

ESTIMACION DE LAS EMISIONES DE CO₂ DE CONCRETOS MODIFICADOS CON RESIDUOS DE VIDRIO

Yonathan Buriticá-Cardona¹, William Andrés Cataño-Ramos², Oscar Felipe Arbeláez-Pérez³

¹Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Cooperativa de Colombia, ²Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Cooperativa de Colombia, ³Doctor en Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia, Profesor Investigador, email correspondencia: oscar.arbelaez@campusucc.edu.co

RESUMEN

El interés de incluir residuos de vidrio en el hormigón se atribuye a la creciente necesidad para su disposición, además de minimizar el uso de las materias primas empleadas en la preparación del concreto tradicional. Los residuos de vidrio tienen un efecto sobre las propiedades en estado fresco y endurecido, sin embargo, son escasos los reportes que dan cuenta de su efecto en las emisiones de CO₂. En este trabajo, se presenta una revisión de diferentes reportes que incorporan residuos de vidrio en reemplazo de los agregados o el cemento y se realizó la estimación de las emisiones de CO₂. Los resultados muestran que el reemplazo de cemento por residuos de vidrio genera un efecto positivo sobre la resistencia y disminuye las emisiones de CO₂, siendo mayor cuanto mayor es el reemplazo de cemento, se encontró una reducción del 20% en las emisiones para un 20% de reemplazo.

Palabras clave: Residuos de vidrio; Emisiones de CO₂; Impacto medioambiental; Desarrollo sostenible; Gestión de residuos.

Recibido: 01 de octubre de 2021. Aceptado: 02 de marzo de 2022

Received: October 01, 2021. Accepted: March 02, 2022.

ESTIMATING CO₂ EMISSIONS OF CONCRETE CONTAINING WASTE GLASS

ABSTRACT

Interest to include waste glass in concrete can be ascribed to the growing need for waste disposal, as well as to minimize traditional raw material usage in concrete preparation. Glass waste has a direct effect on the properties in a fresh and hardened state; however, there are few reports that account for its effect on CO₂ emissions. In this paper, a review of different reports that incorporate glass waste in replacement of aggregates or cement is presented and the estimation of CO₂ emissions was made. The results show that the replacement of cement by glass waste generates a positive effect on strength and decreases carbon dioxide emissions, being greater the greater the cement replacement, a 20% reduction in CO₂ emissions was found for a 20% replacement.

Keywords: Glass waste; CO₂ emissions; Environmental impact; Sustainable development; Waste management.

Como citar este artículo: Buriticá-Cardona, Y., Cataño-Ramos, W., A. & Arbeláez-Pérez, O., F. (2022). Estimación de las emisiones de CO₂ de concretos modificados con residuos de vidrio. Revista Politécnica, 18(35), 52-70. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v18n35a3>

1. INTRODUCCIÓN

Dada su amplia gama de aplicaciones en las diferentes formas de infraestructura, incluyendo carreteras, puentes, edificios residenciales y no residenciales, aeropuertos, terminales y puertos marítimos, entre otros, el concreto se ha convertido en el material sintético de mayor consumo a nivel mundial [1]. Según su uso, el concreto suele tener diferentes componentes, sin embargo, el cemento, los agregados finos, los agregados gruesos y el agua son los principales materiales precursores [2]. Aunque el cemento representa solo entre el 10% y el 15% del peso total del concreto, este es la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono, generando un impacto ambiental negativo dentro de la industria del concreto [3]. A medida que aumentan los requerimientos en infraestructura, también aumenta la demanda de cemento [4] y por tanto se genera una mayor emisión de dióxido de carbono [4], tal como se muestra en la figura 1.

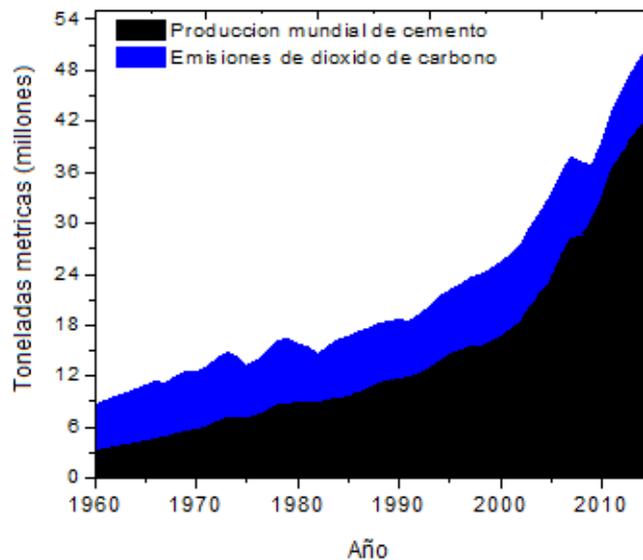
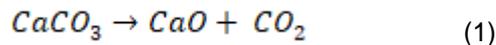


Figura 1. Producción mundial de cemento y emisiones de CO₂ entre 1960 y 2010

Tal como lo muestra la figura 1, acorde con la tendencia mostrada, se estima que las emisiones de dióxido de carbono aumenten hasta cien mil millones de toneladas métricas para el 2040. Se ha reportado que durante el proceso de producción de cemento [5], alrededor del 65% de las emisiones del dióxido de carbono se deben principalmente a la calcinación del carbonato de calcio y el 35% restante proviene de la energía necesaria para alcanzar las temperaturas del proceso de sinterización (entre 1350 °C y 1450 °C), lo cual implica la generación directa (combustión de combustibles fósiles) o indirecta (producción de electricidad) durante todo el proceso [6]. Durante la descomposición térmica del carbonato de calcio (ecuación 1) en óxido de calcio se producen 440 Kg de CO₂ por cada tonelada de clinker.



Dado que el contenido de CaO en el clinker asciende al 65%, se producen en total 510 Kg de CO₂ por cada tonelada de clinker [7]. Asimismo, las emisiones de dióxido de carbono por gasto energético, dependen del tipo de combustible (petróleo, carbón, diésel, o combustibles alternativos), de hecho, se reporta que en general, se emiten alrededor de 800-850 kg de CO₂ por cada tonelada de cemento producida [8]. La emisión de dióxido de carbono, proveniente de la industria del concreto, también es generada por otros componentes como los agregados y los aditivos superplastificantes [9]. Hossain et al [10], estimaron que se emiten 23 kg de CO₂ equivalente por cada tonelada de agregado natural procesado a partir de arena de río y 33 kg por tonelada procesada de piedra triturada.

Para el caso de los agregados gruesos, la trituración es la etapa que tiene el mayor efecto sobre las emisiones de dióxido de carbono, mientras que, para los agregados finos, las emisiones son generadas principalmente durante las etapas de cribado y lavado, las cuales no siempre son necesarias [11]. Asimismo, las altas emisiones de CO₂ son el resultado de largas distancias de transporte de los materiales al sitio de construcción de la obra. Los valores de las emisiones de dióxido de carbono para los principales componentes en la elaboración del concreto tales como: cemento [12], agregados finos [12], agregados gruesos [13], superplastificantes [14], incorporadores de aire [13], acero de refuerzo [15], agua [12] y silica fumante [16], se muestran en la figura 2.

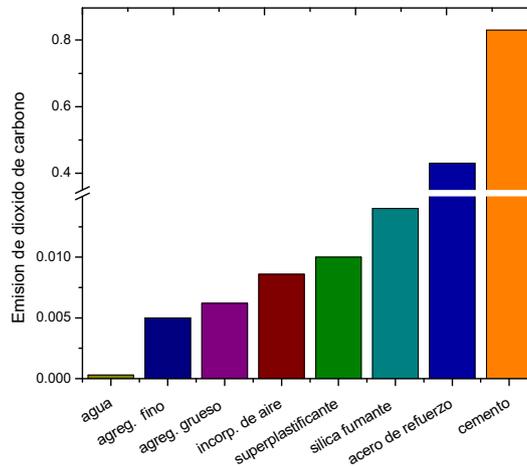


Figura 2. Emisión de dióxido de carbono de los diferentes precursores del concreto. Kg de CO₂/Kg de material

Tal como se observa en la Figura 2, el cemento tiene el mayor efecto sobre la generación de dióxido de carbono, y aunque se encuentra que la cantidad emitida por los agregados es relativamente pequeña con respecto al cemento, estos generan una amenaza para el medio ambiente, dado que sus fuentes de generación son finitas y no renovables, provocando un agotamiento de los recursos naturales dada su elevada demanda en la producción de concretos [9]. Esto plantea un desafío importante para la industria de la construcción, en la búsqueda de materiales sustitutos de los precursores tradicionales, los cuales puedan ser utilizados en la preparación de concretos modificados, de hecho, existe una elevada oferta de materiales de naturaleza orgánica e inorgánica, que dependiendo de su textura, forma, tamaño y otras propiedades, se pueden reutilizar, en la industria de la construcción como sustitutos parciales o totales de los agregados finos, gruesos y del cemento [17]. La elevada producción de materiales de desecho no biodegradables, generalmente acompañada de problemas de eliminación y efectos ambientales peligrosos, ha permitido que su incorporación en la preparación de concretos se convierta en una solución potencial de residuos.

Entre los diferentes materiales de desecho, los residuos de vidrio generan una enorme preocupación, de hecho, cada año se producen más de un millón de toneladas de residuos de vidrio en todo el mundo [18]. A diferencia de otros desechos, es un compuesto inerte y no biodegradable, que permanece durante muchos años en el suelo y en las fuentes hídricas, agotando el espacio para su disposición, por lo cual, se convierte en una amenaza para el medio ambiente [19]. Una alternativa de uso para los residuos de vidrio es triturarlo y emplearlo como reemplazo parcial o total de los agregados finos, los agregados gruesos o el cemento en la preparación de concretos modificados [20]. La utilización de residuos de vidrio en la preparación de concretos tiene múltiples ventajas tales como el bajo consumo energético asociado a los procesos de adecuación y clasificación, en algunas veces innecesarias, y la ausencia de compuestos químicos para su limpieza previo a su incorporación en el concreto, por lo cual su uso como sustituto del cemento y de los agregados ha sido ampliamente explorada por diversos autores. La figura 3, muestra el

aumento en el número de publicaciones relacionadas con la utilización de residuos de vidrio como sustituto en la preparación de concretos modificados.

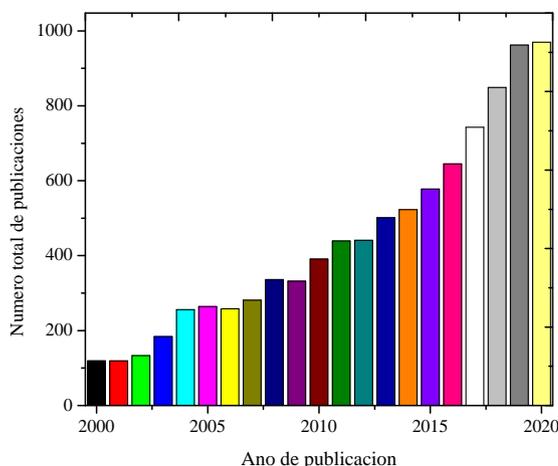


Figura 3. Número de publicaciones en Scopus en los últimos 20 años

Como se muestra en la figura 3, en los últimos 20 años, se ha visto un rápido aumento en el número de publicaciones en este tópico de investigación, de 119 artículos en el 2000 a un promedio de 927 artículos en los últimos tres años (2018-2020). Este incremento evidencia claramente el interés por la investigación en este campo. Diferentes publicaciones han presentado las propiedades en estados fresco (asentamiento y densidad) y endurecido (densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, elasticidad, resistencia a la penetración de cloro, entre otras) de concretos preparados a partir de vidrio como reemplazo de los agregados y el cemento; sin embargo, ninguno ha presentado la estimación de las emisiones de dióxido de carbono generadas durante la preparación de concretos modificados con residuos de vidrio. Por tanto, existe la necesidad de estimar el efecto de los residuos de vidrio no solo en las propiedades del concreto sino también en las emisiones de dióxido de carbono, lo cual hace que este artículo de revisión aborde una importante brecha de conocimiento.

Dada la elevada producción de CO₂ durante la preparación de concretos y la posibilidad de utilizar residuos de vidrio como sustitutos en la preparación de concretos, en este trabajo se presenta una revisión de literatura de concretos preparados a partir de residuos de vidrio como reemplazo de los agregados finos, gruesos y el cemento y la estimación de las emisiones de dióxido de carbono. Este artículo está organizado de la siguiente manera, la primera sección presenta una revisión de literatura de concretos preparados con residuos de vidrio como reemplazo de los agregados finos y gruesos y el cemento, en el asentamiento, la densidad y la resistencia a la compresión. La segunda sección se concentra en el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono de los artículos presentados en la sección 1. En la parte final se discuten los efectos de la incorporación de vidrio en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono. Se espera que esta revisión de literatura permita avanzar en el conocimiento del uso de vidrio de desecho en la preparación de concretos modificados y abordar los desafíos actuales en cuanto a su uso como concreto verde dada su potencial de baja emisión de CO₂.

2. MATERIALES Y METODO

Revisión de literatura

Esta revisión inició con la búsqueda bibliográfica en las bases de datos: Science Direct, ProQuest, Springer y Scopus, seleccionando documentos tipo artículos en inglés, publicados entre enero 2000 y diciembre del 2020. En la revisión se utilizaron las palabras claves: compressive strength, recycled waste glass, concrete

aggregates, Eco-friendly environment, CO₂ emissions. El criterio de selección de los artículos, se realizó por los títulos, posteriormente por el resumen, excluyéndose aquellos que no abordaban la producción de concretos a partir de residuos de vidrio. En esta revisión, se presentan y analizan los resultados de 23 artículos seleccionados.

Calculo de las emisiones de dióxido de carbono

La huella de carbono, busca cuantificar la cantidad de dióxido de carbono equivalente generada durante un proceso, bien o servicio en el ambiente [21]. El cálculo de las emisiones totales de dióxido de carbono (Ecuación 1) tiene en cuenta la emisión de cada una de las operaciones unitarias desarrolladas durante un proceso [22]. Con base en los factores de emisión de cada uno de los materiales utilizados, se calcularon las emisiones totales de dióxido de carbono, tal como se describe en la ecuación 1.

$$CE = \sum_{i=1}^5 M_i * F_i \quad \text{Ec.1}$$

Donde: CE representa las emisiones de CO₂ (Kg totales de dióxido de carbono, Mi denota el consumo de unidades de i-ésimo del material (i = cemento, agregado fino, agregado grueso, y agua) y Fi denota el factor de emisión de carbono por peso unitario de cada material de construcción i. Las cantidades de materiales empleadas en este estudio se tomaron de los diseños de mezcla reportados en cada uno de los artículos consultados en este trabajo. Los factores de emisión de los materiales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Emisiones de CO₂ de materiales

Material	Emisión de CO ₂ (Kg CO ₂ /Kg material)	Ref.
Cemento	0.83	[12]
Agregado fino	0.005	[12]
Agregado grueso	0.0062	[13]
Agua	0.0003	[13]

Para el cálculo del factor de emisión, del vidrio, se tomó en consideración la cantidad de dióxido de carbono emitido durante el proceso de disminución del tamaño de partícula del vidrio, el cual se calculó 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 [23].

3. RESULTADOS

La tabla 2 muestra el autor, año de publicación n, título, tipo y porcentaje de reemplazo, y las propiedades en estado fresco (asentamiento) y endurecido (densidad y resistencia a la compresión) de concretos modificados con residuos de vidrio

Tabla 2. autor, año de publicación, título, tipo y porcentaje de reemplazo, asentamiento, densidad y resistencia a la compresión de concretos modificados con residuos de vidrio

Ent.	Autor, año, tipo de reemplazo	Título artículo	% de reemplazo	Asentamiento (cm)	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia (MPa) día 28	Resultados de los autores	Ref.
1	Batayneth et al, 2007, agregado fino	Use of selected waste materials in concrete mixes.	0	7.63	2305	32.0	El aumento de residuos de vidrio provoca una reducción en el asentamiento y la densidad. La resistencia mejora con el reemplazo de los agregados finos por vidrio triturado, efecto atribuido a la textura superficial y la resistencia de las partículas de vidrio en comparación con los agregados.	[24]
2			5	7.53	2301	35.0		
3			10	7.46	2302	37.5		
4			15	7.30	2289	41.0		
5			20	7.27	2286	43.0		
6	Ismail et al, 2009, agregado fino.	Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete.	0	7.50	2477	44.0	El asentamiento disminuye con el aumento en la cantidad de vidrio, efecto relacionado con la geometría irregular de este, generando una menor fluidez de la mezcla. Asimismo, la disminución en la densidad está relacionada con la densidad de los residuos de vidrio, la cual es solo el 85% de los agregados finos. La resistencia para reemplazos del 20% fue 4.3%, superior a la muestra control; efecto asociado con las reacciones puzolánicas entre el vidrio y los componentes de la matriz de concreto	[25]
7			10	5.75	2445	40.3		
8			15	5.25	2428	42.0		
9			20	5.00	2421	45.9		
10	Sharifi et al,	Recycled glass	0	6.95	2414	48.5	El aumento en el asentamiento fue	[26]

11	2013, agregado fino	replacement as fine aggregate in self-compacting concrete	10	7.10	2300	47.9	atribuido a la baja absorción de agua y la superficie lisa del vidrio. La disminución en la densidad está relacionada con la menor densidad de los residuos de vidrio comparada con los agregados finos. Reemplazos entre 10% y el 20%, presentaron resistencias del 99 y 97 % del tradicional, respetivamente, fenómeno asociado con la mayor adherencia entre las partículas de vidrio y la pasta de cemento.	
12			20	7.20	2391	46.9		
13			30	7.25	2382	45.6		
14			40	7.35	2378	45.0		
15			50	6.55	2383	44.5		
16	Sharma et al, 2021, agregado fino	Influence of ultra-lightweight foamed glass aggregate on the strength aspects of lightweight concrete.	0	---	---	9.97	Los autores reportaron que porcentajes de reemplazo entre el 20% y 50% mejoran la resistencia a la compresión, efecto asociado al tamaño molecular del agregado de vidrio espumado.	[27]
17			10	---	---	9.91		
18			20	---	---	10.57		
19			30	---	---	12.67		
20			40	---	---	13.66		
21	50	---	---	14.91				
22	Arivalagan et al, 2020, agregado fino	Experimental study on the mechanical properties of concrete by partial replacement of glass powder as fine aggregate: An environmentally friendly approach.	0	9.70	---	23.57	El asentamiento disminuye con el aumento del porcentaje de polvo residual de vidrio. La resistencia a la compresión aumenta con porcentajes de reemplazo del 10% y del 20%, siendo mejor para este último, el cual mostró una mejora del 15%.	[28]
23			10	9.50	---	26.88		
24			20	7.20	---	27.11		
25			30	6.50	---	22.76		
26	Tamana et al, 2020, agregado	Performance of recycled waste	0	9.00	2399	38.75	Se encontró una disminución en el asentamiento, relacionado con la	[29]
27			20	6.00	2377	41.40		

ESTIMACION DE LAS EMISIONES DE CO2 DE CONCRETOS MODIFICADOS CON RESIDUOS DE VIDRIO

28	fino	glass sand as partial replacement of sand in concrete	40	6.50	2369	33.25	forma irregular y rugosa del vidrio. Se observa una mejora significativa en la resistencia a la compresión, relacionado con la naturaleza angular de los residuos de vidrio.	
29			60	4.00	2358	37.20		
30	Park et al, 2004, agregado fino	Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate.	0	13.0	---	37.00	Se encontró una relación inversa entre el contenido de vidrio y el asentamiento, sin embargo, no fue asociado con el color del vidrio sino con la geometría de los residuos. Asimismo, se reportó que el color de los residuos de vidrio no tuvo ningún efecto notable sobre la resistencia a la compresión, sin embargo, para reemplazos mayores al 30%, ésta disminuye como resultado de la disminución de la fuerza adhesiva entre la superficie de los residuos de vidrio y la pasta de cemento.	[30]
31			30	10.5	---	37.20 ^a		
32			50	8.70	---	34.00 ^b		
33			70	8.0	---	32.00 ^c		
34			30	9.8	---	36.80 ^a		
35			50	9.10	---	33.40 ^b		
35			70	7.40	---	31.97 ^c		
37			30	9.50	---	36.70 ^a		
38			50	8.4	---	35.80 ^b		
39			70	7.20	---	33.60 ^c		
40	Bisht et al, 2018, agregado fino	Sustainable production of concrete containing discarded beverage glass as fine aggregate	0	---	2340	33.3	El resultado indica que la inclusión de vidrio genera una disminución en la densidad de los especímenes y una mejora en la resistencia a la compresión con un máximo en el 20%, asociado a la reacción entre el Ca(OH)_2 presente en la hidratación del cemento y la sílice presente en los residuos provocando una mejor resistencia a la compresión.	[31]
41			18	---	2330	27.8		
42			19	---	2320	28.3		
43			20	---	2335	29.3		
44			21	---	2325	28.5		
45			22	---	2290	25.5		
46			23	---	2285	24.0		
47			24	---	2280	23.8		
48	Wang et al, 2017, agregado fino	Assessment of the compressive strength of recycled waste	0	---	---	42.0	Los resultados muestran que el aumento en el contenido de residuos de vidrio mejora la resistencia a la compresión.	[32]
49			10	---	---	52.0		
50			20	---	---	46.0		
51			30	---	---	45.0		

		LCD glass concrete using the ultrasonic pulse velocity						
52	Steyn et al, 2021, agregado fino	Concrete containing waste recycled glass, plastic and rubber as sand replacement	0	11.50	---	42.5	El aumento en el contenido de residuos de vidrio reduce la trabajabilidad como resultado de una mayor fricción asociada con la irregularidad de los mismos. Asimismo, el aumento en la resistencia es resultado de la reacción puzolánica la cual densifica la mezcla	[33]
53			15	10.50	---	47.5		
54			30	7.00	---	45.0		
55	Omoding et al, 2021, agregado grueso	Effect of using recycled waste glass coarse aggregates on the hydrodynamic abrasion resistance of concrete	0	---	---	45.2	El reemplazo de 12.5%, 25%, 50% y 100% de los agregados gruesos por residuos de vidrio, redujo la resistencia a la compresión en un 4%, 16%, 20% y 27% respectivamente.	[34]
56			12.5	---	---	43.2		
57			25	---	---	38.0		
58			50	---	---	36.4		
59			100	---	---	33.0		
60	Topcu et al, 2004, agregado grueso	Properties of concrete containing waste glass	0	9.50	2340	23.50	El aumento de vidrio no tiene una tendencia definida sobre la trabajabilidad, sin embargo, provoca una disminución en la densidad como resultado de la menor gravedad específica de los residuos de vidrio comparada con los agregados gruesos, lo cual se reflejó en una disminución en la resistencia a la compresión, para la cual se reportaron reducciones del 49% para reemplazos del 60%.	[35]
61			15	10.0	2335	21.67		
62			30	8.00	2340	19.55		
63			45	9.00	2330	16.12		
64			60	8.00	2335	12.04		
65	Terro et al, 2006, agregado	Properties of concrete made	0	8.50	---	40.0	Se reporta un aumento en el asentamiento con el aumento en el	[36]
66			10	8.20 ^h	---	43.0		

ESTIMACION DE LAS EMISIONES DE CO2 DE CONCRETOS MODIFICADOS CON RESIDUOS DE VIDRIO

67	grueso	with recycled crushed glass at elevated temperatures	25	9.30 ^h	---	39.0	porcentaje de vidrio, lo que se atribuye a la menor cohesión entre los agregados de vidrio y la pasta de cemento. Un menor asentamiento fue reportado para residuos finos, resultado de su menor área superficial, lo que redujo la fricción entre partículas. Un reemplazo del 10% de los agregados gruesos mostró la mejor resistencia a la compresión atribuido a la a falta de cohesión entre los agregados y los residuos de vidrio	
68			50	10.0 ^h	---	33.0		
69			100	9.40 ^h	---	31.0		
70			10	9.50 ⁱ	---	42.5		
71			25	9.00 ⁱ	---	40.5		
72			50	11.5 ⁱ	---	34.0		
73			100	13.0 ⁱ	---	25.0		
74	Hooi et al, 2017, cemento	Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete	0	---	738	62.5	Los resultados experimentales muestran que un aumento en el contenido del cemento es inversamente a la densidad y a la resistencia a la compresión.	[37]
75			10	---	719	59.6		
76			20	---	620	47.1		
77	Hai et al, 2019, cemento	Creep behavior of concrete containing glass powder	0	---	---	57.0	El uso de polvo de vidrio reduce la resistencia a la compresión al día 28, sin embargo, su uso en un porcentaje menor al 20% aumenta la resistencia a la compresión y en edades posteriores (90 días).	[38]
78			10	---	---	55.0		
79			20	---	---	52.0		
80			30	---	---	42.0		
81			0	---	---	63.0 ^d		
82			10	---	---	64.0 ^d		
83			20	---	---	68.0 ^d		
84	30	---	---	56.0 ^d				
85	Raju et al, 2020, cemento	Partial replacement of Ordinary Portland cement by LCD glass powder in concrete	0	7.20	---	31.0	La resistencia a la compresión mostró un efecto mejorado en los concretos preparados con 5% y 10% de reemplazo de los agregados gruesos por vidrio. Asimismo, la resistencia a la compresión fue directamente proporcional al tiempo de curado.	[39]
86			5	7.50	---	28.0		
87			5	7.50	---	40.5 ^e		
88			5	7.50	---	44.0 ^f		
89			10	7.60	---	36.0		
90			15	7.80	---	30.0		
91			20	8.00	---	27.0		
92	Islam et al,	Waste glass	0	---	---	43	La resistencia a la compresión más	[40]

93	2016, cemento	powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice	10	---	---	41	adecuada se da con un contenido de vidrio del 20%. Para este porcentaje de reemplazo, se encontró una resistencia 2% mayor al concreto tradicional a los 90 días.	
94			15	---	---	38		
95			20	---	---	37		
96			0	---	---	43		
97			20 ^d	---	---	44		
98			25	---	---	34		
99	Elaqra et al, 2019, cemento	Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete	0	15.0	2410	27	Para porcentajes de reemplazo del 10% y 20%, la resistencia disminuye a edades tempranas (28 días). Sin embargo, a los 90 días, se obtiene un aumento en la resistencia, siendo mayor en reemplazos del 20%. El aumento está relacionado con la reactividad del polvo de vidrio	[41]
100			10	17.0	2405	24		
101			10	17.0	2412	28.5		
102			20	18.0	2408	25.5		
103			20	18.0	2420	29.0		
104			30	20.0	2390	17.5		
105			30	20.0	2400	22.5		
106	Du et al, 2017, cemento	Properties of high-volume glass powder concrete.	0	---	---	41	El concreto con cemento reemplazos entre el 15% y el 45% de polvo de vidrio exhibió el mayor aumento de resistencia, asociada con a reacción puzolánica del polvo de vidrio.	[42]
107			15	---	---	44		
108			30	---	---	46		
109			45	---	---	45		
110			60	---	---	39		
111	Balasubramanian et al, 2021, cemento	Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic	0	7.20	---	23.37	El aumento en el asentamiento está relacionado con la actividad puzolánica de los residuos de vidrio generando una mayor integridad a la matriz. Se reporta un aumento en la resistencia, para un reemplazo del 20% se encontró un aumento del 5%.	[43]
112			5	7.80	---	23.64		
113			10	8.50	---	23.82		
114			15	9.00	---	24.24		
115			20	9.80	---	24.64		
116	Jain et al, 2020, cemento	Durability performance of waste granite and glass powder added concrete	0	---	---	27.5	El reemplazo de cemento por residuos de vidrio entre 5% y 20% mejora la resistencia a la compresión. El aumento de la resistencia está relacionado con la elevada superficie del polvo de	[44]
117			5	---	---	30.0		
118			10	---	---	32.0		
119			15	---	---	33.0		
120			20	---	---	34.0		
121			25	---	---	26.0		

ESTIMACION DE LAS EMISIONES DE CO2 DE CONCRETOS MODIFICADOS CON RESIDUOS DE VIDRIO

							vidrio.	
122	Cassar et al, 2008, cemento	Utilisation of imploded glass in structural concrete	0	---	---	48.5	El reemplazo del 10% del cemento por residuos de vidrio presentó la mejor resistencia a la compresión alrededor del 93% de la resistencia del material tradicional.	[45]
123			10	---	---	45.0		
124			20	---	---	40.5		
125			30	---	---	36.0		
126			40	---	---	32.5		
127			50	---	---	23.8		
128	Kamali[et al, 2015, cemento	Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials	0	12.7	2306	39.0	La incorporación de polvo de vidrio como reemplazo del cemento no muestra una tendencia definida en el asentamiento, pero mejora en la resistencia a la compresión atribuida a la propiedad puzolánica de los residuos de vidrio, generando una microestructura densificada y una adecuada unión interfacial entre los agregados y la pasta de cemento.	[46]
129			5	15.2	2313	37.0		
130			10	14.0	2331	41.0		
131			15	9.50	2331	42.5		
132			20	14.0	2306	40.5		
133			5	12.7	2312	37.5		
134			10	8.30	2331	40.0		
135			15	13.3	2319	36.0		
136	20	8.30	2331	37.0				

^{a, b, c} 30, 50 y 70% de incorporación de residuos de butadieno, ^d resistencia a 90 días, ^e resistencia al día 28, ^f resistencia al día 56

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de la tabla 2 muestran que los concretos preparados a partir de residuos de vidrio tienen un efecto diferente en el asentamiento dependiendo del tipo de reemplazo. Cuando se modifican los agregados finos se encuentra que un aumento en el porcentaje de vidrio genera una disminución en el asentamiento (entradas 1-9, 22-39, 52-54); los autores asocian la disminución en el asentamiento de las mezclas de concreto con la forma irregular de los residuos de vidrio, los cuales presentan bordes afilados y alta rugosidad, lo cual genera una disminución en la fluidez de la mezcla y por tanto del asentamiento. Asimismo, se encuentra que cuando se reemplazan los agregados gruesos por residuos de vidrio, un aumento en el contenido de estos últimos muestra una tendencia al aumento en el asentamiento (entradas 60-73) como resultado de la baja cohesión entre los agregados gruesos y las partículas de vidrio. De los resultados de la tabla 2, se aprecia que cuando los residuos de vidrio reemplazan el cemento de la mezcla, se encuentra una relación directa entre el porcentaje de reemplazo de cemento y el asentamiento (entradas 85-90, 99-105, 111-115), que en general se puede atribuir a la más baja cohesión de la pasta de cemento y los residuos de vidrio, los cuales tienen superficies impermeables, de hecho, se ha reportado que el mayor asentamiento está relacionado con la menor superficie específica del vidrio, lo que reduce la fricción entre las partículas [47].

Con respecto a la densidad de los concretos modificados se observa una tendencia a su disminución inversamente proporcional al aumento en el contenido tanto de agregados finos (entradas 1-9, 26-29, 40-47) o gruesos (entradas 128-136), este comportamiento en la mayoría de los casos reportados por los autores, fue atribuido a la menor gravedad específica de los residuos de vidrio en relación a los materiales pétreos. Asimismo, se encuentra que la densidad del concreto presenta dos tendencias en cuanto al contenido de cemento. Inicialmente, se observa un aumento de la densidad (entradas 128-130, 133-134) lo cual fue asociado con la formación de productos de hidratación que conducen a una disminución de la porosidad. En segundo lugar una disminución de la densidad en función del reemplazo de residuos de vidrio (entradas 135-136) fue asociada con la pérdida del exceso de agua libre así como de la reducción del contenido de cemento que tiene mayor peso específico [41]. Asimismo, de la tabla 2 se puede observar que los valores más altos de la densidad se alcanzaron para reemplazos de cemento del 20%, (entradas 103 y 136), las cuales representa aumentos del 4% y del 1%, respectivamente, para las cuales se ha sugerido que la reacción puzolánica entre el polvo de vidrio y el cemento se vuelve mayor y conduce a formar una mayor cantidad de productos de hidratación.

Con respecto a la resistencia a la compresión se encuentra un comportamiento completamente diferente, dependiendo del tipo de material de reemplazo, cuando se reemplazan los agregados finos, en general, los autores reportan una resistencia ligeramente superior a la mezcla tradicional (entradas 5, 9, 17-21, 23-34, 27, 31, 49-1, 54-54); los autores coinciden en asociar el aumento de la resistencia con la naturaleza fina de los residuos de vidrio, los cuales proporcionan un efecto de relleno, además, la reacción entre el hidróxido de calcio proveniente de la hidratación del cemento y la sílice presente en el vidrio permite una mayor formación de hidrato de silicato de calcio, así como la densificación de la microestructura de la zona de transición intersticial [25]. El aumento de la resistencia, también es atribuida a la naturaleza angular de los residuos de vidrio, en comparación con las partículas de agregados fino, los cuales por naturaleza de forma redondeada [18]. La mayoría de los autores coinciden en una tendencia parabólica entre el porcentaje de reemplazo de vidrio y la resistencia a la compresión con un máximo observado para el 20% de sustitución de los agregados finos donde los autores reportaron aumentos del 23% (entrada 4) [24], 4% (entrada 9) [25] 15% (entrada 24) [28], 6% (entrada 27) [29] y 9.52% (entrada 50) [32]. Igualmente se puede apreciar que el reemplazo de los agregados gruesos por residuos de vidrio, muestra una tendencia a la disminución de la resistencia (entradas 56-59, 61-64, 67-69, 72-73) con el aumento en el contenido de residuos de vidrio, donde la mayoría de los autores reportados en este trabajo coinciden en que los residuos de vidrio, dan lugar a la formación de grietas y provocan una adhesión incompleta con la interface de la pasta de cemento. Asimismo, la geometría irregular de los residuos, no permite una distribución homogénea de agregados. Con relación a la sustitución del cemento por residuos de vidrio los reportes de los autores muestran tendencias en la resistencia a la compresión directa e inversamente proporcional con el contenido de vidrio, el cual ha

sido atribuido principalmente al efecto combinado de la reacción puzolanica entre el cemento y el vidrio, así como el efecto de relleno de este último.

Como se discute previamente, el efecto que tiene la sustitución de los precursores tradicionales del concreto por residuos, se obtiene un mejor efecto en la resistencia cuando se sustituyen los finos y el cemento dado se efecto positivo en esta propiedad. Los resultados del porcentaje de incremento o reducción en las emisiones de dióxido de carbono en función del porcentaje de reemplazo del cemento, agregados gruesos y agregados finos de muestran en la figura 4.

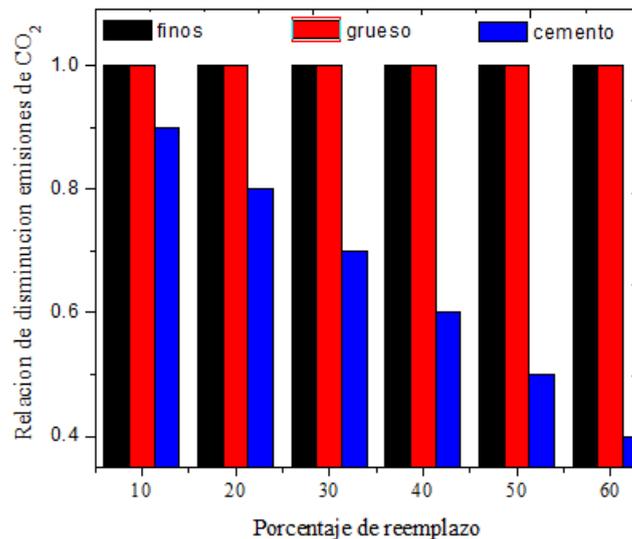


Figura 4. Porcentaje de emisiones de dióxido de carbono en función del porcentaje de reemplazo de material

Tal como se puede observar en la figura 5 el reemplazo de los agregados finos o gruesos por residuos de vidrio durante la preparación del concreto no representa cambios significativos en las emisiones de dióxido de carbono, en particular aumentos promedios del 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60% en el porcentaje de reemplazo de los agregados finos por residuos de vidrio generan aumento del 0.005%, 0.01%, 0.016%, 0.022%, 0.028% y 0.031% respectivamente. El mismo comportamiento se observa para reemplazos de los agregados gruesos, los cuales mostraron aumentos promedios en la emisión de dióxido de carbono del 0.008%, 0.016%, 0.019%, 0.022%, 0.032% y 0.036% para los mismos porcentajes de reemplazo, fenómeno atribuido a los bajos factores de emisión de ambos agregados ligeramente mayor para los agregados gruesos (0,0062 Kg CO₂/Kg Material) que para los agregados finos (0,0050 Kg CO₂/Kg Material). De hecho, los valores encontrados en este trabajo están en línea con reportes previos de otros autores [48], [49] quienes han reportado reducciones insignificantes en las emisiones totales de dióxido de carbono por efecto de modificación de los agregados. A pesar de que el reemplazo de los agregados finos por residuos de vidrio no contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂, se espera que el uso de vidrio aporte a otros beneficios ambientales, como la conservación de los recursos naturales, la reducción del impacto del acopio y la extensión del ciclo de vida de los materiales involucrados.

Asimismo, de la figura 5, se puede observar que, con la inclusión de residuos de vidrio en reemplazo del cemento, las emisiones de dióxido de carbono se reducen linealmente en relación con el aumento en el contenido residuos de vidrio, de hecho, porcentajes de reemplazo del 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60% generan una disminución promedio del 10%, 19%, 30%, 39.5%, 40% y 60% en las emisiones de dióxido de carbono comparados con el concreto tradicional. De hecho, de estos resultados se infiere que el cemento, representa la principal fuente de emisión de CO₂ durante la fabricación de concreto y por tanto su reemplazo genera mayores disminuciones. Los resultados encontrados son consistentes con los reportados por Alnahhal et al [50], quienes calcularon el 84,4% para el hormigón convencional y el 87,1% para el hormigón

con 100% de áridos gruesos de hormigón reciclado, y por Jiménez et al [51], quienes estimaron un 88,8% para los primeros y un 91,1% para los segundos.

De los resultados mostrados en la tabla 2 y de la figura 5, se encontró que el aumento en la resistencia fue más pronunciado con el reemplazo de los agregados finos, mientras que la disminución en las emisiones de dióxido de carbono es efectiva con el reemplazo del cemento. Asimismo, un análisis combinado de ambas propiedades permite identificar que el incremento en el contenido de vidrio tiene relación directa con la resistencia a la compresión e inversa con las emisiones de CO₂ de hecho, se encontró que para un porcentaje de reemplazo del 20% se encuentra el óptimo en la resistencia a la compresión y solo emiten el 78% del dióxido de carbono, con respecto al material tradicional.

Acorde con los requerimientos actuales de concreto en Colombia los cuales alcanzaron 0.45 millones de metros cúbicos, si se reemplazara el 20% del cemento por residuos de vidrio, se producirían 106 millones de kilogramos de dióxido de carbono las cuales representan el 78% de las emisiones del concreto tradicional. Los resultados encontrados en este trabajo permiten determinar la viabilidad del uso de los residuos de vidrio como material sostenible para la producción de concretos en aras de reducir las emisiones de CO₂ durante la producción de este material.

5. CONCLUSIONES

En este estudio se realizó una revisión de literatura de concretos modificados con residuos de vidrio en reemplazo de los agregados finos, gruesos y el cemento, asimismo, se incluyó el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono. Los resultados permitieron concluir que un aumento en el porcentaje de reemplazo genera un aumento en la resistencia a la compresión cuando el reemplazo incluye agregados finos o cemento, mientras que se evidencia una disminución en la resistencia cuando se reemplazan los agregados gruesos. El cálculo de las emisiones de dióxido de carbono, permitió3 determinar que reemplazar los agregados por residuos de vidrio no genera un cambio significativo en las emisiones de dióxido de carbono, sin embargo, un reemplazo hasta del 60% del cemento genera una disminución del 60% del dióxido de carbono. Sin embargo, existe una tendencia inversa entre el aumento la resistencia a la compresión y la disminución de las emisiones, por tanto, se encuentra que un reemplazo del 20% del cemento por residuos de vidrio permite disminuir las emisiones de dióxido de carbono e incrementar la resistencia a la compresión hasta en un 23%. La revisión de literatura proporciona información valiosa con respecto a la incorporación de residuos de vidrio como reemplazo del cemento, generando una alternativa no solo para exitosa de los residuos de vidrio, principalmente como que reemplazo del cemento, minimizando no solo la reducción de las emisiones de dióxido de carbono sino también la cantidad de residuos que actualmente ingresan a los vertederos y mitigan la problemática ambiental generada asociada con los mismos.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto INV2731 por el apoyo financiero en el desarrollo de este trabajo de investigación,.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Zhang, W. Zheng, Q. Ashour, A. and Han, B., (2019), Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review, *Composites Part B: Engineering*, 189, 107892, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107892>.

[2] Vishwakarma, V. and Ramachandran, D. (2018). Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A review, *Construction and Building Materials*, 162, 96–103, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.174>.

[3] Robalo K, Costa,H. do Carmo, R. and Júlio, E. (2021). Experimental development of low cement

content and recycled construction and demolition waste aggregates concrete, *Construction and Building Materials*, 273, 121680, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121680>.

[4] Malhotra, V. M. (2010). Global warming, and role of supplementary cementing materials and superplasticisers in reducing greenhouse gas emissions from the manufacturing of portland cement, *International Journal of Structural Engineering*, 1(2), 116–130, <https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2010.031480>.

[5] Kajaste R. and Hurme M. (2016), Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost, *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041–4052, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>.

[6] Bogas A. and Sousa, V. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production, *Journal of cleaner production*, 306, 127277 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>.

[7] Miller, S. A. John, V. M. Pacca, S. A. and Horvath, A. November (2016) Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050, *Cement and concrete Research*, 114, 115–124, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>.

[8] Lu, B. Shi, C. and Hou, G. (2018), Strength and microstructure of CO₂ cured low-calcium clinker, *Construction and Building Materials*, 188, 417–423, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.134>.

[9] Plaza, P. Sáez del Bosque, I. F. Frías, M. Sánchez de Rojas, M. I. and Medina, C. (2021), "Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO₂ emissions," *Construction and Building Materials*, 285, 122926, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122926>.

[10] Hossain, M. U. Poon, C. S. Lo, I. M. C. and Cheng, J. C. P. (2016), Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA, *Resour. Conserv. Recycl.*, 109, 67–77, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>.

[11] Thomas, A. Lombardi, D. R. Hunt, D. and Gaterell, M. (2009), Estimating carbon dioxide emissions for aggregate use, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability* 162(3)135–144, <https://doi.org/10.1680/ensu.2009.162.3.135>.

[12] Chiaia, B. Fantilli, A. P. Guerini, A. Volpatti, G. and Zampini, D. (2014), Eco-mechanical index for structural concrete, *Construction and Building Materials*, 67, 386–392, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.090>.

[13] Adesina, A. (2020), Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions, *Environmental Challenges*, 1, 100004, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>.

[14] Purnell P. and Black, L. (2012), Embodied carbon dioxide in concrete: Variation with common mix design parameters, *Cement and Concrete Research* 42(6), 874–877, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.02.005>.

[15] Arioğlu Akan, M. Ö. Dhavale, D. G. and Sarkis, J. (2017), Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain, *Journal of Cleaner Production*. 167, 1195–1207, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.225>.

[16] Hammond G. P. and Jones, C. I. (2008), Embodied energy and carbon in construction materials, *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy*, 161(2), 87–98, <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>.

-
- [17] Kumar, V. K. Priya, A. K. Manikandan, G. Naveen, A. S. Nitishkumar, B. and Pradeep, P. (2020), Review of materials used in light weight concrete, *Materials Today: Proceedings*, 37 (2) 3538–3539, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.425>.
- [18] Esmaeili J. and Oudah Al-Mwanas, A. (2021), A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement, *Materials Today: Proceedings* 42, 1958–1965, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.242>.
- [19] Singh, N. Li, J. and Zeng, X. (2016), Solutions and challenges in recycling waste cathode-ray tubes, *Journal of Cleaner Production*, 133, 188–200, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.132>.
- [20] Guo, P. Meng, W. Nassif, H. Gou, H. and Bao, Y. (2020), New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure, *Construction and Building Materials*, 257, 119579, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>.
- [21] Kulkarni N. G. and Rao, A. B. (2016), Carbon footprint of solid clay bricks fired in clamps of India, *Journal of Cleaner Production*, 135, 1396–1406, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.12>.
- [22] Souto-Martinez, A. Arehart, J. H. and Srubar, W. V. (2018), Cradle-to-gate CO₂e emissions vs. in situ CO₂ sequestration of structural concrete elements, *Energy and Buildings* 167, 301–311, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.042>.
- [23] Akpan P. U. and Fuls, W. F. (2021), Cycling of coal fired power plants: A generic CO₂ emissions factor model for predicting CO₂ emissions, *Energy*, 214, 119026, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119026>.
- [24] Batayneh, M. Marie, I. and Asi, I. (2007), Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Management*, 27(12), 1870–1876, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>.
- [25] Ismail Z. Z. and AL-Hashmi, E. A. (2009), Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete, *Waste Management*, 29(2), 655–659, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012>.
- [26] Sharifi, Y. Houshiar, M. and Aghebati, B. (2013), Recycled glass replacement as fine aggregate in self-compacting concrete, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 7(4) 419–428, <https://doi.org/10.1007/s11709-013-0224-8>.
- [27] Sharma, L. Taak, N. and Bhandari, M. (2021), Influence of ultra-lightweight foamed glass aggregate on the strength aspects of lightweight concrete, *Materials Today: Proceedings*, 45, 3240–3246 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.383>.
- [28] Arivalagan S. and Sethuraman, V. (2020), Experimental study on the mechanical properties of concrete by partial replacement of glass powder as fine aggregate: An environmental friendly approach, *Materials Today Proceedings*, 45(7), 6035–6041, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.722>.
- [29] Tamanna, N. Tuladhar, R. and Sivakugan, N. Apr. (2020), Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete, *Construction and Building Materials*, 239, 117804, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>.
- [30] Park, S. B. Lee, B. C. and Kim, J. H. (2004), Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and Concrete Research* 34(12) 2181–2189, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.006>.
- [31] Bisht K. and Ramana, P. V. (2018), Sustainable production of concrete containing discarded beverage

glass as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 177, 116–124, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.119>.

[32] Wang C. C. and Wang, H. Y. (2017), Assessment of the compressive strength of recycled waste LCD glass concrete using the ultrasonic pulse velocity, *Construction and Building Materials*, 137, 345–353, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.117>.

[33] Steyn, Z. C. Babafemi, A. J. Fataar, H. and Combrinck, R. (2021). Concrete containing waste recycled glass, plastic and rubber as sand replacement, *Construction and Building Materials* 269, 121242, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121242>.

[34] Omoding, N. Cunningham, L. S. and Lane-Serff, G. F. (2021), Effect of using recycled waste glass coarse aggregates on the hydrodynamic abrasion resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 268, 121177, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121177>.

[35] Topçu I. B. and Canbaz, M. (2004), Properties of concrete containing waste glass,” *Cement and Concrete Research* 34(2) 267–274, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003>.

[36] Terro, M. (2006) Properties of concrete made with recycle crushed glass at elevated temperatures. *Build. Environ.* 41(5), 633-639. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.018>

[37] Hooi L. S. and Min, P. J. (2017), Potential of Substituting Waste Glass in Aerated Light Weight Concrete, *Procedia Engineering*, 171, 633–639, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.398>.

[38] Hai He, Z. Min, Zhan, P. Gui, Du, S. Ju Liu, B. and Bin Yuan, W. (2019), Creep behavior of concrete containing glass powder, *Composites. Part B Engineering*, 166, 13–20, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.133>.

[39] Raju, A. S. Anand, K. B. and Rakesh, P. (2020), Partial replacement of Ordinary Portland cement by LCD glass powder in concrete,” *Materials. Today Proceedings.*, 12 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.661>.

[40] Islam, G. M. S. Rahman, M. H. and Kazi, N. (2017), Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 37–44, <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.10.005>.

[41] Elaqla, H. A. M. A. Haloub, A. and Rustom, R. N. (2019), Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete, *Construction and Building Materials*, 203, 75–82, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.077>.

[42] Du H. and Tan, K. H. (2017), Properties of high volume glass powder concrete, *Cement and Concrete Composites*, 75, 22–29, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010>.

[43] Balasubramanian, B. Gopala Krishna, G. V. T. Saraswathy, V. and Srinivasan, K. (2021), Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic, *Construction and Building Materials*, 278, 122400, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122400>.

[44] Jain, K. L. Sancheti, G. and Gupta, L. K. (2020), Durability performance of waste granite and glass powder added concrete, *Construction and Building Materials*, 252, 119075, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119075>.

[45] Cassar J. and Camilleri, J. (2012), Utilisation of imploded glass in structural concrete,” *Construction and Building Materials*, 29, 299–307, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.005>.

-
- [46] Kamali M. and Ghahremaninezhad,A. (2015) Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 98, 407–416, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010>.
- [47] Gokulnath V, Ramesh B, and Suvesha S, (2020) Influence on flexural properties of glass powder in self compacting concrete,” *Materials Today Proceedings*, 22, 788–792, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.153>.
- [48] Schneider,M. (2019), The cement industry on the way to a low-carbon future, *Cement and Concrete Research*, 124, 105792, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>.
- [49] Yang,K. H. Jung,Y. B. Cho,M. S. and Tae,S. H. (2015), Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete, *Journal of Cleaner Production*, 103,. 774–783, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.018>.
- [50] Alnahhal,M. F. Alengaram,U. J. Jumaat M. Z., Abutaha, Alqedra,F. M. A. and Nayaka,R. R. (2018), Assessment on engineering properties and CO2 emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 203, 822–835, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.292>.
- [51] Jiménez, L. F. Domínguez, J. A. and Vega-Azamar R. E., (2018), Carbon footprint of recycled aggregate concrete, *Advances in Civil Engineering*, 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/7949741>.

