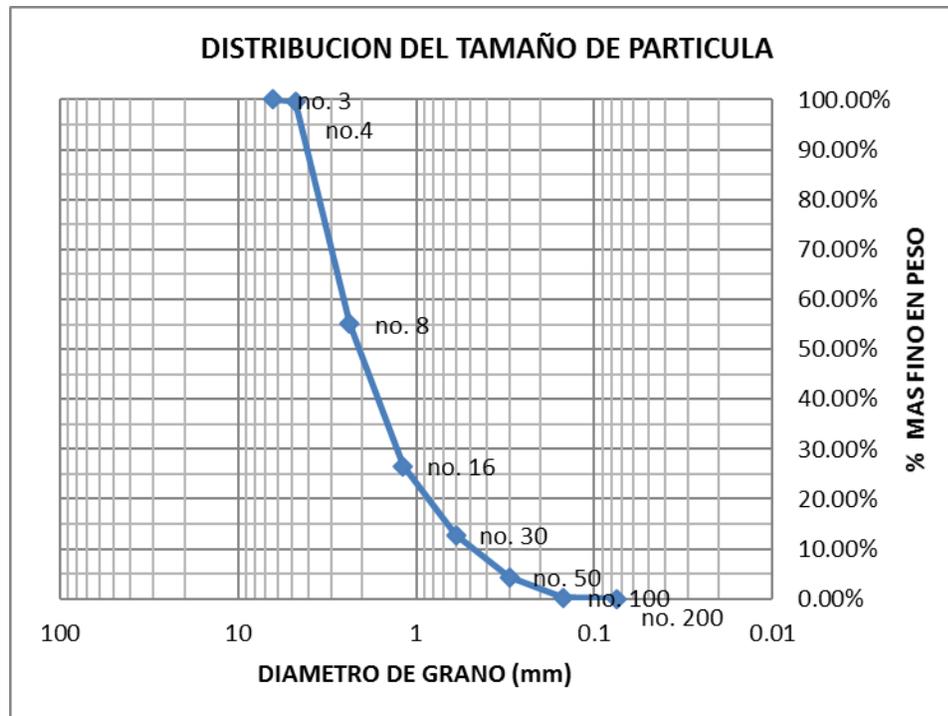


Figura 3  
Granulometría del material

El módulo de fineza es un factor empírico que se obtiene de la suma de los pesos acumulados de agregado fino en los tamices no. 4, no. 8, no. 16, no. 30, no. 50, no. 100 y dividiendo la suma por 100, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Módulo De Fineza} = \frac{\Sigma \% \text{ Acumulado}}{100} \quad (1)$$

Se obtuvo un módulo de fineza de 4.01% para el vidrio.

La gravedad específica del vidrio se obtuvo según el ASTM Standard D 854 – 10 [4], utilizando la siguiente ecuación:

$$SG = \frac{PDRY}{(PW + PSSD - PWV)} \quad (2)$$

donde:

SG = gravedad específica

PDRY = Peso vidrio seco

PW = Peso picnómetro con agua

PSSD = Peso vidrio “Saturated Surface Dry”

PWV = Peso del vidrio y agua

La gravedad específica fue de 2.44. En la Figura 4 se puede observar el picnómetro utilizado en esta prueba.

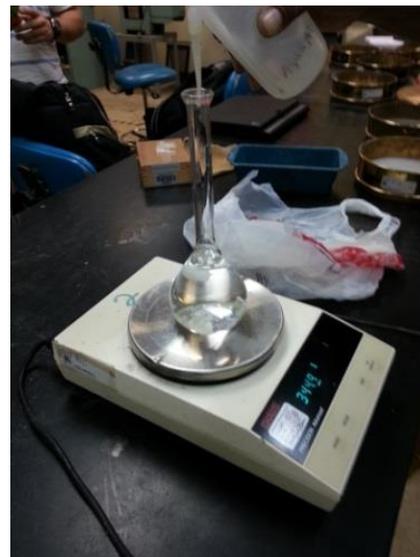


Figura 4  
Prueba de gravedad específica del vidrio

La prueba de absorción se llevó a cabo siguiendo el ASTM Standard C 128-01[5]. Se

calculó la absorción de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ABS = \frac{PSSD - PDRY}{PDRY} \quad (3)$$

donde :

ABS = porciento de absorción

PDRY = Peso seco

PSSD = Peso “Saturated Surface Dry”

La absorción obtenida para el vidrio fue de 1.28%.

### Diseño de Mezclas

Se preparó una mezcla control para resistencia en compresión de 3,000 psi utilizando las siguientes propiedades:

- Razón agua/cemento = 0.58
- Relación Cemento:arena:piedra = 1:2.45:2.67
- Absorción de la arena = 6.00%
- Absorción de la piedra = 0.80%

El cemento utilizado para las muestras fue Portland Tipo I. Las gravedades específicas y las proporciones de la mezcla control se pueden observar en la Tabla 2; estas fueron provistas por el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

**Tabla 2**  
Proporciones de la mezcla control

	Gravedad Específica	Densidad (lb/ft <sup>3</sup> )	Volumen (ft <sup>3</sup> )
Agua	1.00	62.20	0.21
Cemento	3.14	195.31	0.11
Agregado Grueso	2.69	167.32	0.35
Agregado Fino	2.65	164.83	0.33

La sustitución del agregado fino por vidrio se hizo en base al volumen de este. La Tabla 3 muestra los pesos y volúmenes de vidrio por pie cúbico utilizados.

**Tabla 3**

Proporciones del vidrio para 1 pie cubico de hormigón

Mezcla	Peso (lb)	Volumen (ft <sup>3</sup> )
10%	5.00	0.03
20%	10.01	0.07
30%	15.01	0.10

La preparación del hormigón para las muestras se llevó a cabo utilizando una mezcladora de tambor. Cada mezcla fue de 0.5 pies cúbicos según el ASTM Standard C 192/C 192M – 02 [6]. Se prepararon 9 cilindros de 4” de diámetro y 8” de alto para cada mezcla según el ASTM Standard C 192/C 192M – 02 [7]. Se rompieron 3 cilindros por mezcla a los 7, 14 y 28 días según el ASTM Standard C39/C39M-01 [8].

### RESULTADOS

La Figura 5 muestra la prueba del asentamiento (“slump”) realizada a la muestra control, mientras que la Tabla 4 muestra los resultados de la prueba de asentamiento y la temperatura de fraguado de cada una de las muestras preparadas. Se puede observar que el asentamiento aumenta según el porcentaje de vidrio en la mezcla, esto se debe a la poca absorción que tiene este material.



**Figura 5**  
Prueba de asentamiento realizada a la muestra control

**Tabla 4**  
**Resultados asentamiento en las mezclas**

	Asentamiento (in)	Temperatura (F)
Mezcla Control	1.5	82.4
Mezcla 10%	1.5	82.4
Mezcla 20%	2.25	82.0
Mezcla 30%	3.0	82.0

Los resultados de la pruebas de compresión se pueden observar en la Tabla 5. En dicha tabla se indican con asterisco los resultados de la resistencia de algunas de las muestras que contenían 20% y 30% que quedaron muy por debajo en comparación con las demás muestras, por lo que estos resultados fueron descartados. Moldes manchados y con sustancias perjudiciales pudieron haber sido la causa de la baja resistencia.

**Tabla 5**  
**Resultados pruebas de compresión**

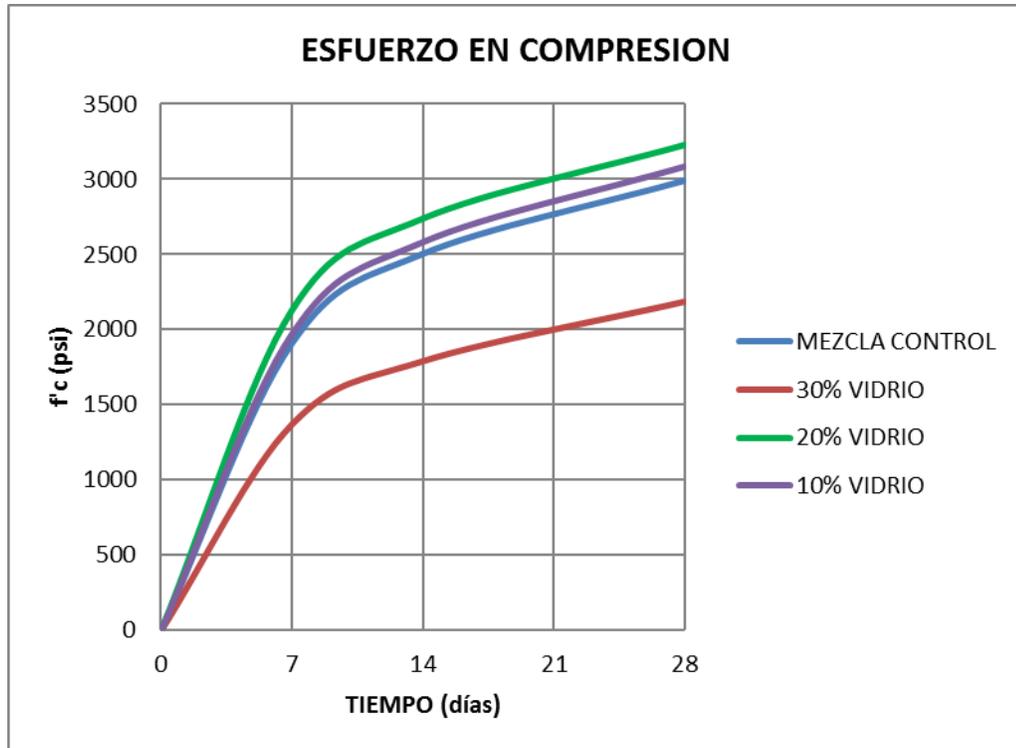
	Resistencia en Compresión (psi)		
	7 días	14 días	28 días
Mezcla Control	1913	2449	2955
	1916	2560	3043
	1906	2507	2980
Mezcla 10%	1971	2523	3044
	1973	2637	3134
	1963	2582	3069
Mezcla 20%	2030	2655	3156
	2229	2823	3302
	1638*	2740	2686*
Mezcla 30%	1293	1693	2051
	1445	1886	2317
	830*	1228*	2280

Los resultados de las pruebas de compresión que no fueron descartados fueron promediados en la Tabla 6 y graficados en la Figura 6. Se puede observar que la resistencia en compresión en las mezclas que contenían 10% y 20% de vidrio fueron superiores a la mezcla control. Estas mezclas sobrepasaron la resistencia de diseño, sin embargo se encontró que la mezcla de 30% vidrio no cumplió con la resistencia de diseño.

**Tabla 6**  
**Promedios de los resultados de las pruebas de compresión**

	Resistencia en Compresión (psi)		
	7 días	14 días	28 días
Mezcla Control	1912	2505	2993
Mezcla 10%	1969	2581	3082
Mezcla 20%	2130	2739	3229
Mezcla 30%	1369	1789	2216

En la Figura 7 se pueden observar las partículas de vidrio en un cilindro. Las fallas en compresión para las muestras fueron diversas. Según la clasificación de ASTM [8], se observaron desde fallas Tipo II (Cono bien formado en un extremo con grietas verticales en el otro extremo) hasta fallas Tipo IV (Fractura diagonal). En la Figura 8 se puede observar una falla Tipo II para la mezcla que contenía 10% de vidrio. La Figura 9 muestra la falla Tipo IV de la mezcla que contenía 30% de vidrio. En esta mezcla se pudo observar al romper estos cilindros que no había una unión entre el cemento y los agregados. Esto podría ser causa de varios factores tales como una razón agua/cemento más alta debido a la poca absorción del vidrio, una poca resistencia en cortante por la segregación de la mezcla, etc.



**Figura 6**  
Gráfica de resistencia en compresión



**Figura 7**  
Cilindro con partículas de vidrio



**Figura 8**  
Falla en compresión Tipo II, muestra 10% vidrio



**Figura 9**

**Falla en compresión Tipo IV, mezcla 30% vidrio**

## CONCLUSIÓN

El potencial de utilizar vidrio reciclado de botella como parte del agregado fino en una mezcla de hormigón ha sido investigado en este estudio. Se pudo demostrar que este material puede utilizarse satisfactoriamente en las mezclas que contenían 10% y 20% de vidrio. Incluso, la resistencia obtenida fue superior a la de la mezcla control. La mezcla que utilizaba 30% de vidrio no obtuvo los resultados esperados. Se pudo observar que las muestras carecían de cohesión entre el agregado y el cemento. No obstante no se puede concluir que el vidrio es insatisfactorio utilizando 30% ya que se han realizado otros estudios con resultados diferentes [1] – [2]. Es por esto que se recomienda más adelante volver a repetir esta prueba.

En cuanto a las propiedades del vidrio en comparación con la arena se encontró que este posee una gravedad específica y un porcentaje de absorción menor. La gravedad específica del vidrio fue de 2.44, lo que es 0.21 menos que la de la arena utilizada la cual tenía una gravedad específica de 2.65. En el caso de la absorción esta fue de 1.28 % vs. 6.00%, para un 4.72% menos que la arena.

## TRABAJOS FUTUROS

El potencial de utilizar vidrio como una fuente de agregado para el hormigón ha sido demostrado en este estudio pero más investigación debe llevarse a cabo. Entre los posibles trabajos futuros a realizarse se encuentran los siguientes:

- Repetir la prueba de compresión utilizando 30% de vidrio y reducir la cantidad de agua en la mezcla debido a la poca absorción del vidrio.
- Utilizar otros porcentajes de vidrio en las mezclas.
- Experimentar con otros diseños de mezcla y aditivos tales como “fly ash” para estudiar sus consecuencias.
- Monitorear la posible expansión del hormigón a largo plazo debido al ASR y las maneras de mitigar este problema.
- Realizar pruebas estructurales con vigas para observar el comportamiento real de las mezclas.

## REFERENCIAS

- [1] Bashar Taha, Ph.D., Ghassan Nounu, Ph.D. (December 2009) Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 21, Núm. 12, pp. 709-721.
- [2] Craig Polley, Steven M. Cramer, Rodolfo V. de la Cruz. (November 1998) Potential for Using Waste Glass in Portland Cement Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 10, Núm. 4, pp. 210-219.
- [3] ASTM STANDARD C 136 – 06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Course Aggregates, pp. 1-5.
- [4] ASTM STANDARD D 854 - 02 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, pp. 1-7.
- [5] ASTM STANDARD C 128-01 Standard Test Method for Density, Relative Density and Absorption of Fine Aggregates, pp. 1-6.
- [6] ASTM STANDARD C 143/C 143M – 00 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, pp. 1-3.
- [7] ASTM STANDARD C 192/C 192M – 02 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, pp. 1-8.

- [8] ASTM STANDARD C 39/C 39M – 01 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, pp. 1-5.