

Factores de emisión de concretos modificados con residuos de vidrio en reemplazo de los agregados finos

Emission factors of modified concrete with glass in replacing of fine aggregates

Oscar Felipe Arbelaez Pérez^{1*}

Juan José Agudelo Pino¹

Mateo Acevedo Diosa¹

Santiago Valencia Ciro¹

Recibido 09 de noviembre de 2020, aceptado 10 de diciembre de 2021

Received: November 09, 2020

Accepted: December 10, 2021

RESUMEN

Se generan grandes cantidades de residuos de vidrio cada año y su eliminación inadecuada crea un problema creciente que debe abordarse. El objetivo de esta investigación es utilizar residuos de vidrio como reemplazo parcial de los agregados finos en la preparación de concretos con el fin de ahorrar recursos naturales de forma eficaz y resolver problemas de contaminación ambiental. Se elaboraron diferentes mezclas reemplazando los agregados finos por 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 50% en peso de residuos de vidrio. Se elaboraron especímenes cilíndricos de concreto de 0,15 m de diámetro y 0,3 m de longitud, se evaluó el asentamiento y la resistencia a la compresión. Los resultados experimentales indicaron que el asentamiento disminuye con el aumento del porcentaje de vidrio. Se encontró que el mejor espécimen (20% de reemplazo) presentó un aumento del 5,5% en la resistencia a la compresión. La evaluación de los aspectos económicos y ambientales mostraron para este mismo espécimen se observó un ahorro del 0,7% en el costo de la preparación y una disminución del 6,4% en las emisiones de dióxido de carbono en comparación con el concreto tradicional. Los resultados demuestran que los agregados finos pueden ser reemplazados por residuos de vidrio en la elaboración de concreto. Este enfoque ofrece una solución amigable con el medio ambiente para el problema actual de los residuos de vidrio.

Palabras clave: Concretos modificados, residuos de vidrio, emisión de CO₂.

ABSTRACT

Large quantities of waste glass are generated every year, and inappropriate disposal creates an increasing problem that needs to be addressed. This research aims to use glass waste as a partial replacement for fine aggregates in the preparation of concretes, to save natural resources and solve environmental pollution problems. Different mixes were produced by replacing fine aggregates with 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 50% of waste glass. Concrete specimens of 0.15 m in diameter and 0.3 m in length were fabricated and tested in settling and compression strength. The experimental results indicated that the settling decreases with the increase of the percentage of glass. The best specimen (20% replacement) exhibited an increasing 5.5% in compressive strength. The assessment of economic and environmental aspects reveals that the same sample can provide 0.7% savings in cost and 6.4% in emitted carbon dioxide compared with traditional concrete. The results demonstrate that waste glass can replace fine aggregates to manufacture concrete. This approach offers an environmentally friendly solution to the ongoing problem of waste glass.

Keywords: *Modified concrete, glass waste, CO₂ emission.*

¹ Grupo de Investigación Termomec. Universidad Cooperativa de Colombia. Facultad de Ingeniería. Medellín, Colombia.
E-mail: oscar.arbelaez@campusucc.edu.co; juan.agudelop@campusucc.edu.co; mateo.acevedod@campusucc.edu.co; santiago.valenciav@campusucc.edu.co

* Autor de correspondencia: oscar.arbelaez@campusucc.edu.co

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la población, está ligado a la demanda continua en la construcción de edificios residenciales y no residenciales, fábricas, hospitales, puentes, túneles y diferentes proyectos viales e hidroeléctricos [1]. Para asegurar esta demanda, se requiere de un elevado consumo de concreto (mezcla de cemento, agua y agregados) [2]. La industria de la construcción es considerada una de las principales contribuyentes de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (entre 30% y 40% de las emisiones globales totales), con un impacto negativo sobre el calentamiento global [3]. Para disminuir la cantidad de emisiones de CO₂, la industria de la construcción, se ha centrado en la reducción en la explotación de materias primas y en la búsqueda de materiales alternativos a los tradicionales [4]. Las emisiones de CO₂ durante los procesos de extracción, cribado y lavado de los agregados están alrededor de 5 Kg de CO₂ por tonelada de material [5], si tenemos en cuenta que las fuentes de los agregados son finitas y no renovables, se debe considerar la escasez que se está produciendo por la alta demanda de estos recursos. El reto que afronta la industria de la construcción se centra en satisfacer la demanda de este material, disminuir las emisiones de CO₂ y en la búsqueda de materiales sustitutos ambientalmente amigables y de bajo costo. Diferentes investigaciones han reportado el reemplazo de los componentes tradicionales por fibras de acero [6], residuos de vidrio [7], poliestireno expandido [8], residuos de llantas [9], residuos de construcción y demolición [10], entre otros, en la elaboración de concretos modificados que conserven propiedades mecánicas similares o superiores al concreto tradicional y generar un abanico de posibilidades para hacer frente a los desechos producidos por diferentes industrias [11].

Se ha reportado que solo en los estados unidos cada año se producen decenas de millones de toneladas de residuos de vidrio y alrededor del 60%, se eliminan en los vertederos y acorde al ritmo creciente de la población, cada día se producen más residuos, disminuyendo el espacio disponible para su disposición [12]. En comparación con muchos tipos de desechos sólidos, el vidrio es químicamente estable y cuando se dispone en los vertederos no es biodegradable [13]. Una vía alternativa para utilizar los residuos de vidrio es su trituración en partículas

de menor tamaño y utilizarlo en la preparación de concretos como reemplazo parcial de los agregados [14]. Esta alternativa tiene múltiples ventajas como por ejemplo: 1) el vidrio no necesitaría fundirse, reduciendo el consumo de energía, 2) el tratamiento de los residuos de vidrio se simplifica, dado que se eliminan las etapas de clasificación y limpieza y 3) se minimizan los elementos tóxicos presentes en el vidrio, los cuales, se solidifican y encierran en el concreto [15]. Se ha reportado que la preparación de concretos utilizando residuos de vidrio en reemplazo de los agregados finos en porcentajes del 20%, 40% y 60% mostró resistencias del 107%, 86% y 96% comparada con el material tradicional, respectivamente, efecto asociado a la unión entre los residuos de vidrio y los componentes de la matriz de concreto [16]. En esa misma línea de trabajo, Zaina y colaboradores reportaron que el reemplazo parcial de los agregados finos al 10%, 15% y 20%, por residuos de vidrio, permite alcanzar resistencias del 92%, 95% y del 104%, respectivamente, con respecto al material tradicional [17], efecto asociado con la actividad puzolánica mostrada por el vidrio de desecho.

La construcción moderna de estructuras ecológicas tiene como objetivo reducir las emisiones de dióxido de carbono que se producen a lo largo del proceso de transporte y de producción de materiales. El uso de cenizas volantes, humo de sílice y escoria granulada de alto horno han sido incorporados en la preparación de concretos, permitiendo reducir las emisiones de dióxido de carbono [18]. Crossin y colaboradores [19], reportaron que la sustitución del 70% del cemento con escoria de acero, reduciría, solo en los Estados Unidos, hasta un 47,5% la emisión de gases de dióxido de carbono. Asimismo, se ha reportado que la sustitución del 25% y 40% del cemento por cenizas volantes reduce las emisiones de dióxido de carbono en un 13% y un 22%, respectivamente [20]. De manera similar, el uso de cenizas volantes en concreto prefabricado permitió una reducción del 18% en los aportes de cemento, lo que llevó a una reducción del 25% de los gases de efecto invernadero [21].

La revisión de la literatura muestra que el reemplazo de los agregados finos por residuos de vidrio durante la preparación de concretos genera un efecto positivo en las propiedades mecánicas, sin embargo, no se presentan resultados, ni análisis adicionales sobre la viabilidad económica o relacionados con la

reducción en la emisión de dióxido de carbono, lo que hace que este artículo aborde una importante brecha de conocimiento. En este trabajo se diseñaron y prepararon mezclas de concreto tradicional y modificado con residuos de vidrio, en porcentajes de reemplazo del 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 50% de los agregados finos. A partir de las mezclas diseñadas se prepararon especímenes cilíndricos de 0,15 m de diámetro x 0,3 m de longitud. Se evaluó el asentamiento y la resistencia a la compresión de los especímenes elaborados. Asimismo, se realizó un análisis económico de los concretos preparados y de las emisiones de dióxido de carbono en la preparación de los concretos a partir de este tipo de residuos. Se espera que la incorporación de residuos de vidrio permita repotenciar estos desechos en la producción de concretos con resistencias moderadas a la compresión, en aras de minimizar el efecto negativo de este tipo de residuos sobre el medio ambiente.

METODOLOGIA

Caracterización de los materiales

La caracterización inicial de los materiales incluyó análisis granulométrico (ASTM C-125), masa unitaria suelta y masa unitaria compacta (ASTM C-128), la densidad aparente (ASTM C-29) y la absorción de los agregados (ASTM C 138). En este trabajo se utilizó cemento portland de uso general con densidad de 3080 Kg/m³. Los residuos de vidrio provenientes de botellas transparentes en desuso, fueron triturados manualmente y se clasificaron por análisis granulométrico acorde a la norma ASTM C-125, para este trabajo se utilizó el material con partículas comprendidas entre 4-16 micras.

Diseño de las mezclas de concreto

El diseño de mezcla del concreto tradicional se efectuó acorde a la metodología del Instituto americano de concreto ACI 211.18. Se diseñaron en total 7 mezclas de concreto, una mezcla de referencia y seis mezclas modificadas con reemplazos del 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 50% en peso de los agregados finos por residuos de vidrio. La mezcla de referencia se diseñó para un asentamiento de 0,125 m, una relación agua cemento de 0,5 y con una resistencia a la compresión de 21 MPa a los 28 días.

Preparación de las mezclas de concreto

Las mezclas de concreto fueron preparadas tal como lo describen Valencia y colaboradores [22].

Inicialmente se mezcló el agregado grueso y el agregado fino hasta conseguir una mezcla homogénea. Posteriormente, se agregó el cemento y el 75% del agua de diseño y se agitó hasta obtener una mezcla homogénea (alrededor de 3 minutos), luego se agregó el 25% del agua restante y los residuos de vidrio y se mezcló nuevamente por 4 minutos más. Para cada una de las mezclas preparadas, se realizó la prueba de asentamiento acorde a la metodología ASTM C-143.

Preparación de los especímenes de concreto

Se prepararon 3 especímenes cilíndricos de concreto de 0,15 m de diámetro y 0,30 m de longitud por cada tipo de mezcla, tal como se describe en la metodología ASTM C192. Antes de preparar los especímenes se adicionó desmoldante dentro de los moldes cilíndricos, para que el concreto fresco no se adhiriera a los moldes, posteriormente se llenó con 3 capas iguales de mezcla, se apisonó en cada capa 25 veces con una varilla de acero y por último se golpeó 12 veces la superficie externa del molde con un martillo de caucho para que no quedaran vacíos al interior de la mezcla, por último se enrasó y se cubrió con láminas de polietileno, esto con el propósito de mantener la humedad del concreto. Pasadas 24 ± 2 horas se desmoldaron los especímenes y se colocaron en agua a temperatura ambiente (alrededor de 26 ± 1 °C) con cal (3g/L), tal como se describe en la metodología ASTM C31.

Propiedades físicas del concreto en estado endurecido

Los ensayos de la resistencia a compresión (ASTM C-39) tanto para la muestra de referencia, como para las muestras modificadas, se realizaron por triplicado a una velocidad de carga de 0,6 MPa/s en un equipo HM de compresión simple de 1500 KN.

Factores de emisión y análisis económico de los concretos

La huella de carbono, Carbon Footprint, CF de sus iniciales en inglés, busca cuantificar la cantidad de dióxido de carbono equivalente generada durante un proceso, bien o servicio en el ambiente [23]. El cálculo de la huella de carbono tiene en cuenta la emisión de cada una de las operaciones unitarias desarrolladas durante el proceso [24], tal como se describe en la ecuación (1).

$$CF = \sum EF * Wi \quad (1)$$

Donde CF representa la huella de carbono, EF el factor de emisión y Wi representa la carga emitida por cada uno de los materiales empleados.

En la Tabla 1, se muestran los factores de emisión de cada uno de los materiales empleados para la preparación de concreto [25]. Dado que el vidrio es un material de desecho, para el cálculo del factor de emisión, se tomó en consideración la cantidad de dióxido de carbono emitido durante el proceso de triturado del vidrio.

La preparación de concretos se llevó a cabo en una mezcladora eléctrica de 600 W de potencia. Para el caso de la concretadora, el cálculo de la emisión de CO₂ se realizó como el producto entre la potencia por el tiempo de uso por el factor de emisión de la energía eléctrica. El factor de emisión de la energía eléctrica tomado en este trabajo fue de 0,21 Kg CO₂/Kwh [26].

Para evaluar el desempeño económico del concreto preparado con diferentes reemplazos, se calculó el costo por metro cubico de cada mezcla de concreto, utilizando los costos unitarios de sus materias primas (USD/Kg), los cuales se muestran en la Tabla 2. Los valores comerciales de los materiales precursores (en Colombia) fueron estimados con un factor de equivalencia de 3650 pesos colombianos/dólar.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de caracterización de los agregados se muestran en la Tabla 3.

Tal como se describe en la Tabla 3, ambos agregados mostraron un porcentaje de absorción de 0,9%, acorde con los rangos establecidos por la metodología ACI 318 (American Concrete Institute), la cual establece un 2% como la absorción máxima de los agregados. En este trabajo, previo a la preparación de las mezclas, los agregados gruesos se humedecieron en agua por

Tabla 1. Factores de emisión de los materiales.

Material	Factor de emisión (EF)
Cemento	0,874 Kg CO ₂ /Kg
Agregados finos	0,139 Kg CO ₂ /Kg
Agregados gruesos	0,048 Kg CO ₂ /Kg

Tabla 2. Precios por kilogramo de material.

Material	Precio USD /Kg
Cemento	0,151
Agregado fino	0,036
Agregado grueso	0,038
Vidrio	0,020*

* Valor equivalente al transporte de los residuos, desde el sitio de generación hasta el sitio de preparación de las mezclas.

Tabla 3. Resultados de caracterización de los agregados.

Característica	Agregado fino	Agregado grueso
Absorción (%)	0,90	0,90
Densidad aparente seca*	2580	2770
Masa Unitaria Suelta*	1610	1610
Masa unitaria compacta*	1700	1700
Modulo de finura	3,59	n.a
Tamaño máximo nominal**	n.a	25

* (Kg/m³), ** (mm), n.a no aplica.

24 h y se realizó la respectiva corrección de agua de diseño. Asimismo, se observa de la Tabla 3 que los agregados gruesos mostraron una mayor densidad (2770 Kg/m³) que los finos (2580 Kg/m³), por lo cual, se puede inferir que se requiere una mayor cantidad de pasta de mortero, lo cual, se relaciona directamente con la trabajabilidad de la mezcla. El modulo de finura, el tamaño máximo nominal y las masas unitarias sueltas y compactas de los agregados, están en el rango de los valores reportados para la elaboración de concretos

La Figura 1, muestra la distribución granulométrica de los agregados finos y gruesos y sus respectivos límites superiores (LS) e inferiores (LI).

De la Figura 1, se puede observar que solo una pequeña parte de los agregados gruesos están por fuera de los límites de gradación, sin embargo, más del 25% de los agregados finos mostraron ser más finos que los recomendados por los límites de gradación, lo que ayudaría a un mejor entrelazamiento con la pasta de cemento en el concreto.

Los resultados del diseño de la mezcla de concreto se muestran en la Tabla 4.

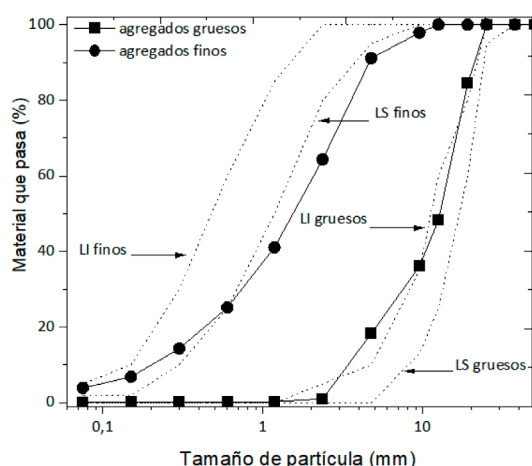


Figura 1. Distribución granulométrica de los agregados.

Donde CT representa el concreto tradicional y CT-X representan las mezclas modificadas, por ejemplo CT-5, representa el concreto tradicional con un reemplazo del 5% de los agregados finos. De los resultados de la Tabla 4, se puede observar que la mezcla tradicional contiene una mayor cantidad de agregados gruesos (alrededor del 45%) en comparación con los agregados finos (alrededor de 32%). Se ha reportado que una mayor cantidad de agregados gruesos, está relacionada con una mayor resistencia a la compresión, por ejemplo, Valencia y colaboradores [22] reportaron que diseños de mezclas con porcentajes del 58% y del 45% de agregados gruesos, presentan al día 7, resistencias de 18,3 MPa y 12,9 MPa, respectivamente.

Los resultados del asentamiento de los especímenes preparados se muestran en la Figura 2.

Tal como lo muestran los resultados experimentales de la Figura 2, el concreto tradicional presentó un asentamiento de 14 cm, el cual se encuentra dentro

del rango aceptado para ser utilizado como concreto bombeable, reportado por otros autores entre 10 cm y 15 cm [27]. De los resultados de la Figura 2 se puede observar que el asentamiento disminuye con el aumento del contenido de residuos de vidrio, para las muestras con reemplazos del 10%, 15%, 20%, 25% y 50% se encontraron disminuciones del 3,5%, 7,1%, 9,3%, 13,6%, 14,3% y 22,8%, respectivamente, la explicación más probable de esta disminución en el asentamiento es la geometría no definida de las partículas de vidrio, dado que sus bordes afilados y su superficie irregular dan como resultado una textura superficial rugosa que resiste el flujo entre las partículas, generando una menor fluidez de la mezcla y por tanto una disminución del asentamiento. La tendencia observada en este trabajo es acorde con los datos reportados previamente por Tamana y colaboradores [16], quienes reportaron que reemplazos del 20% y 40% de agregados finos por residuos de vidrio, mostraron disminuciones del 69% y 71%, respectivamente. Asimismo, nuestros resultados son compatibles con los reportes de

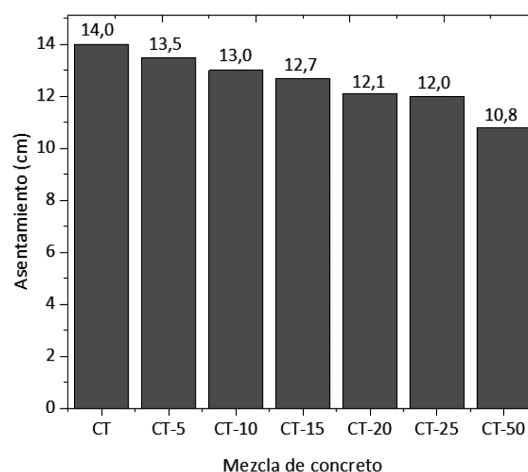


Figura 2. Asentamiento de los especímenes.

Tabla 4. Cantidades de material para el diseño de las mezclas.

Material (Kg/m ³)	CT	CT-5	CT-10	CT-15	CT-20	CT-25	CT-50
Cemento	358	358	358	358	358	358	358
Agua	158	158	158	158	158	158	158
Agregado fino	760	722	684	646	608	570	380
Agregado grueso	1058	1058	1058	1058	1058	1058	1058
Vidrio triturado	0	38	76	114	152	190	380

Ramdani y colaboradores [28], quienes reportaron disminuciones en el asentamiento de 8,4%, 17% y 34% con respecto a la mezcla tradicional, para concretos con reemplazos del 10%, 20% y 40%, respectivamente.

La resistencia a la compresión de los especímenes preparados a partir de residuos de vidrio en reemplazo de los agregados finos, se muestran en la Figura 3.

De la Figura 3 se puede observar que el concreto tradicional alcanzó una resistencia a la compresión de 21,5 MPa a los 28 días, asimismo se encontró que la resistencia se vio afectada significativamente por la incorporación de residuos de vidrio. Los concretos preparados con sustituciones del 5%, 10%, 15%, 25% y 50% presentaron resistencias a la compresión del 84%, 97%, 98%, 92% y 93%, respectivamente, estas resistencias se encuentran por encima de los límites establecidos para ser utilizados como concreto estructural (17,5 MPa). Asimismo se encontró que el concreto preparado con 20% de reemplazo presentó la mejor resistencia a la compresión (22,7 Mpa) equivalente a un aumento del 5,5% con respecto al concreto tradicional. El aumento en la resistencia a la compresión se atribuye a la naturaleza angular de los residuos de vidrio en comparación con los agregados finos, esta tendencia es acorde a los resultados previamente reportados por otros autores [29], quienes reportaron que la resistencia a la compresión en concretos preparados a partir de sustituciones de los agregados finos por residuos de vidrio, depende del enlazamiento entre

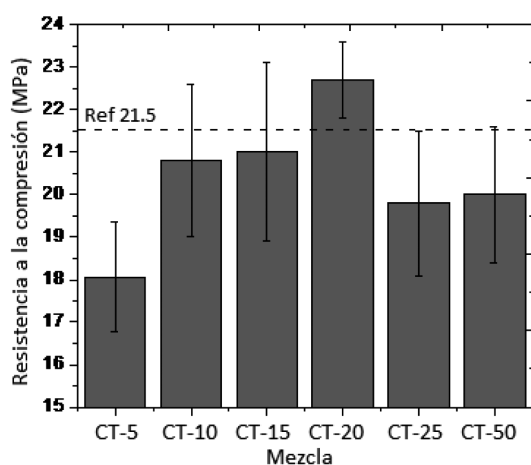


Figura 3. Resistencia de los especímenes preparados.

la matriz de cemento y el vidrio, la cual se rige en gran medida por el desarrollo de la zona de transición interfacial entre estos dos materiales. Asimismo, Tamanna y colaboradores [16], reportaron que un aumento en la cantidad de vidrio por encima del 20% debilita la unión mecánica dentro de la microestructura del concreto, lo que conlleva a una disminución en la resistencia de la zona de transición interfacial y por ende en la resistencia a la compresión. Una observación similar fue informada por Mettwally [30], quien reportó que en concretos preparados con 20% de reemplazo, se presentó un efecto puzolánico entre el cemento y el vidrio, lo cual permitió mejorar la resistencia a la compresión hasta un 4,23% en comparación con la mezcla de control. De la misma manera Batayaneh y colaboradores [31] y Arivalagan y colaboradores [32] reportaron un máximo en la resistencia en la compresión en un 20% de reemplazo, quienes asociaron el aumento de la resistencia a la textura de la superficie y la resistencia de las partículas de vidrio en comparación con la arena.

En la Figura 4 se presenta un análisis comparativo entre los costos de elaboración y la emisión de dióxido de carbono de las mezclas de concreto preparadas.

De los resultados de la Figura 4, se puede observar que un aumento en el porcentaje de reemplazo de los agregados disminuye las emisiones totales de dióxido de carbono. Para concretos preparados con porcentajes de reemplazo del 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 50% se encontró una disminución del 1,6%, 3,2%, 4,8%, 6,4%, 7,9% y 15,9%, respectivamente, de hecho, se encuentra que el concreto preparado con 20% de reemplazo, no solo permite mejorar la resistencia a la compresión con respecto al material tradicional, sino también, generar una construcción eficiente con menores emisiones de dióxido de carbono. Nuestros resultados están en concordancia con los reportes previos de Alnahhal y colaboradores [33], quienes reportaron que el reemplazo de agregados de granito triturado por agregados reciclados, redujo las emisiones de dióxido de carbono en aproximadamente 7% en comparación con el concreto de referencia. Asimismo se ha reportado que las emisiones de dióxido de carbono de concretos se reducen en un 29% cuando se incorpora un 30% de materiales cementosos suplementarios. Como se puede observar de los resultados encontrados en este trabajo y de los

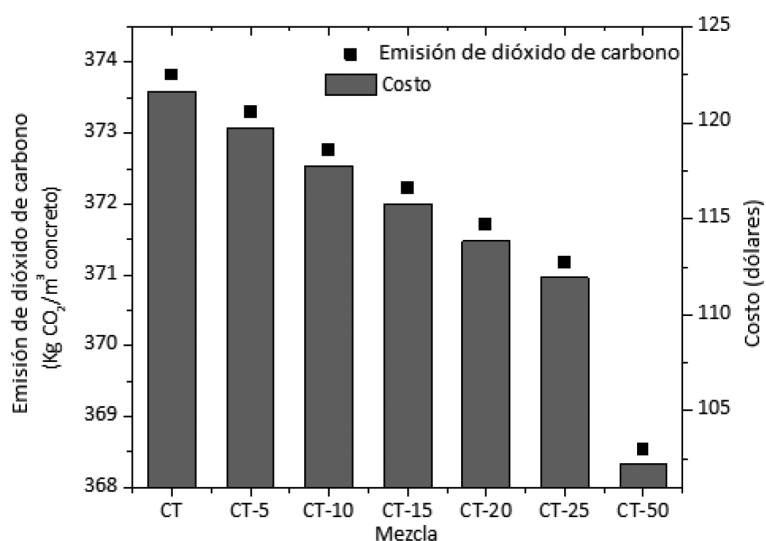


Figura 4. Costos de elaboración y emisión de dióxido de carbono en las diferentes mezclas de concreto preparadas.

reportes de la literatura, el tipo de material sustituto y el porcentaje de reemplazo, están directamente relacionados con la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, de hecho, ha sido reportado que los concretos preparados con cenizas volantes muestran una reducción de las emisiones de CO₂ (13-15%) y los que se preparan con escoria granulada de alto horno son los que muestran reducciones más sustanciales (22%). Esto se debe a que normalmente se incluye más escoria granulada de alto horno en una mezcla combinada sin cambiar significativamente las propiedades físicas y mecánicas del concreto, debido a sus propiedades cementantes naturales, por tanto un material de reemplazo con un factor de emisión más elevado, conduce a emisiones totales más bajas. Una reducción del 6,4% en las emisiones de dióxido de carbono, encontrada en este trabajo, tiene como beneficio la posibilidad de reutilizar los desechos de vidrio y conservar los recursos naturales (menor consumo de agregados), en la fabricación de un concreto ambientalmente amigable, de hecho, el proceso de extracción de agregados, es la segunda fuente más alta de emisiones de dióxido de carbono dentro del proceso de elaboración del concreto.

Asimismo, en la Figura 4 se puede observar que un aumento en el contenido de vidrio reciclado genera una disminución en los costos de producción, se encontró que para el concreto que presentó la mejor resistencia a la compresión (CT-20) se observa una

disminución del 0,7% de los costos de producción. No solo por factores ambientales, sino por factores económicos, la sustitución de los agregados finos por residuos de vidrio genera un alto potencial como material de reemplazo en la elaboración de concretos, dado que permite reducir las emisiones de CO₂, presenta resistencias dentro de los límites exigidos para elementos estructurales y disminuye los costos de producción. Teniendo en cuenta que en Colombia solo en el año 2019 se produjeron alrededor de 6906300 metros cúbicos de concreto premezclado [34], si esta cantidad de concreto se prepara con una modificación del 20% por residuos de vidrio se ahorraría alrededor de 14641356 dólares, beneficiando al sector de la construcción y la industria del reciclaje, ofreciendo una ruta alternativa para la eliminación de desechos de vidrio.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se utilizaron residuos de vidrio como reemplazo parcial de los agregados finos en la preparación de concretos modificados, se encontró que un aumento en el contenido de vidrio genera una disminución del asentamiento, debido a la forma irregular y a la textura rugosa de los residuos de vidrio en comparación con los agregados finos.

La sustitución de agregados finos por residuos de vidrio en la preparación de concretos tuvo un impacto

significativo en la resistencia a la compresión, para todas las mezclas preparadas se encontraron resistencias mayores a 17,5 MPa, siendo la mezcla preparada con un 20% de reemplazo la de mayor resistencia a la compresión (22,7 MPa).

Se observó una disminución tanto en las emisiones de dióxido de carbono como en el costo de producción de concreto a partir de vidrio reciclado, de hecho, para la mezcla que presentó la mejor resistencia a la compresión se encontraron disminuciones del 6,4% y del 0,7% en la emisión de CO₂ y en los costos de elaboración, respectivamente.

Se espera que el uso de residuos de vidrio como sustitutos de los agregados finos en la elaboración

de concretos modificados, se convierta en una estrategia adecuada para el aprovechamiento de este tipo de residuos en la producción de concretos con propiedades estructurales (resistencias mayores a 17,5 MPa), además de mitigar la problemática ambiental generada por la producción de residuos de vidrio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Cooperativa de Colombia por el apoyo financiero a través del proyecto INV 2731, Acevedo. M, Agudelo. J.J , y Valencia. S, agradecen especialmente al semillero de investigación en materiales y estructuras de la Universidad Cooperativa de Colombia.

REFERENCIAS

- [1] J. Hong, G.Q. Shen, Y. Feng, W.S.T. Lau and C. Mao. "Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: A case study in China". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 103, pp. 249-259. 2015. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.023.
- [2] W. Zhang, Q. Zheng, A. Ashour and B. Han. "Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review". *Composites. Part B: Engineering*. Vol. 189, pp. 107892. 2020. ISSN: 1359-8368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.10.1016/107892.
- [3] W. Shen, Y. Liu, B. Yan, J. Wang, P. He, C. Zhou, X. Huo, W. Zhang and G. Xu. "Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 75 N° July, pp. 618-628. 2017. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.033.
- [4] S. Monkman and M. MacDonald. "On carbon dioxide utilization as a means to improve the sustainability of ready-mixed concrete". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 167, pp. 365-375. 2017. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.194.
- [5] P. Purnell. "Response to the comment on "material Nature versus Structural Nurture: The Embodied Carbon of Fundamental Structural Elements". *Environ. Sci. Technol.* Vol. 46, pp. 3597-3598. 2012. ISSN:0013-936X. DOI:10.1021/es3007595.
- [6] M. Kalpana and A. Tayu. "Light weight steel fibre reinforced concrete: A review". *Materials Today: Proceedings*. Vol. 22, pp. 884-886. 2020. ISSN: 2214-7853. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.096.
- [7] A. Mehta and D.K. Ashish. "Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review". *Journal of Building Engineering*. Vol. 29, pp. 100888. 2020. ISSN: 2352-7102. DOI: 10.1016/j.job.2019.100888.
- [8] C.A. Cadere, M. Barbuta, B. Rosca, A. A. Serbanoiu, A. Burlacu and I. Oancea. "Engineering properties of concrete with polystyrene granules". *Procedia Manufacturing*. Vol. 22, pp. 288-293. 2018. ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.044.
- [9] K. Rashid, A. Yazdanbakhsh and M.U. Rehman. "Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 224, pp. 396-410. 2019. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.197.
- [10] A. Akhtar and A.K. Sarmah. "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective". *Journal of Cleaner Production*.

- Vol. 186, pp. 262-281. 2018. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.085.
- [11] B. Cantero, I.F. Sáez del Bosque, A. Matías, M.I. Sánchez de Rojas and C. Medina. "Inclusion of construction and demolition waste as a coarse aggregate and a cement addition in structural concrete design". Archives of Civil and Mechanical Engineering. Vol. 19 Issue 4, pp. 1338-1352. 2019. ISSN: 16449665. DOI: 10.1016/j.acme.2019.08.004.
- [12] P. Guo, W. Meng, H. Nassif, H. Gou and Y. Bao. "New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure". Construction and Building Materials. Vol. 257, pp. 119579. 2020. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119579.
- [13] K.L. Jain, G. Sancheti and L.K. Gupta. "Durability performance of waste granite and glass powder added concrete". Construction and Building Materials. Vol. 252, pp. 119075. 2020. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119075.
- [14] A. Mohajerani, J. Vajna, T.H.H. Cheung, H. Kurmus, A. Arulrajah and S. Horpibulsuk. "Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review". Construction and Building Materials. Vol. 156, pp. 443-467. 2017. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005.
- [15] A.A. Aliabdo, A.E.M. Abd Elmoaty and A.Y. Aboshama. "Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete". Construction and Building Materials. Vol. 124, pp. 866-877. 2016. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016.
- [16] N. Tamanna, R. Tuladhar and N. Sivakugan. "Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete". Construction and Building Materials. Vol. 239, pp. 17804. 2020. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117804.
- [17] Z.Z. Ismail and E.A. AL-Hashmi. "Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete". Waste Management. Vol. 29 Issue 2, pp. 655-659. 2009. ISSN: 0956-053X. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.08.012.
- [18] W. Song, J. Yi, H. Wu, X. He, Q. Song and J. Yin. "Effect of carbon fiber on mechanical properties and dimensional stability of concrete incorporated with granulated-blast furnace slag". Journal of Cleaner Production. Vol. 238, pp. 117819. 2019. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117819.
- [19] E. Crossin. "The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute". Journal of Cleaner Production. Vol. 95, pp. 101-108. 2015. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.082.
- [20] D.J.M. Flower and J.G. Sanjayan. "Green house gas emissions due to concrete manufacture". The International Journal of Life Cycle Assessment. Vol. 12 Issue 5, pp. 282-288. 2007. ISSN: 0948-3349. DOI: 10.1007/s11367-007-0327-3.
- [21] C. Herath, C. Gunasekara, D.W. Law and S. Setunge. "Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review". Construction and Building Materials. Vol. 258, pp. 120606. 2020. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120606.
- [22] J.P. Valencia Villegas, A.M. González Mesa y O.F. Arbelaez Perez. "Evaluación de las propiedades mecánicas de concretos modificados con microesferas de vidrio y residuos de llantas". Lámpsakos, N° 22, pp. 16-26. 2019. ISSN: 2145-4086. DOI: 10.21501/21454086.3283.
- [23] N.G. Kulkarni and A.B. Rao. "Carbon footprint of solid clay bricks fired in clamps of India". Journal of Cleaner Production. Vol. 135, pp. 1396-1406. 2016. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.152.
- [24] M.Ö. Arıo-lu Akan, D.G. Dhavale and J. Sarkis. "Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain". Journal Cleaner Production. Vol. 167, pp. 1195-1207. 2017. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.225.
- [25] H.H. Ghayeb, H.A. Razak and N.H.R. Sulong. "Evaluation of the CO₂ emissions of an innovative composite precast concrete structure building frame". Journal of Cleaner Production. Vol. 242, pp. 118567. 2020. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118567.
- [26] Unidad de Planeación Minero Energetica. "Factores de emisión del sistema interconectado

- nacional. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2020. URL: <https://www.google.com/search?q=factor+de+emision+de+la+energia+electrica&aq=chrome..69i57j0l6.8424j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- [27] M. Hassanpour, P. Shafigh and H. Bin Mahmud. "Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement - A review". *Construction and Building Materials*. Vol. 37, pp. 452-461. 2012. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.071.
- [28] S. Ramdani, A. Guettala, M.L. Benmalek and J.B. Aguiar. "Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder". *Journal of Building Engineering*. Vol. 21, pp. 302-311. 2019. ISSN: 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.11.003.
- [29] M. Adaway and Y. Wang. "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete -Effects on compressive strength". *Electronic Journal Structural Engineering*. Vol. 14 N° 1. 2015. pp. 116-122. 2015. ISSN: 1443-9255. DOI: 10.1377/hlthaff.2013.0625.
- [30] I.M. Metwally. "Investigations on the performance of concrete made with blended finely milled waste glass". *Advances in Structural Engineering*. Vol. 10 N° 10. pp. 47-53. 2007. ISSN: 1369-4332. DOI:10.1260/136943307780150823.
- [31] M. Batayneh, I. Marie and I. Asi. "Use of selected waste materials in concrete mixes". *Waste Management*. Vol. 27 N° 12. pp. 1870-1876. 2007. ISSN: 0956-053X. DOI:10.1016/j.wasman.2006.07.026.
- [32] S. Arivalagan and V. Sethuraman. "Experimental study on the mechanical properties of concrete by partial replacement of glass powder as fine aggregate: An environmental friendly approach". *Materials Today Proceedings*. Vol. 45 N° 7. pp. 6035-6041. 2020. ISSN:2214-7853. DOI:10.1016/j.matpr.2020.09.722.
- [33] M.F. Alnahhal, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, F. Abutaha, M.A. Alqedra and R.R. Nayaka. "Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 203, pp. 822-835. 2018. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.292.
- [34] Dane. "Estadísticas de concreto premezclado". Fecha de consulta: 10 de Septiembre de 2020. URL: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/concreto/Bol_concreto_mar_19.pdf