

Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio

Oscar Felipe Arbeláez Pérez^{a,*}, Karen Alejandra Delgado Varela^b
 y Juan David Castañeda Mena^b

^a Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación termomec. Universidad Cooperativa de Colombia – Sede Medellín, Medellín, Colombia

^b Facultad de Ingeniería, Semillero de investigación en materiales y estructuras. Universidad Cooperativa de Colombia – Sede Medellín, Medellín, Colombia

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 1 de abril de 2022

Aceptado el 22 de agosto de 2022

On-line el 9 de septiembre de 2022

Palabras clave:

Ceniza de caña de azúcar

Residuos agrícolas

Propiedades mecánicas

Residuos de vidrio

Emisiones de CO₂

R E S U M E N

La producción de cemento agota los recursos naturales y emite enormes cantidades de CO₂. El uso de residuos como sustitutos del cemento es una solución práctica para producir hormigón verde. La ceniza de bagazo de caña (CBC) y los residuos de vidrio (RV) tienen potencial como materiales cementantes. Este trabajo presenta el efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña sobre las propiedades mecánicas y las emisiones de CO₂ del hormigón preparado con residuos de vidrio. Se prepararon mezclas con relaciones CBC:RV 0:1, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1 y 1:0 (CBC + RV = 20% en masa) en reemplazo del cemento. Se encontró que el asentamiento disminuyó con el aumento de CBC y de RV. La incorporación de CBC y RV no afectó directamente la densidad del hormigón debido a la similitud en sus densidades. La resistencia a compresión aumentó con la incorporación de CBC; la mezcla 3:1 presentó la mayor resistencia a compresión. Las emisiones de CO₂ disminuyeron con la incorporación de ceniza. El hormigón modificado con ceniza de bagazo de caña y residuos de vidrio es una opción potencial para el aprovechamiento de residuos y reducir las emisiones de CO₂ en la industria del hormigón.

© 2022 Los Autores. Publicado por Elsevier España, S.L.U. en nombre de SECV. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Effect of incorporation of cane bagasse ash on mechanical properties and carbon dioxide emissions of concrete containing waste glass

A B S T R A C T

The production of cement depletes natural resources and emits huge amounts of CO₂. Using waste materials as replacement for cement is a practical solution to produce green concrete. Cane bagasse ash (CBA) and waste glass (WG) have great potential as supplementary cementitious materials. This work presents the effect of the incorporation of cane bagasse ash

Keywords:

Sugar cane ash

Agricultural waste

Mechanical properties

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: oscar.arbelaez@campusucc.edu.co (O.F. Arbeláez Pérez).

<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2022.08.001>

0366-3175/© 2022 Los Autores. Publicado por Elsevier España, S.L.U. en nombre de SECV. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Waste glass
CO₂ emissions

on mechanical properties and CO₂ emissions of concrete prepared waste glass. Different CBA:WG mass ratio 0:1, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1 and 1:0 (CBA + WG = 20%) as cement replacement were prepared. The slump decreased with an increase of waste glass and sugar cane bagasse. The incorporation of sugarcane bagasse ash and waste glass it is not related with the density of concrete due to similar density between cementitious materials. The relative compressive strength increased with inclusion of CBA, the 3:1 mixture exhibited the highest relative compressive strength. The CO₂ emissions were reduced when WG and CBA were incorporated. The addition of cane bagasse ash to concrete prepared with waste glass may be a potential option to mitigate the impact of residues and to reduce the CO₂ emissions in concrete industry.

© 2022 The Authors. Published by Elsevier España, S.L.U. on behalf of SECV. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

El hormigón, mezcla de agregados gruesos, finos, cemento y agua, es el material artificial de mayor consumo a nivel mundial, su producción anual está alrededor de 5300 millones de metros cúbicos [1]. El cemento comprende entre el 10 y el 15% en peso de sus componentes, sin embargo, impacta negativamente en el medio ambiente [2]. La producción mundial de cemento en el 2020 fue alrededor de 4,1 gigatoneladas [3]. La industria del cemento ocupa el tercer lugar de consumo energético en el mundo, representando el 7% del total de energía y el segundo lugar en la emisión de dióxido de carbono, con aproximadamente el 7% de las emisiones globales [4]. Durante la fabricación del cemento Portland Ordinario (CPO), el 50% de las emisiones están asociadas a la calcinación del carbonato de calcio (CaCO₃) [5]. La emisión de dióxido de carbono se produce durante el calentamiento del carbonato a temperaturas elevadas (1450 a 1600 °C) para inducir una serie de reacciones químicas complejas [6]. La emisión de CO₂ de cada tonelada de cemento Portland Ordinario oscila entre 0,82 y 1,0 toneladas métricas [7]. Una alternativa para reducir las emisiones de dióxido de carbono en la industria del cemento es su reemplazo parcial por agentes aglutinantes alternativos [8]. Los residuos industriales y agrícolas ricos en sílice, tales como las cenizas volantes [9], el humo de sílice [10] y la ceniza de cascarilla de arroz [6], han sido empleados como sustitutos cementantes en la preparación de hormigón modificado. Esta opción representa una alternativa ambientalmente amigable para eliminar grandes cantidades de residuos, que crearían problemas ambientales si fueran almacenados o enviados a vertederos [11]. Recientemente, algunos investigadores han incorporado residuos de caña de azúcar como material cementante alternativo [12]. Cada tonelada de caña de azúcar molida produce en promedio 270 kg de bagazo, y cada tonelada de bagazo quemado genera aproximadamente 25 kg de ceniza. La ceniza de bagazo de caña se ha utilizado como material cementante alternativo en la preparación de mezclas de hormigón ambientalmente amigable [13]. Srinivasan y Sathiyaraj [14] reportaron la sustitución parcial del 5%, 15% y 25% del cemento por ceniza de bagazo de caña en la preparación de hormigón modificado; los autores notificaron un aumento en el asentamiento y una disminución de la densidad con el aumento en el contenido de bagazo de caña; de la misma

manera reportaron que la resistencia a la compresión, tracción y flexión fue mayor para un porcentaje de reemplazo del 5%. Srivastava et al. [15] dieron cuenta de la presencia de un máximo en la resistencia a la compresión para un reemplazo del 5% en hormigones preparados con reemplazos del 5%, 10%, 15% y 20% del cemento por ceniza de bagazo de caña. Kumar et al. [16] investigaron las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con reemplazos entre el 0 y 15% del cemento por ceniza de bagazo de caña, y los resultados indicaron que el hormigón preparado con 10% de reemplazo presentó un aumento del 17% en la resistencia a la compresión con respecto al hormigón tradicional. De igual forma, Jha et al. [17] exploraron el uso de ceniza de bagazo de caña como sustituto del cemento con porcentajes de reemplazo entre el 0 y 25%; los autores concluyeron que el asentamiento disminuye con el aumento del contenido de ceniza, mientras que la resistencia a la compresión y a la tracción presentaron máximos para el 10% de reemplazo; de hecho, para este porcentaje de reemplazo se encontraron aumentos del 8% y del 9% en la resistencia a la compresión y a la flexión, respectivamente. De la misma manera, Oliviera et al. [18] informaron que las mezclas de hormigón preparadas con un 10% de reemplazo del cemento por ceniza de bagazo presentaron la misma resistencia a la compresión del hormigón tradicional.

Los residuos de vidrio son una parte importante de los subproductos sólidos provenientes de la industria médica, química, automotriz, de los electrodomésticos, la construcción y en el envasado de alimentos y bebidas, entre otras [19]. Del total de vidrio producido, solo se recicla alrededor del 21%, y debido a su naturaleza no biodegradable, los residuos de vidrio ocupan gran parte de los espacios de los vertederos, generando problemas de contaminación del aire, el agua y el suelo [20]. Debido a las propiedades extremadamente estables de los residuos de vidrio, su tiempo de degradación natural supera los 1000 años, lo que lleva al desperdicio de los recursos de la tierra, así como a un aumento en los costos de su manipulación, almacenamiento y las emisiones de contaminantes. Asimismo, contienen metales pesados, que ingresan al subsuelo, contaminando las aguas subterráneas, lo que causa daños al medio ambiente [21]. La falta de espacios para nuevos vertederos es un problema que enfrentan las ciudades densamente pobladas en diferentes países. La mejor solución para superar el impacto ambiental de los residuos de vidrio es reutilizarlos, para minimizar los espacios

en los vertederos, así como generar un ahorro energético y económico [22]. Las propiedades puzolánicas de los residuos de vidrio, debido a su elevado contenido en silicio y calcio, han permitido su uso como sustituto parcial del cemento en la preparación de hormigones modificados [23]. Raju et al. [24] reportaron que la incorporación del 5%, 10%, 15% y 20% de residuos de vidrio modifica las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón tradicional. Los autores informaron de un aumento del asentamiento, directamente proporcional al contenido de vidrio. Para estos mismos hormigones, se encontró que la resistencia a la compresión del hormigón con un 5% de reemplazo (la de mayor resistencia) fue un 20%, 28% y 36% mayor que el hormigón de control, después de 7 días, 28 días y 56 días, respectivamente. Los mejores resultados de la resistencia a la flexión se observaron para este mismo porcentaje de reemplazo, con un incremento del 5,71%, en comparación con el hormigón tradicional. Kamali y Ghahremaninezhad [25] encontraron que en hormigones preparados con reemplazo parcial del 5%, 10%, 15% y 20% del cemento por residuos de vidrio, el máximo en la resistencia fue para un 20% de reemplazo, y esta aumenta con el tiempo de curado. El aumento en la resistencia a la compresión con el aumento del nivel de reemplazo del cemento fue atribuido a las propiedades puzolánicas de los residuos de vidrio, lo que generó una microestructura más y una mejor unión interfacial entre los agregados y la matriz de pasta de cemento en el hormigón [26]. La preparación de hormigones con reemplazos del 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de cemento por residuos de vidrio fue explorada por Rajendran et al. [27]. Los autores informaron que el aumento en el porcentaje de reemplazo de cemento hasta un 20% genera una mayor resistencia a la compresión, tracción y flexión, sin embargo, por encima de este valor, las resistencias disminuyen, al igual que el asentamiento. Elaqla et al. [28] investigaron el efecto del uso de residuos de vidrio como reemplazo del 10%, 20% y 30% del cemento en las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón modificado. Los autores demostraron que un aumento en el porcentaje de sustitución de los residuos de vidrio genera un aumento en el asentamiento, debido a la mayor presencia de agua libre en la matriz de hormigón, lo cual conlleva una menor densidad y una mayor absorción de agua. Asimismo, reportaron un aumento en la resistencia a la compresión con el tiempo de fraguado, observándose el valor máximo a los 90 días de fraguado para un hormigón con un 20% de reemplazo.

Los trabajos de investigación existentes han mostrado el efecto individual de la ceniza de bagazo de caña y los residuos de vidrio en las propiedades del hormigón, sin embargo, es escasa la información sobre el uso combinado de estos residuos. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades físicas y las emisiones de dióxido de carbono de hormigones preparados con residuos de vidrio. Este trabajo presenta el diseño y la preparación de mezclas y cilindros de hormigón con reemplazos del 20% en masa (ceniza de bagazo de caña + residuos de vidrio = 20%) del cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar y vidrio. Se diseñaron mezclas de hormigón con relaciones en masa de ceniza de bagazo de caña: residuos de vidrio 0:1, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1 y 1:0. Por cada mezcla se prepararon 5 cilindros de 0,1 m de diámetro y 0,2 m de longitud y se evaluaron las propiedades en estado fresco

Tabla 1 – Características de los precursores

Característica	Agregados finos	Agregados gruesos
Masa unitaria suelta (kg/m ³)	1420	1650
Masa unitaria compacta (kg/m ³)	1600	1780
Densidad aparente (kg/m ³)	2430	2310
Absorción (%)	1,75	3,73

y endurecido. Asimismo, se estimaron las emisiones de dióxido de carbono en las mezclas preparadas. Se espera que la incorporación de ceniza de bagazo de caña en hormigones preparados con residuos de vidrio como sustitutos del cemento produzca un efecto sinérgico que mejore las propiedades del hormigón con incorporación individual de cada uno de los subproductos y se convierta en una estrategia para mitigar los problemas ambientales asociados con la disposición de estos residuos con potencial uso para la producción de hormigones modificados.

Metodología

Caracterización de los materiales precursores

Los agregados finos y gruesos fueron caracterizados por análisis granulométrico acorde a la metodología ASTM D-422, utilizando una tamizadora eléctrica Tyler Rx-29 (Tyler, EE. UU.). El tamaño máximo y el tamaño máximo nominal del agregado grueso fueron 25 mm y 19 mm, respectivamente. El módulo de finura del agregado fino fue de 2,54 mm. La masa unitaria suelta y compacta (ASTM C29), la densidad aparente (ASTM C127-04) y la absorción de los agregados (ASTM C127-04) se presentan en la [tabla 1](#).

Para el diseño de las mezclas se utilizó cemento tipo Portland (Argos, cemento gris de uso general). La ceniza de bagazo de caña fue recolectada del residuo de un horno de combustión (cenizas de fondo) que utiliza bagazo de caña como fuente de energía en el proceso de producción de la panela (producto derivado de la panificación del jugo de caña y utilizado como edulcorante en la producción de alimentos y bebidas). Los residuos de vidrio fueron suministrados por la empresa de reciclaje Fundación Socya y se utilizó un molino de martillos para disminuir su tamaño de partícula. La densidad del cemento (3050 kg/m³), los residuos de vidrio (2580 kg/m³) y la ceniza de bagazo de caña (2330 kg/m³) se determinaron tal como está descrito en la metodología ASTM C 188-95. Los residuos de vidrio y la ceniza de bagazo de caña se clasificaron por análisis granulométrico acorde a la ASTM D-422. Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la [figura 1](#). El material utilizado en la preparación de las mezclas fue el que se retuvo entre 0,18 y 0,08 mm, y garantizar de esta manera que la variación de las propiedades estaba relacionada con las propiedades de los materiales cementantes suplementarios y no con las diferencias en el tamaño de partícula. Los residuos de vidrio y la ceniza de bagazo de caña se muestran en la [figura 2](#).

La composición química de los residuos de vidrio, de la ceniza de bagazo de caña y del cemento se determinó mediante fluorescencia de rayos X utilizando un

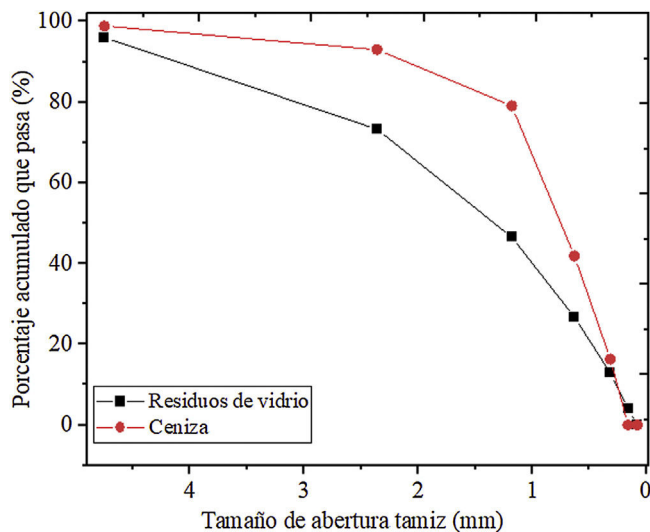


Figura 1 – Curvas de gradación del cemento, los residuos de vidrio y la ceniza de bagazo de caña.

espectrómetro de fluorescencia de rayos X Magix Pro PW-2440 Philips WDRXF (Panalytical, Holanda) equipado con un tubo de rodio, con una potencia de 4 kW. El análisis de fluorescencia se llevó a cabo con el material que pasó por el tamiz malla 100 μm previamente triturado en un molino de ágata. El material triturado fue prensado en una prensa de 120 kN para formar pastillas de 37 mm de diámetro. Los análisis de difracción de rayos X de la ceniza de bagazo de caña y de los residuos de vidrio se llevaron a cabo en un difractómetro de rayos X (DRX) XPert Panalytical Empyrean Serie II - Alpha1, 2012 (Panalytical, Holanda) con radiación $\text{CuK}\alpha$, operando a 40 kV y 40 mA, en un ángulo 2θ en un rango de operación de 5° a 70° en un tamaño de paso de $0,02^\circ/\text{s}$.

Diseño de las mezclas de hormigón

La mezcla de hormigón tradicional se diseñó tal como lo describe la metodología ACI 211.1-91, utilizando una relación agua/cemento de 0,6. La mezcla de hormigón tradicional se diseñó para alcanzar un asentamiento de 10 cm y una resistencia a la compresión de 28 MPa a los 28 días de curado. Se prepararon diferentes mezclas de hormigón modificado con un reemplazo del 20% del cemento (ceniza de bagazo de caña+residuos de vidrio=20% en masa) con relaciones de bagazo de caña:residuos de vidrio 0:1, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1 y 1:0. La [tabla 2](#) presenta las cantidades de cada uno de los

Tabla 2 – Cantidades de material kg por cada m^3 de hormigón

Mezcla ^a	Ag. grueso	Ag. fino	Agua	Cemento	Bagazo	Vidrio
0:0	946	603	182	440	0	0
0:1	946	603	182	352	0	88
1:3	946	603	182	352	22	66
1:2	946	603	182	352	29	58
1:1	946	603	182	352	44	44
2:1	946	603	182	352	59	29
3:1	946	603	182	352	66	22
1:0	946	603	182	352	88	0

^a Relación bagazo de caña:residuos de vidrio.

materiales utilizados en la preparación de cada una de las mezclas de hormigón.

Preparación de mezclas y cilindros de hormigón

Para la elaboración de la mezcla de hormigón se utilizó una mezcladora Bauker Modelo XP-PCM210 (Bauker, Japón) con una capacidad de carga de 180 kg. La elaboración de las mezclas de hormigón se llevó a cabo tal como está descrito en la metodología ASTM C192/C192M-19. La preparación de las mezclas se inició mezclando por 4 min el 75% del agua y el agregado grueso previamente humedecido por 24 h; inmediatamente se incorporó el cemento, los agregados finos, la ceniza de bagazo de caña y los residuos de vidrio y se mezcló durante 4 min. En el último paso se incorporó el 25% restante del agua y se mezcló por 4 min hasta obtener una mezcla homogénea. Finalizada la preparación de las mezclas, se midió el asentamiento tal como lo describe la metodología ASTM C143 y se prepararon 5 probetas cilíndricas de hormigón de 0,1 m de diámetro y 0,2 m de longitud. Transcurridos 24 ± 2 h, los cilindros elaborados se desencofraron y se sumergieron completamente en agua por 28 días para garantizar el proceso normal de fraguado tal como lo describe la metodología ASTM C191.

Evaluación de las propiedades mecánicas

Transcurridos 28 días, los cilindros se retiraron del agua y se secaron para alcanzar la condición de saturado superficialmente seco. La densidad de los cilindros en estado endurecido se calculó midiendo la masa y el volumen de cada uno. Se utilizó un equipo de compresión simple Pilot (Control, Italia) para calcular la resistencia a la compresión acorde a la metodología ASTM C39 empleando una velocidad de carga de 0,5 kN/s. Los



Figura 2 – (a) Ceniza de bagazo de caña. (b) Residuos de vidrio.

Tabla 3 – Factores de emisión de materiales (kg CO₂/kg material)

Material	FE (kg CO ₂ /kg)	Ref.
Cemento	0,83	[46]
Agregados gruesos	0,0062	[47]
Agregados finos	0,005	[46]
Agua	0,000196	[48]

ensayos de la densidad y de la resistencia se realizaron para 5 repeticiones, la desviación estándar de las mediciones fue calculada y presentada en las figuras.

Los análisis de la resistencia se evaluaron en términos de la resistencia relativa, tal como se describe en la ecuación 1.

$$\text{Resistencia relativa} = \frac{\text{Resistencia mezcla de hormigón}}{\text{Resistencia hormigón control}} \quad (1)$$

Donde: resistencia de la mezcla del hormigón representa la resistencia de las mezclas con sustitución del cemento y la resistencia del hormigón de control representa la resistencia del hormigón sin sustitución (0:0).

Estimación de las emisiones de dióxido de carbono

Para la estimación de las emisiones de dióxido de carbono se tomó en cuenta la cantidad de dióxido de carbono emitido para la producción de las materias primas tradicionales, tal como está descrito en la ecuación 2 [29].

$$\text{CO}_{2-e} = \sum_{i=1}^n Q_i * F_{im} \quad (2)$$

Donde CO_{2-e} representa los kgCO₂ generados por la producción de las materias primas, Q_i representa la cantidad de material utilizado y F_{im} representa el factor de emisión de los materiales precursores tradicionales, los cuales se presentan en la tabla 3.

Para los sustitutos del cemento (ceniza de bagazo de caña y residuos de vidrio), los cuales son subproductos, se tomó en consideración el dióxido de carbono emitido durante la etapa de molienda y clasificación granulométrica de los residuos, tal como se describe en la ecuación 3.

$$\text{CO}_{2-e} = \sum P * t * F_{im} \quad (3)$$

Donde CO_{2-e} representa los kgCO₂/m³ generados por consumo de energía eléctrica, P representa la potencia del equipo (kW), t representa el tiempo de uso del equipo (h) y F_{im} representa el factor emisión para la producción de energía eléctrica, que para este trabajo en particular el factor de emisión de la energía eléctrica se tomó en 0,29 kgCO₂/kWh [30]. Para la clasificación granulométrica de los residuos de vidrio y de la ceniza de bagazo de caña se utilizó una tamizadora eléctrica Tyler Rx-29 (Tyler, EE. UU.) con una potencia de 0,484 kW. Para los residuos de vidrio se tomó en cuenta la energía requerida para disminuir el tamaño de partícula del vidrio, proceso que se llevó a cabo en un molino de martillos con una potencia de 3 kW.

Tabla 4 – Composición química (FRX, % en peso) del bagazo de caña, los residuos de vidrio y el cemento

Elemento	Composición química (FRX, % en peso)		
	Ceniza de bagazo	Residuos de vidrio	Cemento
SiO ₂	77,59	69,97	19,54
K ₂ O	8,9	0,51	1,43
CaO	2,95	11,31	59,07
Al ₂ O ₃	2,52	1,26	4,65
SO ₃	2,08	0,33	4,88
MgO	1,67	0,74	3,02
P ₂ O ₅	1,63	0,03	0,19
Fe ₂ O ₃	1,24	0,28	3,90
Na ₂ O	0,45	15,41	0,91
MnO	0,45	84 ^a	0,01
Cl	0,33	0,04	250 ^a
TiO ₂	0,13	0,07	0,14
Zn	0,09	72 ^a	102 ^a
Pérdida por ignición	5,06	—	—

^a ppm.

Resultados y análisis

La tabla 4 muestra los resultados del análisis químico de los residuos de vidrio, la ceniza de bagazo de caña y el cemento.

Los resultados de la tabla 4 muestran que el SiO₂ es el principal componente de la ceniza de bagazo de caña y de los residuos de vidrio, los cuales presentaron porcentajes de SiO₂ del 77,59% y 69,97%, respectivamente. Los resultados encontrados del contenido de SiO₂ del bagazo de caña son comparables con los reportados por Srinivasan y Sathiyar [14] y Jha et al. [17], quienes reportaron contenidos del SiO₂ del 78,34% y 71,11%, respectivamente. El contenido de SiO₂ y CaO presente en los residuos de vidrio es comparable con los reportes de Ibrahim [31] (79,82% y 10,82%) y Nassar et al. [32] (72% y 10,5%). De la tabla 4, se puede apreciar que la ceniza de bagazo de caña presenta un mayor contenido de óxidos ácidos (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, 81,35%) que los residuos de vidrio (71,21%); de hecho, la composición química permite clasificar los residuos de vidrio como una puzolana tipo N y los residuos de ceniza de bagazo de caña como una puzolana tipo K, tal como se describe en la norma ASTM C618-17 [33]. El análisis químico del cemento utilizado está en línea con los reportes de otros autores para cementos similares [34].

Los difractogramas de la ceniza de bagazo de caña y de los residuos de vidrio utilizados en este trabajo se muestran en la figura 3.

De la figura 3a, se observa que el SiO₂ presente en los residuos de vidrio es de naturaleza amorfa. Los resultados de la figura 3b muestran que, para la ceniza de bagazo de caña, el cuarzo se observa como el principal compuesto cristalino, acorde con el análisis químico presentado en la tabla 4, donde se reporta un porcentaje de SiO₂ del 77,59%. La figura 3b muestra señales de difracción característicos de las fases minerales de SiO₂: cuarzo y cristobalita. La α-cristobalita fue identificada con picos de difracción característicos a 21,83° (101), 28,29° (111), 31,23° (102) y 36,06° (200) JCPDS No. 39-1425. Por su parte, el pico de difracción un ángulo 2θ = 20,78° está relacionado con

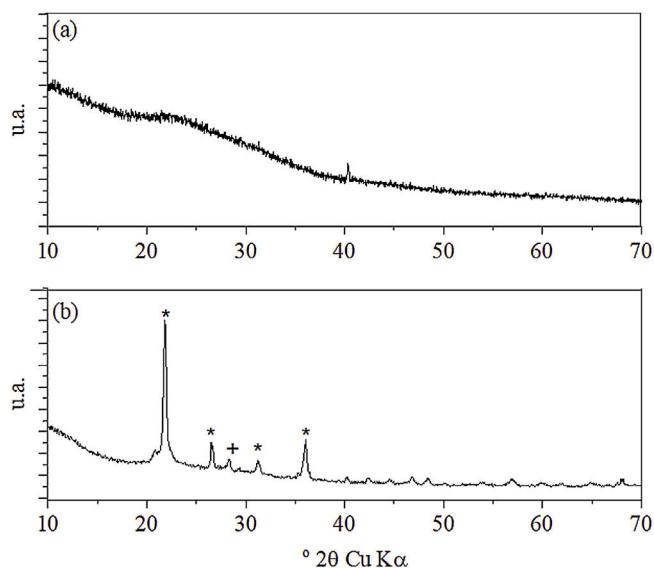


Figura 3 – (a) DRX de los residuos de vidrio. (b) DRX de la ceniza de bagazo de caña.

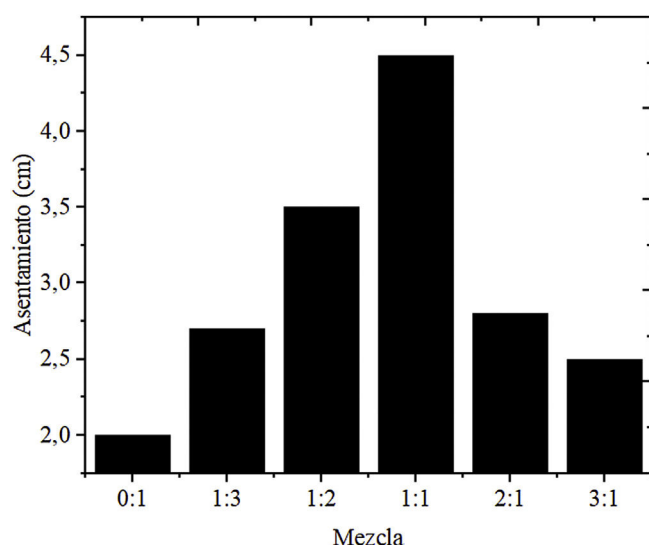


Figura 4 – Asentamiento de las muestras de hormigón preparadas.

la presencia de cuarzo acorde con JCPDS PDF No. 46-1045 [35]. La presencia de α -cristobalita indicó que durante el proceso de obtención de la ceniza se promovió la cristalización del SiO_2 .

Los resultados del asentamiento del hormigón en estado fresco se muestran en la figura 4.

El asentamiento del hormigón tradicional (8,5 cm) se vio modificado por la incorporación tanto individual como combinada de ceniza de bagazo de caña y cascarilla de arroz. La mezcla de hormigón 1:1, la cual presenta cantidades iguales de vidrio y ceniza, presentó una disminución del 47% con respecto al hormigón tradicional, sin embargo, de los resultados de la figura 2 se aprecia que el asentamiento mostró una tendencia inversa con el incremento de ceniza y de vidrio. Para las mezclas que presentan un mayor contenido de ceniza de bagazo de caña 2:1 y 3:1, se encontraron disminuciones del

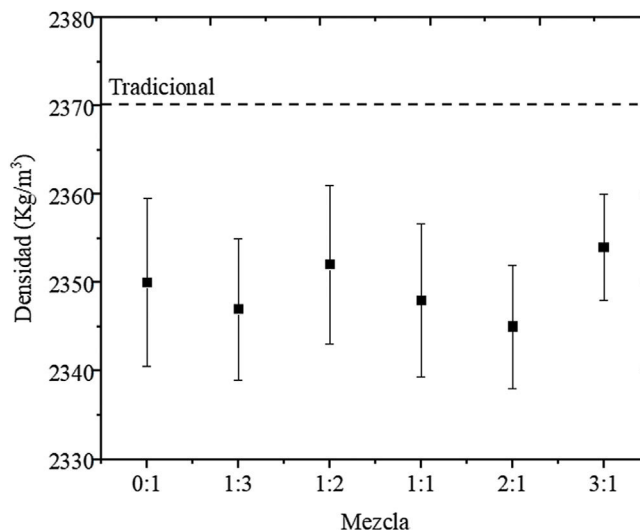


Figura 5 – Densidad de las muestras de hormigón preparadas.

38% y del 44% con respecto a la mezcla 1:1, y disminuciones del 67% y del 70% con respecto al tradicional, respectivamente. Este comportamiento está relacionado con la presencia de partículas alargadas e irregulares y la existencia de la capacidad puzolánica de las cenizas, dando lugar a una mayor demanda de agua ligante en relación con el hormigón tradicional. La disminución del asentamiento con el incremento en el contenido de ceniza también ha sido reportada por otros autores [36–40] quienes asociaron esta tendencia con la forma angular e irregular de las cenizas, así como su baja densidad y alta porosidad; de hecho, algunos de los autores reportaron la utilización de superplastificantes para mantener el asentamiento en el valor requerido [37–40]; sin embargo, en este trabajo no se consideró el uso de superplastificantes. De los resultados de la figura 4, un comportamiento similar en el asentamiento se observó para las mezclas de hormigón que tienen un mayor contenido de residuos de vidrio; de hecho, las muestras de hormigón 1:2 y 1:3 presentaron disminuciones del 22% y del 40% con respecto a la mezcla 1:2 y del 68% y del 59% con respecto al tradicional, respectivamente. Este comportamiento es asociado con la forma irregular de los residuos de vidrio, con bordes afilados y textura rugosa, lo cual genera menor fluidez de la mezcla y por tanto una disminución del asentamiento. Tan y Du [41], y Tamanna et al. [42], observaron un patrón similar en el asentamiento con el aumento en el contenido de vidrio.

Los resultados de la densidad de los hormigones preparados se muestran en la figura 5.

De los resultados de la figura 5, se observa que el hormigón tradicional presentó una densidad promedio de $2370 \pm 12 \text{ kg/m}^3$. Asimismo, se observa que la densidad del hormigón modificado con ceniza de bagazo de caña o residuos de vidrio ya sea de manera individual o modificada no presenta diferencias significativas con respecto al hormigón tradicional; de hecho, las muestras de hormigón modificado presentan una densidad promedio de 2350 kg/m^3 , tendencia asociada con la similitud entre la densidad de los residuos de vidrio y la ceniza de bagazo de caña.

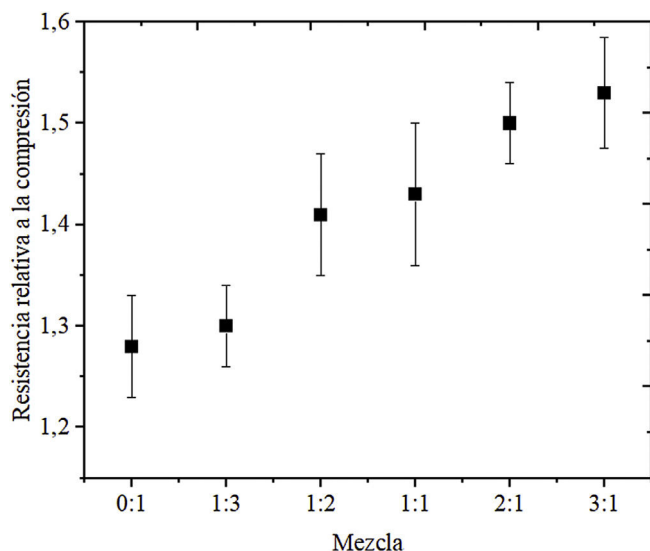


Figura 6 – Resistencia relativa a la compresión de hormigones.

Los resultados de la resistencia relativa a la compresión se muestran en la [figura 6](#).

De la [figura 6](#) se puede observar un aumento en la resistencia a la compresión con una incorporación del 20% de residuos de vidrio (0:1) la cual presentó una resistencia relativa a la compresión de 1,28. Los resultados encontrados en este trabajo son superiores a la resistencia a la compresión reportada por otros autores; de hecho, Raju et al. [24] reportaron para mezclas de hormigón modificado con 20% de reemplazo del cemento por residuos de vidrio, una resistencia relativa a la compresión de 0,93. Asimismo, Cordeiro et al. [43] reportaron una resistencia relativa a la compresión de 0,96, para este mismo porcentaje de reemplazo.

Nassar et al. [32] reportaron una resistencia relativa a la compresión de 0,95 para este mismo porcentaje de reemplazo. La tendencia mejorada de la resistencia a la compresión encontrada en este trabajo está relacionada con la reacción puzolánica de la sílice amorfa altamente reactiva de los residuos de vidrio con un elevado contenido de CaO (11,31%) que en presencia del agua de fraguado forma hidróxido de calcio, el cual permite la formación de hidrato de silicato de calcio, lo cual en consecuencia mejora la resistencia a la compresión, tal como ha sido informado previamente por otros autores [44]. De los resultados de la [figura 6](#) se puede observar que un incremento en el contenido de bagazo de caña mejora la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de hormigón; de hecho, las mezclas de hormigón 1:3, 1:2, 1:1, 2:1 y 3:1 presentaron resistencias relativas a la compresión de 1.3, 1.41, 1.43, 1.5 y 1.53, respectivamente. El aumento en la resistencia a la compresión es atribuido a las propiedades físicas y químicas del bagazo de caña, este último con un alto contenido de SiO₂ (77,59%); de hecho, se ha reportado que un elevado contenido de este componente mejora la resistencia a la compresión. Asimismo, las reacciones puzolánicas entre la sílice, la cual se encuentra en un alto porcentaje en el bagazo de caña, y el hidróxido de calcio residual presente (proveniente del CaO) en los residuos de vidrio, llegan a generar un efecto sinérgico

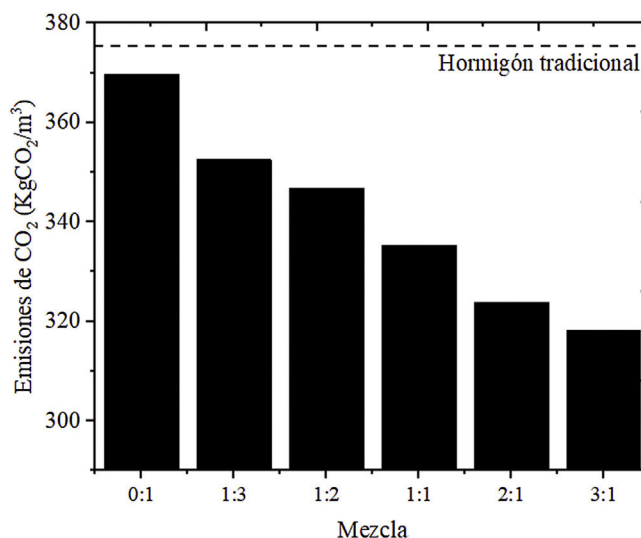


Figura 7 – Emisiones de dióxido de carbono de los hormigones preparados.

cooperativo que mejora la resistencia a la compresión. Asimismo, se ha reportado que el SiO₂ que se ha hidratado en el entorno alcalino (dadas las condiciones de también puede ser otra razón para el aumento de la resistencia a la compresión [43].

Las emisiones de dióxido de carbono de los hormigones modificados se muestran en la [figura 7](#).

Tal como se puede observar en la [figura 7](#), el hormigón tradicional presentó la mayor emisión de dióxido de carbono, la cual estuvo alrededor de 375 kg/m³, acorde con Alnahhal et al. [34] y Flower y Sanjayan [45], quienes reportaron emisiones de 369 kgCO₂/m³ y 320 kgCO₂/m³, respectivamente, para el hormigón tradicional. Asimismo, de la [figura 7](#) se puede observar una reducción significativa de las emisiones de CO₂ cuando se utilizan materiales cementantes sustitutos. Esta reducción de dióxido de carbono se debe a la dilución del cemento, material que representa la principal fuente de CO₂ en la producción del hormigón. La [figura 7](#) muestra que las emisiones de dióxido de carbono del hormigón modificado disminuyen con el aumento en el contenido de ceniza de bagazo de caña y con la disminución del contenido de vidrio; de hecho, para las mezclas de hormigón modificado 0:1, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1 y 3:1 las emisiones de dióxido de carbono disminuyeron en un 1,2%, 5,7%, 7,3%, 10,3%, 13,4% y 14,9%, tendencia relacionada con el mayor contenido de bagazo de caña, producto de desecho, que no contabiliza al total de las emisiones adicionales a la mezcla final de hormigón modificado. De hecho, para este material solo se tiene en cuenta las emisiones generadas durante el proceso de cribado, mientras que los residuos de vidrio emiten una cantidad adicional del dióxido de carbono, relacionada con la disminución del tamaño de partícula. La reducción significativa en las emisiones de CO₂ puede contribuir positivamente al medio ambiente.

Conclusiones

En este trabajo se evaluó el efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en hormigones preparados con residuos de

vidrio. Se evaluaron las propiedades mecánicas y físicas y las emisiones de dióxido de carbono de los hormigones modificados. Con base en los resultados experimentales se pueden plantear las siguientes conclusiones:

La ceniza de bagazo de caña es un compuesto cristalino con un mayor contenido de óxidos ácidos (81,35%) que los residuos de vidrio (71,21%), los cuales fueron de naturaleza amorfa. Las diferencias en la composición química estuvieron relacionadas con la diferencia en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de hormigón.

El asentamiento disminuyó con la incorporación de ceniza de bagazo de caña, tendencia asociada con las formas alargadas e irregulares de la ceniza, además de su mayor capacidad puzolánica, lo que generó una mayor demanda del agua de diseño en relación con el hormigón tradicional.

La densidad del hormigón en estado endurecido no mostró diferencias significativas con respecto al tradicional, dada la similitud en la densidad entre los sustitutos cementantes.

La resistencia relativa a la compresión del hormigón preparado con residuos de vidrio mejora ostensiblemente con el aumento de ceniza de bagazo de caña, siendo la muestra combinada 3:1 la que presentó la mayor resistencia relativa a la compresión, tendencia atribuida al efecto sinérgico entre la ceniza de bagazo de caña y los residuos de vidrio.

La muestra 3:1 disminuyó en un 14,9% las emisiones de dióxido de carbono por cada m³ de hormigón preparado en comparación con el hormigón tradicional, lo cual se plantea como una estrategia de reducción de gases de efecto invernadero asociada con la industria del hormigón.

La mejora presentada en las propiedades mecánicas, así como la disminución de las emisiones de dióxido de carbono, de los hormigones modificados con ceniza de bagazo de caña y residuos de vidrio, se convierte en una estrategia de sostenibilidad y viabilidad económica para el aprovechamiento de residuos, así como de la reducción de carga ambiental asociada con la industria del hormigón.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto INV3167 el apoyo financiero en el desarrollo de este trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Ullah, M. Irshad Qureshi, A. Ahmad, Z. Ullah, Substitution potential of plastic fine aggregate in concrete for sustainable production, *Structures*. 35 (2022) 622–637.
- [2] M.A. Khalaf, C.C. Ban, M. Ramli, The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review, *Constr. Build. Mater.* 215 (2019) 73–89.
- [3] N. Jaiboon, W. Wongsapai, S. Daroon, R. Bunchuaidee, C. Ritkrerkkrai, D. Damrongsak, Greenhouse gas mitigation potential from waste heat recovery for power generation in cement industry: The case of Thailand, *Energy Rep.* 7 (2021) 638–643.
- [4] F.N. Costa, D.V. Ribeiro, Reduction in CO₂ emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW), *J. Clean. Prod.* 276 (2020) 123302.
- [5] A. Souto-Martinez, J.H. Arehart, W.V. Srubar, Cradle-to-gate CO₂e emissions vs. in situ CO₂ sequestration of structural concrete elements, *Energy Build.* 167 (2018) 301–311.
- [6] Z. Syahida Adnan, N.F. Ariffin, S.M. Syed Mohsin, N.H. Abdul Shukor Lim, Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete, *Mater. Today Proc.* 48 (2022) 842–848.
- [7] A. Alsallman, L.N. Assi, R.S. Kareem, K. Carter, P. Ziehl, Energy and CO₂ emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete, *Clean. Environ. Syst.* 3 (2021) 100047.
- [8] S. Nie, J. Zhou, F. Yang, M. Lan, J. Li, Z. Zhang, et al., Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application, *J. Clean. Prod.* 334 (2022) 130270.
- [9] J. Krithika, G.B. Ramesh Kumar, Influence of fly ash on concrete - A systematic review, *Mater. Today Proc.* 33 (2020) 906–911.
- [10] R. Siddique, Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties, *Resour. Conserv. Recycl.* 55 (2011) 923–932.
- [11] E. Aprianti, P. Shafigh, S. Bahri, J.N. Farahani, Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review, *Constr. Build. Mater.* 74 (2015) 176–187.
- [12] B.S. Thomas, J. Yang, A. Bahurudeen, J.A. Abdalla, R.A. Hawileh, H.M. Hamada, et al., Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete - a review, *Mater. Today Sustain.* 15 (2021) 100086.
- [13] A. Joshaghani, M.A. Moeini, Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar, *Constr. Build. Mater.* 152 (2017) 818–831.
- [14] R. Srinivasan, K. Sathiya, Experimental Study on Bagasse Ash in Concrete, *Int. J. Serv. Learn. Eng. Humanit. Eng. Soc. Entrep.* 5 (2010) 60–66.
- [15] E.S. Srivastava, K. Kumar, E. Kumar, E. Kumar, Studies on Partial Replacement of Cement by Bagasse Ash in Concrete, *IJRST* 2 (2015) 43–45.
- [16] M. Azarudeen, Experimental Investigation on Strengthening of Beams using Retrofitting with Partial Replacement of Cement by Sugarcane Bagasse Ash in Concrete, *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 6 (2018) 2204–2208.
- [17] P. Jha, A.K. Sachan, R.P. Singh, Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete, *Mater. Today Proc.* 44 (2021) 419–427.
- [18] M.O. de Paula, I.F.F. Tinôco, C.S. Rodrigues, J.A.O. Saraz, Sugarcane bagasse ash as a partial-port-land-cement-replacement material | Ceniza de bagazo de caña de azúcar como material de sustitución parcial del cemento portland, *DYNA*. 77 (2010) 47–54.
- [19] V. Tanwar, K. Bisht, K.I.S. Ahmed Kabeer, P.V. Ramana, Experimental investigation of mechanical properties and resistance to acid and sulphate attack of GGBS based concrete mixes with beverage glass waste as fine aggregate, *J. Build. Eng.* 41 (2021) 102372.
- [20] C. Farinha, J. de Brito, R. Veiga, Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars, *Constr. Build. Mater.* 83 (2015) 194–206.
- [21] B. Qin, M. Lin, Z. Xu, J. Ruan, Preparing Ultra-Thin Glass from Waste Glass Containing Impurities of Household Waste by the Combined Technology of In-Situ Deposition and Vacuum Pyrolysis, *SSRN Electron. J.* 185 (2022) 106451.
- [22] Y. Jani, W. Hogland, Waste glass in the production of cement and concrete - A review, *J. Environ. Chem. Eng.* 2 (2014) 1767–1775.
- [23] J. Esmaeili, A. Oudah Al-Mwanes, A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated

- with waste glass as a partial replacement for cement, *Mater. Today Proc.* 42 (2021) 1958–1965.
- [24] A.S. Raju, K.B. Anand, P. Rakesh, Partial replacement of Ordinary Portland cement by LCD glass powder in concrete, *Mater. Today Proc.* 46 (2021) 5131–5137.
- [25] M. Kamali, A. Ghahremaninezhad, Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 407–416.
- [26] J.M. Alducin-Ochoa, J.J. Martín-del-Río, M. Torres-González, V. Flores-Alés, D. Hernández-Cruz, Performance of mortars based on recycled glass as aggregate by accelerated decay tests (ADT), *Constr. Build. Mater.* 300 (2021) 124057.
- [27] R. Rajendran, A. Sathishkumar, K. Perumal, N. Pannirselvam, N. Lingeshwaran, S. Babu Madavarapu, An experiment on concrete replacing binding material as waste glass powder, *Mater. Today Proc.* 47 (2021) 5447–5450.
- [28] H.A. Elaqla, M.A.A. Haloub, R.N. Rustom, Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete, *Constr. Build. Mater.* 203 (2019) 75–82.
- [29] T.H. Kim, C.U. Chae, G.H. Kim, H.J. Jang, Analysis of CO₂ emission characteristics of concrete used at construction sites, *Sustain.* 8 (2016) 2–14.
- [30] J.P. Rodriguez, M. Ruiz, A. Meneses, Revisión de los factores de emisión en las metodologías de huella de carbono en Colombia, *Espacios.* 41 (2020) 74–84.
- [31] K.I.M. Ibrahim, Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash, *Case Stud. Constr. Mater.* 15 (2021) e00630.
- [32] R.U.D. Nassar, P. Soroushian, M. Sufyan-Ud-Din, Long-term field performance of concrete produced with powder waste glass as partial replacement of cement, *Case Stud. Constr. Mater.* 15 (2021) e00745.
- [33] A.R. Pourkhorshidi, M. Najimi, T. Parhizkar, F. Jafarpour, B. Hillemeier, Cement & Concrete Composites Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 794–800.
- [34] M.F. Alnahhal, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, F. Abutaha, M.A. Alqedra, R.R. Nayaka, Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *J. Clean. Prod.* 203 (2018) 822–835.
- [35] S. Xue, H. Xie, H. Pink, Q. Li, B. Su, Z. Fu, Induced Transformation of Amorphous Silica to Cristobalite on Bacterial Surface, *RSC Adv.* 88 (2015) 71844–71848.
- [36] V. Torres de Sande, M. Sadique, P. Pineda, A. Bras, W. Atherton, M. Riley, Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete, *J. Build. Eng.* 39 (2021) 102277.
- [37] J.C. Arenas-Piedrahita, P. Montes-García, J.M. Mendoza-Rangel, H.Z. López Calvo, P.L. Valdez-Tamez, J. Martínez-Reyes, Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash, *Constr. Build. Mater.* 105 (2016) 69–81.
- [38] J.S.A. Neto, M.J.S. de França, N.S. de Amorim Júnior, D.V. Ribeiro, Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete, *Constr. Build. Mater.* 266 (2021) 120959.
- [39] R. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Rattanachu, W. Chalee, Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete, *Mater. Des.* 36 (2012) 597–603.
- [40] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 3352–3358.
- [41] K.H. Tan, H. Du, Use of waste glass as sand in mortar: Part i - Fresh, mechanical and durability properties, *Cem. Concr. Compos.* 35 (2013) 109–117.
- [42] N. Tamanna, R. Tuladhar, N. Sivakugan, Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete, *Constr. Build. Mater.* 239 (2020) 117804.
- [43] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares, E.M.R. Fairbairn, Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 110–115.
- [44] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 19–29.
- [45] D.J.M. Flower, J.G. Sanjayan, Green house gas emissions due to concrete manufacture, *Int. J. Life Cycle Assess.* 12 (2007) 282–288.
- [46] A. Adesina, Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions, *Environ. Challenges.* 1 (2020) 100004.
- [47] M.Ö. Anıoğlu Akan, D.G. Dhavale, J. Sarkis, Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain, *J. Clean. Prod.* 167 (2017) 1195–1207.
- [48] J.W. Lee, Y. Jang, W.S. Park, H. Yun, S.W. Kim, The Effect of Fly Ash and Recycled Aggregate on the Strength and Carbon Emission Impact of FRCCs, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 14 (2020) Article 17.