

Evaluación del concreto con vidrio reciclado molido como reemplazo parcial del agregado fino

Evaluation of concrete with ground recycled glass as partial replacement of fine aggregate

Randall Matos¹, Rene Villarreal¹, Ka Lai Ng Puga^{1,2*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

²Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Experimental de Ingeniería, Laboratorio de Ensayo de Materiales, Panamá.

*Autor de correspondencia: kalai.ng@utp.ac.pa

RESUMEN. El objetivo de esta investigación fue de evaluar si se puede obtener una mejora en la resistencia a compresión y flexión al sustituir un porcentaje del agregado fino de una mezcla de concreto por vidrio reciclado molido. La metodología utilizada consistió en la realización de un diseño de mezcla patrón de concreto convencional de $f'c=28$ MPa y su comparación con dos mezclas con el mismo diseño, pero con 10% y 15% de reemplazo del peso del agregado fino por vidrio reciclado molido. Tomando como base las normas técnicas de la ASTM, se confeccionaron un total de 75 cilindros de concreto para evaluar las resistencias a compresión a edades de ensayo de 3, 7, 14, 21 y 28 días; y un total de 18 viguetas para evaluar las resistencias a flexión a edades de ensayo 3, 14 y 28 días. Para cada edad de ensayo, tanto a compresión como a flexión, hubo un incremento de resistencia en las mezclas con 10% de vidrio como reemplazo del agregado fino comparado con la mezcla de concreto patrón; sin embargo, este incremento no fue significativo para las resistencias a flexión. Las mezclas con 15% de vidrio como reemplazo del agregado fino presentaron resistencias menores a las de la mezcla de concreto patrón. Se llega a la conclusión que, el porcentaje de reemplazo ideal para este estudio es del 10%; toda vez que el 15% afectó negativamente la resistencia del concreto.

Palabras clave. Concreto, vidrio molido, resistencia a compresión, resistencia a flexión, reciclaje.

ABSTRACT. The objective of this research is to evaluate whether an improvement in compressive and flexural strength can be obtained by substituting a percentage of the fine aggregate of a concrete mix with ground recycled glass. The methodology used consisted of making a conventional concrete mix as a control mix of $f'c=28$ MPa and its comparison with two mixes with the same design, but with 10% and 15% replacement of the weight of fine aggregate by ground recycled glass. Based on the ASTM technical standards, a total of 75 concrete cylinders were made to evaluate the compressive strength at test ages of 3, 7, 14, 21 and 28 days; and a total of 18 beams to evaluate the flexural resistance at test ages of 3, 14 and 28 days. For each test age, both in compression and in flexion, there was an increase in resistance in the mixes with 10% glass as a fine aggregate replacement compared to the control concrete mix; however, this increase was not significant for flexural strength. The mixes with 15% glass as a fine aggregate replacement presented lower resistances than those of the control concrete mix. It is concluded that the ideal replacement percentage for this study is 10%; since 15% negatively affected the resistance of the concrete.

Keywords. Concrete, ground glass, compressive strength, flexural strength, recycling.

1. Introducción

Ante los problemas actuales de mal manejo de diferentes desechos que afectan el ambiente y promoviendo la cultura del reciclaje, esta investigación busca utilizar desechos de vidrio molido como reemplazo parcial de la cantidad de agregado fino requerido en un diseño de mezcla de concreto hidráulico.

Se han realizado investigaciones donde se observa la influencia de los residuos de vidrio como reemplazo parcial de la arena en el concreto dentro de un amplia gama de porcentajes de sustitución que van de 0% a 40% [1], también utilizando concreto con un diseño de $f'c = 21$ MPa con específicamente vidrio sódico cálcico que es el más común [2]; de manera similar, se ha investigado el

comportamiento del concreto con un porcentaje de reemplazo de hasta 36%, a través de la clasificación del vidrio por su color [3]. Por otro lado, también se ha investigado sobre la influencia del vidrio reciclado molido como reductor de agregado fino para el diseño de mezclas de concreto en pavimento urbanos [4].

Con esta investigación se busca comparar la resistencia a compresión y flexión de un diseño de mezcla de concreto hidráulico normal de un $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ con el mismo diseño de mezcla de concreto hidráulico sustituyendo parte del agregado fino con vidrio reciclado molido. Buscando así una mejora en su resistencia, aunque intuitivamente se pueda pensar que causa el efecto contrario debido a la relativa superficie lisa del vidrio [5].

1.1 El concreto

El concreto es una mezcla homogénea de agregado fino, agregado grueso, agua y cemento que funciona como aglutinante para unir todos estos [6].

El cemento es un conglomerante hidráulico, que son aquellos productos que, amasados con el agua, fraguan y endurecen, tanto expuestos al aire como sumergidos en agua [7]. Existen diferentes tipos y usos de cementos hidráulicos, los cuales se pueden clasificar en base a su desempeño en tipo GU, HE, MS, HS, MH, LH [8], [9].

El agua es un componente de suma importancia, debido a que es él que detona la reacción química del cemento cuando se mezclan y permite desarrollar su capacidad aglomerante. Hay una cantidad de agua requerida para la hidratación del cemento y el resto solo cumple la función de darle mejor fluidez y trabajabilidad al concreto en estado fresco.

El agua adicional es una masa que queda dentro de la mezcla y cuando se fragua el concreto crea porosidad, lo que reduce la resistencia del concreto [10]. Debido a esto, existe la relación agua cemento, la cual está normada en el capítulo 19 del código ACI 318 [11], en esta hay relaciones agua cemento máximas dependiendo del tipo de exposición que vaya a tener la estructura de concreto.

El agregado fino es todo aquel componente que pase el tamiz de 9.5 mm, y que predominantemente se mantiene entre el tamiz de 4.75 mm (No.4) y el tamiz de 75 μm (No.200). Es el árido de mayor responsabilidad. A diferencia de los demás componentes, puede decirse que no es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena. Las arenas provenientes de ríos suelen ser las

mejores para la elaboración de concreto, debido a que la mayoría de las veces son cuarzo en estado puro [7].

El agregado grueso es aquel que es retenido en el tamiz de 4.75 mm (No.4), los cuales normalmente se extraen mediante la explotación de canteras, que en su proceso de extracción y trituración se le da un tamaño y forma específico. Este tiende a presentar mejor adherencia con el cemento cuando es triturado previamente, permitiendo generar mayor resistencia cuando se lo emplea en la elaboración de hormigones; sin embargo, se requerirá más pasta de cemento para poder cubrir el área superficial de los agregados [3].

1.1.1 Propiedades del concreto en estado fresco

La consistencia es la menor o mayor facilidad que tiene el concreto fresco para deformarse. Varía con multitud de factores: cantidad de agua de amasado, tamaño máximo, granulometría y forma de los agregados; el que más influye es la cantidad de agua de amasado [7]. Para evaluarla, se utiliza el cono de Abraham, el cual es ampliamente usado debido a su rapidez y simplicidad, el procedimiento de uso es descrito en la norma ASTM C143[12].

La trabajabilidad es una propiedad fuertemente relacionada con la consistencia y se puede definir como aquella aptitud que permite una fácil colocación y consolidación adecuada, para tener un producto final homogéneo y libre de segregación.

La homogeneidad es la distribución de cada uno de sus componentes y esta propiedad indica en que grado se reparten cada uno de estos. La homogeneidad puede perderse por segregación o por decantación. En ambos casos puede llegar a empeorar con un contenido mayor de agua, mayor tamaño máximo del agregado o vibraciones en el transporte del concreto [7].

1.1.2 Propiedades del concreto endurecido

La densidad se refiere a la masa por unidad volumétrica. La densidad del concreto varía dependiendo de la cantidad y densidad del agregado, cantidad de aire atrapado o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento [6].

El curado es la etapa más importante cuando se realizan elementos de concreto, unas malas prácticas, ausencia o falta de curado pueden tener influencias sumamente negativas en la resistencia y otras propiedades finales del elemento.

1.1.3 Características de los agregados

La granulometría hace referencia a la distribución porcentual por tamaño que tengan las partículas de un agregado, el tamaño de estas partículas se determina, a través del análisis de tamices, donde se hace pasar una muestra de agregado, a través de estos tamices normalizados ordenados en la parte de arriba con la apertura mayor de malla y en la parte de abajo la abertura más pequeña.

El tamaño máximo del agregado se define como el tamiz con la menor abertura que permite que pase el material en su totalidad.

El tamaño máximo nominal, se puede considerar en la práctica, que es el tamaño promedio de partículas más grandes que hay dentro de una masa de agregado; La mayoría de las veces, este valor no coincide con el de tamaño máximo, debido a que este último puede ser un valor único de una partícula mayor a las demás [13].

El módulo de finura es un valor que se utiliza para caracterizar el agregado fino y estimar el grosor o finura de la muestra utilizada. Se puede definir como la sumatoria de los porcentajes acumulados retenidos en cada tamiz de la serie “estándar” dividido entre 100. La serie estándar consiste en los tamices que cumplen con una relación 1:2, desde el tamiz No. 100 en adelante [6]. Este valor empírico, la norma ASTM C33 [14], lo limita para el agregado en mezclas de concreto a valores entre 2.3 y 3.1; entre menor sea el valor de este índice, el agregado es más fino.

La absorción es la capacidad que tiene un agregado de absorber agua o cualquier otro líquido, el cual conlleva a un aumento del peso del material, porque se llenan los poros que tienen estos. Un agregado con mucha absorción puede derivar un comportamiento que afecte la adherencia, compresión y flexión del concreto. Con base en esto, se puede decir que un agregado puede estar en diferentes condiciones de humedad dependiendo de las condiciones en las que se tiene el material y se pueden dividir en: secado al horno, secado al aire, saturado con superficie seca (SSS) y húmedos. La figura 1 ilustra las diferentes condiciones de humedad que puede tener un agregado, donde se observa en azul la cantidad de agua que tiene el agregado y resalta su relación con la absorción potencial.



Figura 1. Condiciones de humedad de los agregados.
Fuente: Kosmatka et al. [6].

La gravedad específica, es la relación entre la masa de una unidad de volumen de un material a la masa del mismo volumen de agua a una temperatura indicada [10]. Estos valores son adimensionales y dependiendo del método de obtención existen diferentes tipos de gravedades específicas, las cuales son: en estado seco, en estado SSS y aparente.

1.2 El vidrio

En la amplia denominación genérica de vidrios o de materiales vítreos se incluye una gran diversidad de sustancias que, aunque a temperatura ambiente tienen apariencia de sólidos, no pueden considerarse estrictamente sólidos, ya que carecen de red cristalina que caracteriza y define el estado sólido [15].

Un material se puede obtener en estado vítreo a partir de sustancias que se encuentren en cualquiera de los tres estados: líquido, sólido y gaseoso; siempre y cuando el proceso utilizado tenga como resultado una estructura cristalina desordenada [16].

Es un material rígido, frágil y frecuentemente translúcido. El conjunto de vidrios comunes está compuesto por alrededor de 75% de sílice. Si se aumenta el contenido de sílice, aumenta la resistencia mecánica, la estabilidad química, la resistividad eléctrica, la resistencia al choque térmico y la transparencia a la radiación ultravioleta [15].

1.2.1 Fabricación del vidrio

Dependiendo del tipo de vidrio, deben emplearse, a veces, materias primas diferentes para producir un mismo componente, por ejemplo, mientras los feldspatos son la materia prima habitual que aporta la alúmina a la mayoría de los vidrios, esta se incorpora preferentemente en forma de caolín en la producción de fibra de vidrio [15]. Los recursos principales de esta materia prima son la cuarcita, los cuarzos, las arenas y las areniscas de cuarzo de nacimiento sedimentario; siendo la más utilizada la arena de cuarzo.

El proceso de fabricación consiste en un sistema de producción continua, que combina antiguos métodos con modernas tecnologías. La primera etapa es el mezclado de materiales, se utilizan tres ingredientes principales: arena de sílice, óxido de sodio y piedra caliza. Aquí se procede a medir la cantidad a utilizar de ingredientes y luego caen al tanque principal [17].

Luego los ingredientes pasan por un filtro para ser vertidos en el horno primario. Son hornos eléctricos que proporcionan una fundición más limpia y eficiente. Luego de salir del horno para ser laminado, la mezcla pasa por los rodillos formadores de donde se obtiene una larga tira de vidrio. Se ejecuta con dos grandes rodillos enfriados internamente con agua, para que el vidrio caiga sobre rodillos más pequeños que lo conducen al canal de templado. Esta última fase, es un proceso de enfriamiento controlado para aliviar los esfuerzos térmicos en el vidrio; la temperatura y el tiempo son controlados por computadoras [17].

La figura 2 muestra un diagrama de flujo resumen del proceso de fabricación del vidrio.

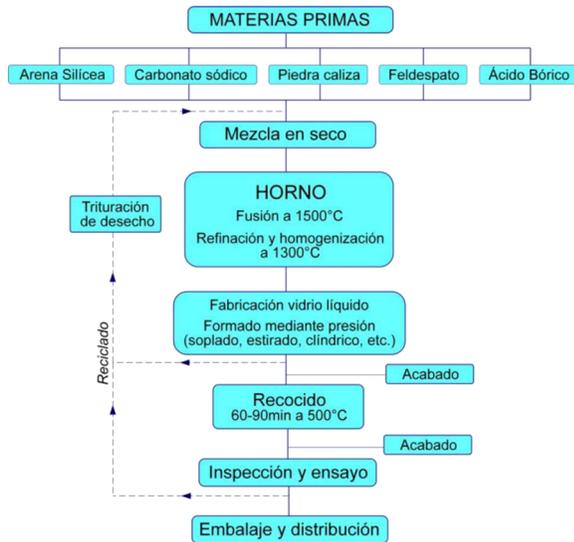


Figura 2. Diagrama del proceso de fabricación del vidrio. Fuente: Catalan [16].

En este proceso, la materia prima (arena de cuarzo) en ocasiones suele estar contaminada por distintos materiales pesados. Para obtener la calidad exigible en las arenas, en algunos casos es necesario recurrir a tratamientos de purificación para mejorar la calidad, siendo los más frecuentes los de lavado, molienda, flotación, atrición, separación eléctrica y magnética.

1.2.2 Propiedades del vidrio

Las propiedades de los vidrios, al igual que cualquier otro material, dependen de sus características estructurales. Y la estructura, a su vez, se halla condicionada principalmente por la composición química y, en menor escala, también por la historia térmica [15].

Un factor muy importante en la resistencia del vidrio es su elasticidad, que le permite dilatarse y contraerse de acuerdo con los cambios de temperatura. El vidrio tiene una gran tenacidad y se fractura bajo tensión, este es un material frágil casi ideal, debido a que casi no presenta ductilidad [18].

La curva esfuerzo-deformación unitaria del vidrio en tensión es en esencia, una línea recta, y la falla sucede antes de que tenga lugar alguna fluencia. Su esfuerzo último es de casi 70 MPa para ciertas clases de vidrios en placa. La tabla 1 muestra los valores de algunas propiedades del vidrio.

Tabla 1. Propiedades del vidrio

Módulo de elasticidad (E)	48 – 83 GPa
Módulo de elasticidad (G)	19 – 35 GPa
Relación de Poisson (ν)	0.17 – 0.27
Peso Específico (γ)	24 – 28 kN/m ³
Densidad específica (ρ)	2400 – 2800 kg/m ³
Esfuerzo de fluencia (σ_y)	0
Esfuerzo ultimo (σ_u)	30 – 1000 MPa
Porcentaje de alargamiento	0

Fuente: Gere & Goodnow[18].

1.2.3 Tipos de vidrio

Atendiendo a la naturaleza química de sus componentes, las principales familias de vidrios pueden clasificarse en: orgánicos, orgánicos mixtos e inorgánicos. Estos últimos a su vez contiene los de elementos óxidos, calcogenuros, halogenuros, oxihalogenuros, oxinitruros, oxicarburos y oxisales [15].

Los vidrios de óxidos son el grupo más importante que dan lugares a vidrios, ya que dentro de él quedan comprendidos los principales formadores de vidrio de interés científico y técnico. Dentro de estos están los vidrios silicatos, es un tipo de vidrio exclusivo, elaborado con sílice puro. Los vidrios que contienen 96% de sílice tienen una estabilidad tan grande y una temperatura de reblandecimiento tan elevada (1,500 °C) que soporta temperaturas hasta de 900 °C durante largo tiempo [19].

Los vidrios de plomo son los que menos sílice contienen en su composición con 52% a 67% de sílice. Es un vidrio que tiene mejor trabajabilidad; ya que funde a temperaturas más bajas y permanece con cierta plasticidad [19].

El vidrio borosilicato, comprende un 70% a 80% de sílice, su principal componente es el óxido de boro. Es, prácticamente inerte, más difícil de fundir y de trabajar. Tiene alta resistencia a cambios bruscos de temperatura, pero no tan alta como la del vidrio de sílice puro.

El vidrio sódico-cálcico, más comúnmente conocido como vidrio plano y vidrio para envases, se utiliza para la fabricación de botellas de bebidas, tarros de alimentos, ventanas, vasos, entre otros. Es el tipo de vidrio de mayor producción industrial, debido a que es el que funde con mayor facilidad, por lo tanto, es más barato [19].

1.3 Análisis estadístico

En ciencias e ingeniería es necesario realizar un análisis, el cual logre corroborar si existen diferencias significativas entre las medidas realizadas a diferentes grupos muestrales. La comparación simultánea de varias muestras poblacionales se denomina análisis de varianza (ANOVA), el cual se realiza mediante el uso de la distribución F de probabilidad.

La distribución F se utiliza para probar la hipótesis de que la varianza de una población normal es igual a la varianza de otra población normal [20].

En estadística, en la mayoría de los casos se formula una hipótesis con el único propósito de rechazarla o invalidarla y se expresa como H_0 (hipótesis nula). Mientras que la hipótesis que difiere de la hipótesis nula dada se expresa como H_1 (hipótesis alternativa).

Para los contrastes de hipótesis, se le llama nivel de significancia (α) del contraste a la máxima probabilidad con la que se está dispuesto a correr el riesgo de cometer un error de Tipo I (rechazar una hipótesis cuando debería ser aceptada) [21].

2. Materiales y Métodos

El presente estudio tiene un diseño tipo experimental. Los materiales utilizados para realizar los diseños de mezclas de concreto fueron:

- Material cementante: Cemento HE, Cemex.
- Agregado grueso: se utilizó un solo tipo de agregado el cual fue piedra con tamaño máximo nominal de 19 mm, proveniente del Río Piedra de la provincia de Chiriquí.

- Agregado fino: arena continental proveniente de San Carlos de la provincia de Panamá Oeste, y vidrio molido proveniente de diferentes tipos de vidrios reciclados, desde persianas hasta botellas de vino, previamente molidos en una máquina para ser utilizable. Para la obtención del vidrio molido se recolectaron una cantidad suficiente de productos de vidrio para ser triturados utilizando una máquina especial, obteniendo así 40 kg de vidrio molido.

Los agregados grueso y fino fueron cuarteados siguiendo el procedimiento especificado en la práctica estándar ASTM C702 [22], para posteriormente evaluar los requerimientos descritos en la norma de especificación ASTM C33 [14] para los agregados de concreto.

Se realizaron los análisis granulométricos de manera individual al vidrio molido y la arena, utilizando una serie de tamices según los tamaños estándares especificados en la norma de especificación ASTM E11 [23], también se verificó si las granulometrías individuales obtenidas para la arena y el vidrio molido, así como también para la combinación de ambos materiales, estaban o no dentro del rango establecido en la norma ASTM C33 [14] para agregados finos.

Adicionalmente, se determinaron las gravedades específicas y porcentaje de absorción para los materiales de agregado fino utilizados en el estudio, siguiendo los procedimientos establecidos en el método de prueba estándar ASTM C128 [24]. Para el agregado grueso, estos valores fueron proporcionados por la empresa concretera que proporcionó el agregado grueso para este estudio.

2.1 Diseño de mezcla

Se realiza un diseño de mezcla utilizando el método del ACI que está descrito en la práctica estándar ACI 211.1 [25], en donde utilizando los valores obtenidos en los ensayos realizados a los agregados se sigue el procedimiento de la práctica estándar para así obtener la cantidad de material a usar para una mezcla convencional con una resistencia de diseño a la compresión de $f'_c = 28$ MPa. Este diseño de mezcla convencional fue establecido en este estudio como la mezcla control y codificado como diseño 1 (D1). Utilizando como base la mezcla control, se modificó la proporción del agregado fino (arena continental) para reemplazar o sustituir el 10% y 15% del peso de la arena por el vidrio molido, dando origen al diseño 2 (D2) y diseño 3 (D3) respectivamente.

Toda vez que una mezcla de concreto tiene diferentes variables y desviaciones estándar, se utiliza una

resistencia promedio a la compresión requerida, f'_{cr} , el cual, el ACI 214R [26], lo define como la resistencia a compresión media del concreto requerida, como base para la elección de las proporciones de la mezcla.

2.2 Elaboración de especímenes y ensayos al concreto fresco

Se sigue el procedimiento descrito en la práctica estándar ASTM C192[27] para la preparación y curado de especímenes de prueba en el laboratorio y se procede a realizar una serie de cilindros de concreto, los cuales tienen un diámetro de 6 pulgadas (150 mm) y una altura de 12 pulgadas (300 mm) confeccionados en un molde de metal no absorbente, cada uno de estos se preparó en tres capas, varillándolos en cada capa una 25 veces y luego golpeando por fuera con un mazo de goma de 10 a 15 veces por cada capa vaciada para eliminar las burbujas de aire.

De manera similar para las viguetas, se utilizaron moldes de 12 pulgadas x 12 pulgadas (150mm x 150 mm) de sección transversal, con longitudes de 24 pulgadas (600 mm) y 21 pulgadas (540 mm) dependiendo de la disponibilidad de los moldes; esta variación no afecta el ensayo debido a que se utiliza en cualquier caso una luz libre de 457.2 mm. Para la fabricación de estos especímenes, los moldes fueron rellenados en dos capas, varillándolos cada 14 cm² y luego golpeándolos con un mazo de goma de 10 a 15 veces por cada capa vaciada.

Para cada diseño de mezcla se confeccionaron cinco (5) cilindros de concreto para cada edad de ensayo, siendo estas edades: 3, 7, 14, 21 y 28 días, confeccionándose así un total de 75 cilindros para los tres diseños de mezcla a ser ensayados a compresión. En cuanto a las viguetas, se confeccionaron dos (2) viguetas para cada diseño de mezcla por edad de ensayo: 3, 14 y 28 días, para un total de 18 viguetas para los tres diseños a ser ensayadas a flexión.

Durante la fabricación de los diseños de mezclas y conformación de los especímenes (cilindros y viguetas) se verificaron su temperatura en estado fresco según lo descrito en el método de prueba estándar ASTM C1064 [28], y también se tomó el asentamiento de los diseños según lo descrito en el método de prueba estándar ASTM C143 [12].

Luego de 24 horas del vaciado de cada uno de los diseños de mezcla, y una vez fraguados se desencofraron los especímenes y cada uno se rotuló con su fecha de muestreo, identificación de diseño y número de espécimen. Los especímenes fueron llevados inmediatamente a una tina con agua saturada con

hidróxido de calcio (cal) para mantenerlos en constante curado, garantizando una correcta hidratación.

2.3 Ensayos a cilindros

Para cada cilindro de concreto se tomaron y registraron dos medidas de su diámetro, tres medidas de su altura y su peso. Los cilindros se ensayaron a compresión siguiendo el método de prueba estándar ASTM C39[30], y el sistema de obturación utilizado en los cilindros fue el de las almohadillas de neopreno que cumplen con la práctica estándar ASTM C1231[29], manteniendo una superficie uniforme durante el ensayo de resistencia a compresión.

Tal como lo indica el método de prueba estándar ASTM C39[30] los especímenes curados se ensayaron a las edades correspondientes tan pronto fue posible una vez sacados de las tinas de curado. Se aplicó una carga continua correspondiente a una tasa de esfuerzo en cada espécimen de 0.25 ± 0.05 MPa/s. El cálculo de la resistencia a compresión de cada espécimen, se específica como la división de la máxima carga resistida dada por el equipo entre el promedio del área de la sección transversal que es obtenida con los valores de las mediciones preliminares que se realizan a los cilindros.

2.4 Ensayos a viguetas

Los ensayos de resistencia a flexión se realizaron según lo establecido en el método de prueba estándar ASTM C78[31]. Antes del ensayo, se midieron las caras de cada una de las muestras y se identificó con rotulador la posición donde estaban ubicados los apoyos rígidos, así como la división en tres partes iguales, en donde se aplicaría la carga.

Los especímenes recibieron una carga continua sin golpes, manteniendo los esfuerzos en la fibra en tensión entre 0.9 y 1.2 MPa/min hasta que fracturaron. Posteriormente se identificó en qué lugar ocurrió la fractura y se determinó las dimensiones de la sección transversal, tomando medidas en cada cara y una al centro del lugar donde ocurrió la falla, para determinar el promedio de ancho y profundidad.

La ASTM C78[31], indica que, si la fractura ocurre dentro del tercio medio, el módulo de ruptura se puede calcular de la siguiente manera:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

Donde la variable P, es la máxima carga aplicada, L la longitud libre (457.2 mm), b es el promedio de ancho

del espécimen en la fractura y d es la profundidad promedio del espécimen en la fractura.

2.5 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de los resultados obtenidos para corroborar que las medias muestrales que se comparan son estadísticamente iguales o no. Dicho análisis se realizó con la herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel, específicamente la función “análisis de varianza de un factor”.

La herramienta arroja diferentes resultados de relevancia, donde los más importantes que se utilizan para tomar una decisión son la F , la probabilidad y el valor crítico de F . Se interpreta de manera que, si la F es mayor a la F crítica, las medias muestrales no son estadísticamente iguales. Del mismo modo, también, se puede utilizar la probabilidad, que debe ser menor al nivel de significancia utilizado (0.05), para llegar a la misma conclusión.

3. Resultados y discusión

3.1 Granulometrías

Se realizaron diferentes ensayos para determinar la curva granulométrica y el módulo de finura del agregado fino y el vidrio. La figura 3, muestra la curva granulométrica obtenida para la muestra de vidrio molido solo.

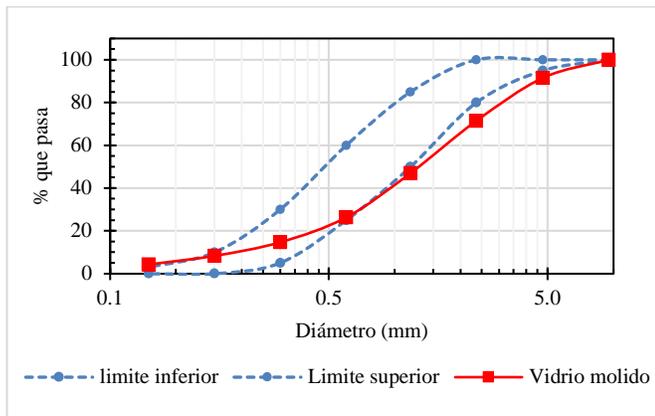


Figura 3. Curva granulométrica del vidrio molido.

Esta muestra registra un módulo de finura de 3.40, y se observa que el vidrio molido utilizado, por sí solo, no logra cumplir las especificaciones mínimas necesarias.

La figura 4 muestra la curva granulométrica del agregado fino solo, donde se puede observar cómo la

curva tiende al lado fino, pero dentro de los rangos. Esta muestra registra un módulo de finura de 2.48.

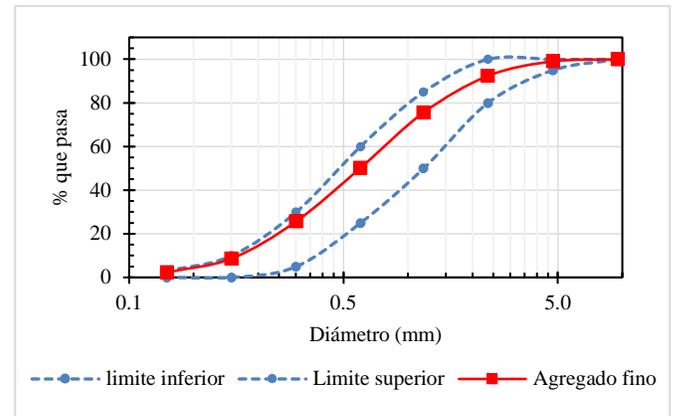


Figura 4. Curva granulométrica del agregado fino solo.

La figura 5, muestra la curva granulométrica, de una muestra de agregado fino, con 15% de vidrio molido, el cual registra un módulo de finura de 2.66.

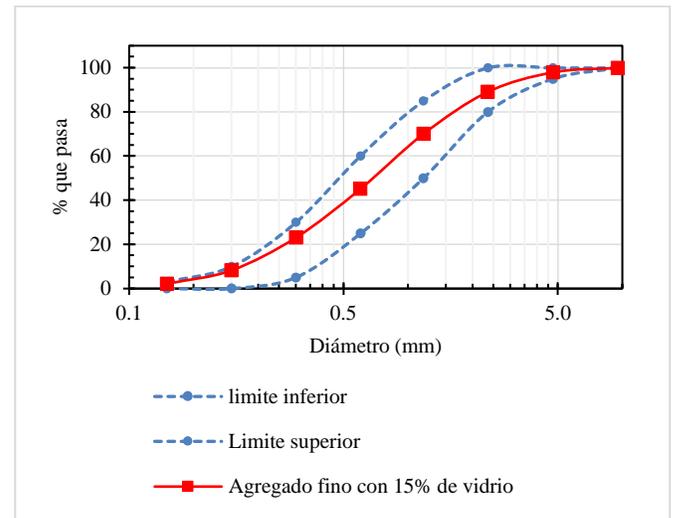


Figura 5. Curva granulométrica del agregado fino con 15% de vidrio molido.

Al ensayar granulometrías con muestras combinadas con las proporciones requeridas, se observa que estos quedan dentro de los límites normados; por lo tanto, pueden ser utilizados en mezclas de concreto. Esto fue posible en este caso porque el agregado fino era bastante fino, entonces, al mezclarlo con el vidrio molido que era más grueso, la curva granulométrica original, se mueve hacia la derecha cuando se realizan combinaciones, pero sin salirse de los límites.

3.2 Porcentajes de absorción y humedad de los agregados.

Los porcentajes de absorción de los agregados gruesos y agregados finos fueron 1.8% y 1.4%, respectivamente. Previo a la confección de las mezclas de concreto hidráulico según las dosificaciones de diseño se encontraron que el porcentaje de humedad de los agregados finos fue de 6% durante la confección de los cilindros y viguetas. El porcentaje de humedad para los agregados gruesos fue de 4% durante la confección de los cilindros del diseño D1 y de 3% para los diseños D2 y D3; en cuanto que, para la confección de las viguetas para los tres diseños, el porcentaje de humedad de los agregados gruesos fue de 1%.

3.3 Dosificación de mezcla para cilindros

Con los datos de los agregados y siguiendo la metodología mencionada, se logra conocer el peso necesario de cada material para los diferentes diseños de mezcla. La tabla 2 muestra los valores obtenidos en kg para la dosificación de cada mezcla, destinados a ensayos de compresión.

Tabla 2. Dosificación de mezcla para cilindros

Diseño	Cemento (kg)	Agua (kg)	A. Grueso (kg)	A. Fino (kg)	Vidrio (kg)
D1	66.48	23.69	172.62	89.68	0
D2	66.48	25.35	170.96	80.71	8.97
D3	66.48	25.35	170.96	76.23	13.45

3.4 Asentamiento de cilindros

La figura 6, muestra los resultados de las pruebas de asentamiento o revenimiento realizadas a las mezclas destinadas a los cilindros de concreto.

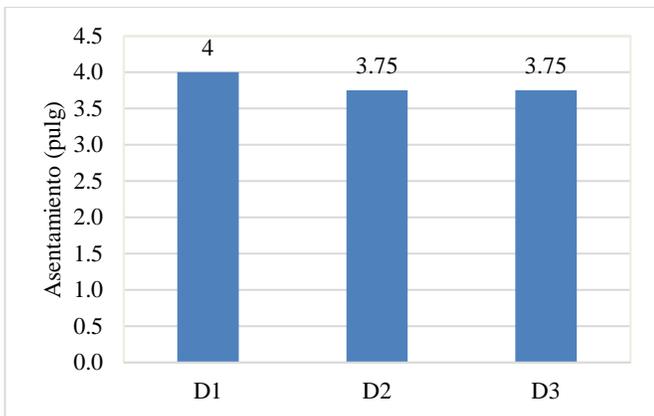


Figura 6. Asentamiento de mezclas para cilindros.

Los resultados de los asentamientos medidos a las mezclas de concreto utilizadas para confeccionar los cilindros muestran un comportamiento bastante constante.

3.5 Resultado ensayos de esfuerzo a compresión

La tabla 3 muestra los promedios de esfuerzo a compresión de cada diseño de mezcla en cada una de las edades ensayadas.

Se puede observar como el diseño 2 (10% de vidrio molido) muestra una constante mejora al esfuerzo a compresión si se compara con el diseño 1 de control. Mientras que el diseño 3 (15% de vidrio molido), se mantuvo aumentando hasta superar mínimamente el control a los 28 días.

Tabla 3. Ensayos de esfuerzo a compresión

Edad de ensayo (días)	Esfuerzo a compresión (MPa)		
	D1	D2	D3
3	24.64	27.00	23.55
7	32.78	34.56	31.04
14	37.53	40.60	36.86
21	40.58	42.22	40.26
28	42.10	44.42	42.56

3.6 Análisis estadístico de cilindros

La tabla 4 muestra los resultados obtenidos del análisis de varianza realizados para las muestras de cilindros de concreto a la edad de 28 días. Una tabla similar a la mostrada se realizó para cada uno de los días de ensayo de cilindros de concreto.

Tabla 4. Resultados del análisis de varianza de los ensayos a compresión a la edad de veintiocho (28) días

Grupos	Cant.	Suma	Prom.	Varianza			
D1	5	210.61	42.12	0.7194			
D2	5	222.08	44.41	1.2780			
D3	5	212.70	42.54	1.1647			
Origen de varianza	Suma de cuad.	Grados de libertad	Prom. de cuad.	F	Prob.	F crit	
Entre grupos	14.930	2	7.46	7.0823	0.0093	3.885	
Dentro de grupos	12.648	12	1.05				
Total	27.579	14					

Se puede observar que el valor de probabilidad obtenido es menor al nivel de significación especificado (0.05). Del mismo modo se observa que, la F crítica es menor a la F. Estas condiciones también se cumplen para los análisis de varianza para las demás edades de ensayo a compresión. De esta manera, se puede inferir que los resultados obtenidos para los diseños de mezcla son estadísticamente diferentes o significativos, y que en efecto esta diferencia no se debe solamente a la desviación estándar de las muestras.

3.7 Dosificación de mezcla para viguetas

De manera similar a los cilindros, se logra conocer el peso necesario de cada material para los diferentes diseños de mezclas empleados para las viguetas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Dosificación de mezcla para viguetas

Diseño	Cemento (kg)	Agua (kg)	A. Grueso (kg)	A. Fino (kg)	Vidrio (kg)
D1	42.40	18.28	106.91	57.19	0
D2	42.40	18.28	106.91	51.47	5.72
D3	42.40	18.28	106.91	48.61	8.58

3.8 Asentamiento de viguetas

La figura 7, muestra los resultados de las pruebas de asentamiento o revenimiento realizadas a las mezclas destinadas a las viguetas de concreto.

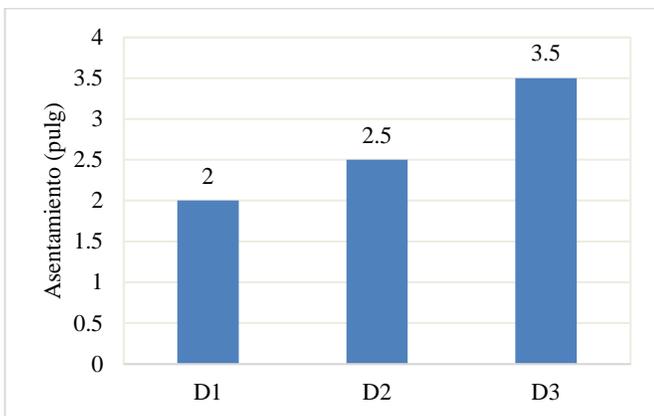


Figura 7. Asentamiento de mezcla para viguetas.

Los resultados para las pruebas realizadas en las mezclas con que se confeccionaron las viguetas se observa una variación mayor; esta afectación no se le atribuye a la inclusión de vidrio molido a la mezcla, sino

a la variación del estado de humedad del agregado utilizado, tal como se reportó en la sección 3.2.

3.9 Resultado ensayos de esfuerzo a flexión

En la tabla 6 muestra los datos de los promedios de dos muestras por diseño para cada edad de ensayo de esfuerzo a compresión en las viguetas de concreto.

Los datos muestran que, al añadir vidrio molido a las viguetas de concreto, no genera un aporte positivo apreciable en su capacidad a flexión.

Tabla 6. Ensayos de esfuerzo a flexión

Edad de ensayo (días)	Esfuerzo a flexión (MPa)		
	D1	D2	D3
3	3.25	3.36	3.02
14	3.97	4.01	3.61
28	4.97	5.04	4.70

4. Conclusiones

Una vez culminado con el estudio, se procede a plantear las siguientes conclusiones:

- Los ensayos a compresión mostraron que sustituir agregado fino con 10% de vidrio molido, mejora la resistencia a compresión de concreto, mientras que utilizar un 15% muestra un efecto adverso en su resistencia a la compresión hasta los 21 días y a los 28 días una pequeña mejora poco significativa.
- Los ensayos a flexión mostraron que el vidrio molido cuando se sustituye en un 10%, muestra una mejora insignificante, y al utilizar 15%, presenta resultados adversos en la resistencia a flexión de las viguetas.
- Debido a los resultados obtenidos se puede tomar en consideración la utilización de vidrio como sustitución porcentual del agregado fino en plantas de concreto.
- La utilización de vidrio como sustituto porcentual del agregado fino en plantas de concreto, será eficiente debido a que no se requiere un tratamiento especial al momento de añadir el vidrio a la mezcla, el vidrio se agrega directamente como un agregado más.
- Además, se pudo determinar que, en vez de deshacer las botellas o vidrios usados, se puede moler para utilizar como reemplazo parcial del agregado fino en los diseños de mezcla de concreto hidráulico sin afectar su capacidad a compresión.
- Se deben realizar estudios posteriores que evalúen la viabilidad en cuanto a seguridad ocupacional en

el uso de vidrio molido para la fabricación de concretos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al personal del Laboratorio de Ensayo de Materiales del Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá, a Concretos Equiserpa, al Laboratorio de Concreto, Suelo y Asfalto, S.A. (LABCSA) por brindarnos la ayuda en la realización de cada inciso de la investigación y la utilización de sus equipos de mediciones y ensayos.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores y el trabajo presentado no presentan conflictos de interés con ningún patrocinador o agencia con interés en los resultados de la investigación.

Los autores declaran no tener algún conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

R.M. aportó la investigación referente al concreto y estadística, al igual que procedimiento experimental, cálculos y análisis de resultados.

R.V. aportó la investigación referente al vidrio, al igual que procedimiento experimental, recolección de datos y análisis de resultados

K.N. aportó en el desarrollo de la matriz de ensayos, análisis de resultados de ensayos y análisis estadístico, y redacción del artículo científico.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] K. I. M. Ibrahim, "The Effect of Using Waste Glass [WG] as Partial Replacement of sand on Concrete," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 41–45, 2017, doi: 10.9790/1684-1402024145.
- [2] J. F. Luján, "Estudio Experimental para incrementar la resistencia de un concreto de $f'c=210$ kg/cm² adicionando un porcentaje de vidrio sódico cálcico," Universidad Privada Antenor Orrego, 2008.
- [3] J. B. Almedia Beltrán and C. R. Trujillo Vivas, "Principios básicos de la construcción sostenible utilizando vidrio triturado en la elaboración de hormigones - segunda etapa," Universidad central del Ecuador, 2017.
- [4] L. M. Ochoa Tapia, "Evaluación de la influencia del vidrio reciclado molido como reductor de agregado fino para el diseño de mezclas de concreto en pavimentos urbanos," Universidad Señor de Sipán, 2018.
- [5] N. N. Gerges, C. A. Issa, S. A. Fawaz, J. Jabbour, J. Jreige, and A. Yacoub, "Recycled Glass Concrete: Coarse and Fine Aggregates," *European Journal of Engineering Research and Science*, vol. 3, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.24018/ejers.2018.3.1.533.
- [6] S. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. Panarese, and J. Tanesi, *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Skokie, Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association, 2004.
- [7] P. Jimenez Montoya, Á. García Meseguer, and F. Morán Cabré, *Hormigón Armado*. Barcelona: Gustavo Gili 2010.
- [8] ASTM C1157/1157M, "Standard Performance Specification for Hydraulic Cement." ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. doi: 10.1520/C1157_C1157M-20A.
- [9] DGNTI-COPANIT 5, "Cemento Hidráulico. Especificaciones." Panamá: Ministerio de Comercio e Industrias, 2019.
- [10] G. M. Walhoff, "Influencia del vidrio molido en la resistencia a la compresión del concreto y costos de fabricación, comparado con el concreto convencional, Barranca-2016," Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2017. [Online]. Available: <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2120>
- [11] ACI 318, "Requisitos de reglamento para concreto estructural." American Concrete Institute, 2019.
- [12] ASTM C143/C143M, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete." ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [13] D. Sánchez de Guzmán, *Tecnología del concreto y del mortero*. Santa Fé de Bogotá: Bhandar Editores, 2001.
- [14] ASTM C33/C33M, "Standard Specification for Concrete Aggregates." ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. doi: 10.1520/C0033_C0033M-18.
- [15] J. M. Fernández Navarro, *El Vidrio*, 3rd ed. ARTEGRAF, S.A., 2003.
- [16] C. J. Catalan Artega, "Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado H15, H20y H30," Universidad Austral de Chile, 2013.
- [17] I. Ruíz, "Proceso de fabricación de vidrio." Panamá: Universidad Tecnológica de Panamá, 1996.

- [18] J. Gere and B. Goodnow, *Mecánica de Materiales*, 7th ed. CENGAGE Learning, 2009.
- [19] T. López and A. Martínez, *El Mundo Mágico del Vidrio*, 1st ed. Fondo de Cultura Económica, 1995.
- [20] D. A. Lind, W. G. Marchal, and R. D. Mason, *Estadística para Administración y Economía*, 11th ed. Alfaomega Colombiana, 2004.
- [21] M. R. Spiegel, *Estadística*, 2nd ed. Mc Graw-Hill, Inc., 1997.
- [22] ASTM C702/702M, “Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [23] ASTM E11, “Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. doi: 10.1520/E0011-20.
- [24] ASTM C128, “Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. doi: 10.1520/C0128-15.
- [25] ACI 211.1, “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.” American Concrete Institute, 1991.
- [26] ACI 214R, “Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete.” American Concrete Institute, p. 20, 2011.
- [27] ASTM C192/192M, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.” ASTM International, 2019. doi: 10.1520/C0192_C0192M-19.
- [28] ASTM C1064/C1064M, “Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete.” 2017. doi: 10.1520/C1064_C1064M-17.
- [29] ASTM C1231/C1231M, “Use of Unbonded Cpas in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [30] ASTM C39/C39M, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021. doi: 10.1520/C0039_C0039M-21.
- [31] ASTM C78/C78M, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021. doi: 10.1520/C0078_C0078M-21.