inventio
La génesis de la cultura universitaria en Morelos

Año 21, núm. 53, 2025
ISSN: 2448-9026 (digital) | DOI: 10.30973/inventio/2025.21.53/2

ARTÍCULOS

Concreto sustentable con adiciones de biomasa: un posible beneficio para el medio ambiente

Sustainable concrete with biomass additions: a possible benefit for the environment

Lorena del Carmen Santos Cortés
ORCID: 0009-0001-2051-8136, losantos@uv.mx
Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat (FICH), Universidad Veracruzana (UV)

Sergio Aurelio Zamora Castro
ORCID: 0000-0002-5237-6320, szamora@uv.mx
Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat (FICH), Universidad Veracruzana (UV)

Óscar Velázquez Camilo
ORCID: 0000-0001-6871-1878, ovelazquez@uv.mx
Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat (FICH), Universidad Veracruzana (UV)

María Elena Tejeda del Cueto
ORCID: 0000-0002-4916-8889, etejeda@uv.mx
Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat (FICH), Universidad Veracruzana (UV)

Recepción: 26/02/24. Aceptación: 24/02/25. Publicación: 06/06/25

RESUMEN

El concreto es el material de construcción más demandado a nivel mundial debido a su costo, facilidad para obtener sus componentes y la gran diversidad de formas en que se moldea. Su principal componente es el cemento; sin embargo, la producción de éste genera grandes emisiones de CO_2 que tienen impacto en el calentamiento global del planeta. Actualmente, los organismos reguladores de emisiones contaminantes son cada vez más estrictos con los países para que el sector industrial disminuya sus emisiones de CO_2. Una de las alternativas para reducirlas es realizar adiciones de biomasa a la mezcla de concreto, con la finalidad de obtener concreto igual de resistente pero que utilice menores porcentajes de cemento.

PALABRAS CLAVE

ceniza, biomasa, concreto sustentable, emisiones de CO_2, concreto estructural, concreto autorreparable

ABSTRACT

Concrete is the most demanded building material worldwide due to its cost, ease to obtain its components, and the great diversity of shapes it can be molded. Its main component is cement; however, its production generates large amounts of CO_2 emissions that have an impact on global warming. Currently, regulatory agencies of pollutant emissions are getting stricter with countries in order to reduce CO_2 emissions in the industry. One of the alternatives to reduce these emissions is adding biomass to the concrete mix in order to obtain concrete that is just as resistant but uses a lower percentage of cement.

KEYWORDS

ash, biomass, sustainable concrete, CO_2 emissions, structural concrete, self-repairing concrete

Universidad Autónoma del Estado de Morelos / Secretaría Académica
Dirección de Publicaciones y Divulgación
inventio.uaem.mx, inventio@uaem.mx

El concreto y su composición

El concreto es un material que se forma al mezclar cuatro componentes principales: cemento, agua, arena y grava, aunque también puede incluir componentes secundarios, como aire y aditivos (tabla 1, p. 3). Estos componentes forman una pasta que, en estado fresco, es moldeable, y que, con el paso del tiempo, se endurecerá y formará una piedra artificial con gran capacidad para soportar cargas de compresión. A este proceso de endurecimiento se le denomina *fraguado*.

Brunauer y Copeland (citado en Mehta y Monteiro, 1998, p. 1) señalan que el concreto "es el material más extensamente utilizado en el mundo […], el hombre no consume otro material, con excepción del agua, en tan tremendas cantidades". La utilización del concreto como material de construcción presenta algunas ventajas y desventajas, las cuales se enlistan en la tabla 2 (p. 3).

Propiedades del concreto

El concreto presenta dos estados: fresco y endurecido. En estado fresco, las propiedades más características son la consistencia y la trabajabilidad; en estado endurecido, la propiedad medida con mayor frecuencia es la resistencia a la compresión (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, 2013); pero también es importante considerar la durabilidad.

Las propiedades mencionadas pueden variar de manera considerable, dependiendo de la dosificación de los ingredientes. Matallana Rodríguez (2019) define las propiedades de la siguiente manera:

- *Trabajabilidad*: es la facilidad para manejar, transportar, colocar y consolidar el concreto por medios adecuados sin demasiado esfuerzo.
- *Consistencia*: es la facilidad para que el concreto se mantenga unido en estado fresco y no se disgregue.
- *Resistencia*: es la capacidad para soportar esfuerzos.
- *Durabilidad*: es la capacidad para resistir la acción del ambiente.

Emisiones de CO_2 de la industria cementera y calentamiento global

La fabricación de cemento podría representar hasta el 8% del total de las emisiones globales de CO_2 (Andrew, 2019). De acuerdo con la International Energy Agency (2018), alrededor del 60% de estas emisiones se debe a la calcinación de la piedra caliza y el 40% restante al uso de combustibles fósiles para generar temperaturas entre 1,350 °C y 1,450 °C durante el proceso de producción (figura 1, p. 4).

Lo anterior se debe a que, para producir una tonelada de cemento de forma tradicional, se emite al medio ambiente hasta una tonelada de CO_2 (Andrew, 2019). La generación de CO_2 varía dependiendo del tipo de combustible utilizado —fósil o biocombustible—, pero un

ISSN digital: 2448-9026 | DOI: 10.30973/inventio/2025.21.53/2

Tabla 1

Componentes del concreto y su función

Componente	Función
Cemento	Sirve para unir los agregados.
Agua	Al mezclarse con el cemento forma la pasta cementante que une a los agregados. De ella depende la trabajabilidad de la mezcla y su resistencia final.
Arena	Cuando se adiciona a la pasta cementante, su función es darle a ésta mayor consistencia y densidad, convirtiéndola así en un mortero.
Grava	Su función es aportar mayor resistencia final. Cuando se adiciona a un mortero, se convierte en concreto.
Aire	Se encuentra disperso en forma de minúsculas burbujas, las cuales generan la porosidad del concreto.
Aditivos	Mejoran las características del concreto, como los acelerantes o retardantes del fraguado y los plastificantes, para hacer una mezcla más manejable.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2

Ventajas y desventajas del concreto como material de construcción

Ventajas	Desventajas
Sus componentes se encuentran en cualquier parte del mundo.	Altera la infiltración del agua de lluvia para la recarga de los acuíferos.
La plasticidad en estado fresco le permite adoptar diversas formas.	Tiene baja resistencia a la tensión, por lo que se debe colocar acero como refuerzo.
Su resistencia a la compresión aumenta con la edad.	El acero induce una vulnerabilidad al sistema por su facilidad de sufrir corrosión, lo que reduce su durabilidad.
Fragua y adquiere resistencia a todas las temperaturas, incluso bajo el agua.	La producción de cemento (su principal componente) es altamente contaminante.
Es relativamente durable en diversas condiciones ambientales.	En edificios de grandes claros, suele incrementar el peso de la estructura, lo que aumenta su costo.
Es resistente al fuego y es más económico que otros materiales.	Tiene una alta conductividad térmica, lo que impacta en la eficiencia energética de los edificios.
Puede diseñarse con características especiales en función de su uso.	Requiere mano de obra especializada para realizar los armados del acero de refuerzo.
Puede soportar grandes cargas de compresión.	

Fuente: elaboración propia con base en Matallana Rodríguez (2019).

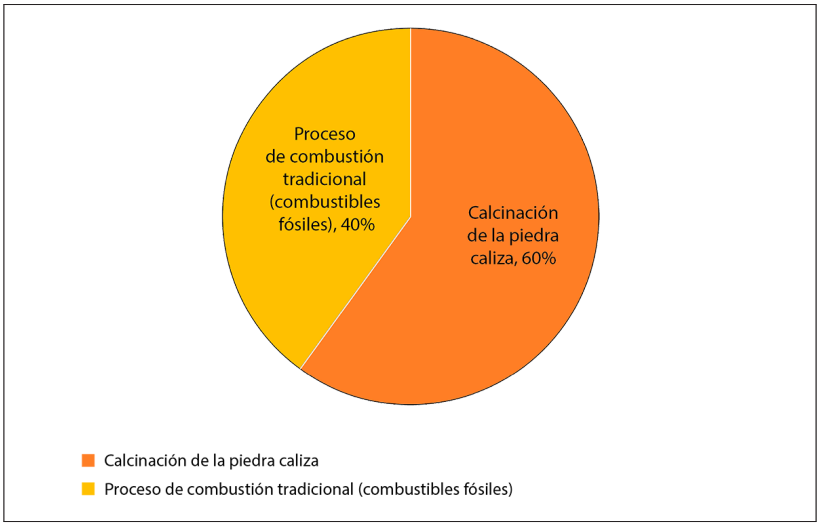
valor promedio es de alrededor de 850 kg de CO_2 por tonelada de clinker, principal componente del cemento Portland (Lu et al., 2018).

En 2020 se consumieron 4,200 millones de toneladas de cemento (Global Cement and Concrete Association [GCCA], 2021). Esto significa que, en promedio, se emiten anualmente a la atmósfera entre 3,570 y 4,200 Mt de CO_2, lo que implica un grave problema de contaminación ambiental, porque el exceso de estas emisiones se concentra en la capa inferior de la atmósfera y atrapa el calor del sol, lo cual incrementa la temperatura en la tierra y desencadena el cambio climático, por lo que es urgente detenerlas.

ISSN digital: 2448-9026 | DOI: 10.30973/inventio/2025.21.53/2

Figura 1

Contribución de emisiones de CO_2 en el proceso de fabricación de cemento



Fuente: elaboración propia.

Hacia un concreto sustentable en 2050

Ante este panorama global de contaminación ambiental, la industria cementera se ha comprometido a reducir las emisiones de CO_2 en un 25% para 2030 y llegar a las cero emisiones para 2050, con el objetivo de contribuir a la neutralidad del carbono para limitar el calentamiento global en 1.5 °C (GCCA, 2021). Resumidas, las acciones que se proponen para ello son cinco:

1. *Sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos*, como el uso de biomasa o hidrógeno, con lo cual se logra una mayor eficiencia energética.
2. *Nuevas formulaciones de cemento con bajas emisiones de co2*, que se obtiene con base en materias primas alternativas y cuyo proceso de fabricación requiere de temperaturas entre 800 y 1,100 °C, lo que reduce las emisiones de CO_2 (Goñi et al., 2011).
3. *Reutilización y reciclaje del concreto*: se refiere a la utilización de un concreto que ha sido demolido previamente y que, tras ser sometido a un proceso de trituración, se puede usar como agregado grueso para fabricar nuevo concreto.
4. *Innovación en todas las etapas del ciclo de producción del concreto*, principalmente en lo concerniente a la captura de CO_2. Se prevé que su contribución sea significativa después de 2030, cuando se tenga la infraestructura necesaria.
5. *Adiciones* que permitan reducir las cantidades de cemento utilizadas para fabricar un metro cúbico de concreto, como la biomasa o el biocarbón, el cual tiene la característica de capturar grandes cantidades de CO_2.

ISSN digital: 2448-9026 | DOI: 10.30973/inventio/2025.21.53/2

Por lo tanto, se denomina *concreto sustentable* al que utiliza técnicas innovadoras para reducir las emisiones de CO_2, de tal forma que el impacto en el ambiente sea menor que el que se produce con el concreto elaborado de forma tradicional. Algunos ejemplos son:

- *Concreto permeable*: tiene un alto grado de porosidad (2-8 mm), no contiene finos y facilita el paso del agua, lo que permite la recuperación de los mantos acuíferos.
- *Adiciones de biocarbón al concreto*: estudios como el de Tan et al. (2022) determinaron que adicionar entre 1% y 2% de biocarbón en sustitución de cemento Portland mejora la resistencia mecánica de las mezclas de concreto; pero no fue sino hasta que Zhipeng y Xianming (2023), tras un tratamiento previo al biocarbón con agua de lavado de concreto, lograron una sustitución de un 30% y una captura de un 23% de CO_2, con lo cual obtuvieron un concreto negativo en carbono, que absorbe más CO_2 del que se emite en su producción.
- *Nanoconcretos*: con las adiciones de nanopartículas se han obtenido concretos hasta seis veces más resistentes. Sin embargo, el alto costo es una limitante.

Producción de concreto sustentable con biomasa

Una de las cinco acciones de la industria cementera para reducir las emisiones de CO_2 contempla utilizar *adiciones*, con el objetivo de reducir la cantidad de cemento utilizado por metro cúbico de concreto, para lo cual es una opción el empleo de biomasa (materia orgánica de origen vegetal o animal). Cuando esta biomasa no se usa en su totalidad se denomina *biomasa residual*, como es el caso de los desechos de la industria agroalimentaria —biomasa vegetal—, de los cuales "anualmente se producen 140 mil millones de toneladas" (Thomas et al., 2021) y cuya eliminación plantea problemas económicos y ambientales. Si además la biomasa pasa por un proceso de combustión para generar energía eléctrica, el resultado son cenizas, las cuales pueden adicionarse al concreto si cumplen ciertas condiciones.

En el caso de la biomasa animal, el concreto bacteriano es un campo de investigación novedoso en el cual ya se han obtenido casos de éxito. A continuación se describen las características que debe tener la biomasa para poder adicionarse con éxito al concreto.

Concreto con biomasa animal

Este tipo de concreto se destaca por la adición de organismos biológicos vivos, principalmente bacterias, las cuales deben cumplir dos requisitos: que puedan sobrevivir en un medio altamente alcalino, como lo es el concreto (pH>14), y que sean capaces de producir carbonato de calcio ($CaCO_3$).

- *Concreto estructural con adiciones de* Bacillus megaterium. La adición de bacterias tiene como objetivo la precipitación de calcita para disminuir el tamaño de los poros capilares del concreto, lo que restringe el ingreso de agentes agresivos —cloruros,

ISSN digital: 2448-9026 | DOI: 10.30973/inventio/2025.21.53/2

Tabla 3

Ventajas y desventajas de la adición de biomasa bacteriana al concreto

Ventajas	Desventajas	Referencia
Concreto estructural (*Bacillus megaterium*)		
Reducción de los costos de mantenimiento al disminuir la porosidad. Mayor periodo de vida útil de las estructuras, con la consecuente reducción de CO_2 al disminuir la demanda de cemento. Incrementos de hasta un 24% en la resistencia a la compresión.	Se deben realizar ensayos previos para determinar la concentración óptima de bacterias.	Andalib et al. (2016).
Concreto autorreparable (*Bacillus pseudofirmus*)		
Comportamiento cinco veces más dúctil que el de un concreto convencional, debido a la autorregeneración. Incremento de un 15% de resistencia a la compresión. Reducción de la permeabilidad, lo que incrementa la durabilidad de las estructuras y disminuye los riegos de corrosión. Menores gastos de mantenimiento y reparición, con la consecuente reducción de CO_2.	Incremento del costo con respecto al concreto tradicional hasta un 40%.	Ponce de León et al. (2015).

Fuente: elaboración propia.

dióxido de carbono, entre otros— e incrementa su durabilidad. Esto se reflejará en una reducción de patologías, como la corrosión del acero de refuerzo o la carbonatación del concreto. Los resultados de Andalib et al. (2016) indican que la adición bacteriana al agua de la mezcla genera un incremento en la resistencia a la compresión.

- *Bioconcreto* (*self-healing concrete*). También conocido como *concreto autorreparable*, contiene biomasa animal (bacterias *Bacillus pseudofirmus*) y lactato de calcio, el cual es el alimento de estas bacterias. Estos microorganismos pueden sobrevivir en un ambiente alcalino, como el del concreto, por más de doscientos años. El proceso de reparación se genera cuando en el concreto agrietado ingresa aire y humedad y cuando las bacterias generan una reacción química que produce calcita para sellar esas grietas. Esta innovación fue desarrollada en 2015 por el microbiólogo holandés Henk Jonkers.

Las ventajas y desventajas de las dos investigaciones antes mencionadas se visualizan en la tabla 3.

Concreto con biomasa vegetal

Para el caso de adiciones con biomasa vegetal se tienen algunas aplicaciones con cenizas vegetales provenientes de cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, cascarilla de avena, entre otras, que han logrado incrementar las propiedades del concreto. Sin embargo, de la amplia lista de residuos de la industria agrícola ensayados se han tenido pocos casos de éxito.

ISSN digital: 2448-9026 | DOI: 10.30973/inventio/2025.21.53/2

Tabla 4

Composición química aproximada para diversos tipos de biomasa vegetal

Nombre químico	Óxido componente	Cemento Portland (Khedheyer Al-Alwan et al., 2022)	Ceniza de cascarilla de arroz (Khedheyer Al-Alwan et al., 2022)	Ceniza de bagazo de caña de azúcar (Sakib et al., 2023)	Ceniza de cascarilla de avena (Ruviaro et al., 2023)
Óxido de silicio	SiO_2	19.9	83.1	66.67	86.3
Óxido de aluminio	Al_2O_3	5.01	2.15	7.41	0
Óxido de hierro	Fe_2O_3	3.93	3.93	2.78	0
Otros componentes		71.16	10.82	23.14	13.7
		100	100	100	100
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$		28.84	89.18	76.86	86.3

Fuente: elaboración propia con base en autores citados.

En los casos de éxito, con base en los estudios que han reportado mejores comportamientos, éste depende de que la composición química contenga grandes cantidades de sílice, alúmina y óxido de hierro, y de que las temperaturas de combustión se ubiquen en el intervalo de 450 °C-700 °C (Al-Khalaf y Yousif, 1984; Ribeiro y Morelli, 2014). Si estos parámetros se cumplen, las cenizas adquieren propiedades cementantes; sin embargo, esto no siempre es posible, por lo cual son pocos los estudios que han ofrecido buenos resultados.

La tabla 4 muestra la composición química aproximada de diversos tipos de cenizas vegetales, de las cuales la mejor opción es aquella que contenga la mayor cantidad de óxido de silicio. Es por eso que dos de las cenizas más ensayadas son las de cascarilla de arroz y las de bagazo de caña de azúcar.

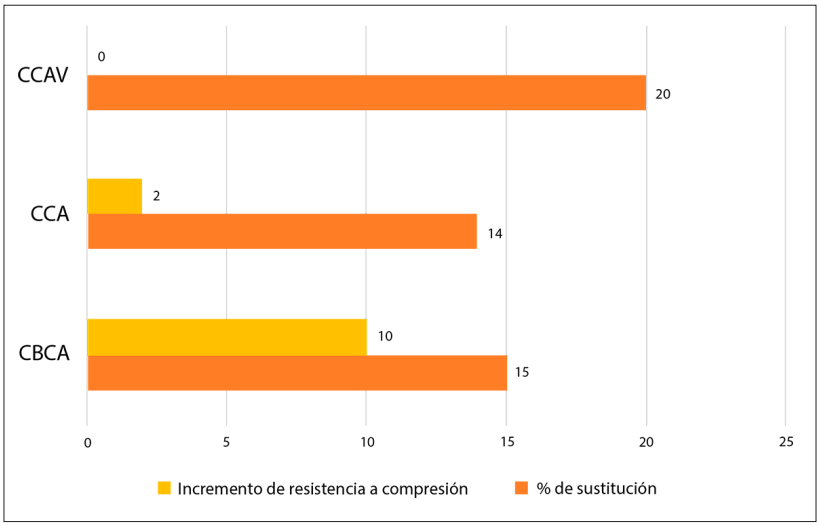
- *Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)*. Al-Khalaf y Yousif (1984) consideran a P. Kumar Mehta como uno de los pioneros en las investigaciones sobre CCA como adición del concreto. Esto se debe a que, desde los años sesenta del siglo pasado, estudió la eficiencia y el efecto del método de combustión sobre la calidad y las propiedades de la CCA.

  A partir de ahí se han realizado diversas investigaciones a nivel mundial. Por ejemplo, Khedheyer Al-Alwan et al. (2022) obtuvieron un incremento de un 10% en la resistencia a la compresión con adiciones de un 7% en peso de ceniza en sustitución de cemento, mientras que la sustitución de un 14% de CCA obtuvo sólo un incremento de resistencia de un 2%. Adicionalmente, en ambos casos se concluyó que el incremento de CCA redujo la porosidad del concreto.
- *Ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA)*. El bagazo de caña de azúcar es probablemente el residuo más común utilizado como combustible para alimentar las calderas de los ingenios azucareros. El residuo final obtenido de la combustión es una ceniza que tiene altos contenidos de óxido de silicio (tabla 4). Por tal motivo, es uno de lo más estudiados.

ISSN digital: 2448-9026 | DOI: 10.30973/inventio/2025.21.53/2

Figura 2

Comparación de resultados para diferentes tipos de biomasa



Fuente: elaboración propia.

En Bangladesh, Sakib et al. (2023) realizaron ensayos en los que se reemplazaron diferentes porcentajes de cemento Portland por CBCA previamente molida y sin tratamiento. Los resultados indicaron que, en el día 56, el concreto que contenía un 15% de CBCA como reemplazo tenía las propiedades mecánicas y de durabilidad más altas en comparación con las mezclas que no la contenían. El incremento obtenido en la resistencia a la compresión con este porcentaje fue de un 10%, además de que la adición de un 15% de CBCA reduce el costo de estas mezclas, y, por lo tanto, son más económicas.

- *Ceniza de cáscara de avena (CCAV)*. Debido a su alto poder calorífico, la CCAV se considera una excelente opción para la industria cementera. Presenta dos opciones de aplicación: como combustible para producir cemento y adicionar las cenizas resultantes al concreto.

En 2023, Ruviaro et al. realizaron un estudio acerca de la influencia que tenía la temperatura de combustión en un intervalo de 500-800 °C sobre las características de la CCAV. Añadieron a las mezclas de concreto diferentes porcentajes de cenizas de CCAV en sustitución del peso del cemento (10% y 20%). Los resultados mostraron que reemplazar hasta un 20% del cemento Portland por CCAV quemada a una temperatura de 600 °C mantiene la resistencia a la compresión de la mezcla de control a los 28 días, mientras que para otras temperaturas de combustión evaluadas la resistencia se reduce, probablemente por el contenido de materia orgánica.

ISSN digital: 2448-9026 | DOI: 10.30973/inventio/2025.21.53/2

Impacto ambiental y sostenibilidad

El principal objetivo del concreto sustentable es reducir el impacto ambiental de la producción y uso del concreto. La figura 2 muestra un análisis comparativo de los estudios revisados anteriormente. Se observa que la ceniza que tiene mejor combinación entre incremento de resistencia y mayor porcentaje de sustitución del cemento es la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), seguida por la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), la cual es casi igual que la CBCA en porcentaje de sustitución, pero su incremento de resistencia es menor. Finalmente, la ceniza de cascarilla de avena (CCAV), a pesar de lograr un porcentaje de sustitución de un 20% —por haberse obtenido en condiciones ideales de temperatura—, no tiene mejora en la resistencia mecánica.

Utilizar residuos de biomasa en la fabricación del concreto es benéfico para el ambiente; sin embargo, una desventaja de estas adiciones es la reducción en la trabajabilidad de las mezclas, lo que hace necesario agregar un aditivo superfluidificante (Thomas et al., 2021).

Conclusiones

Diversos estudios muestran que, aunque las adiciones de biomasa animal han dado buenos resultados, como en el concreto autorreparable, éste tiene un costo adicional de un 40% sobre el concreto convencional, lo cual limita su uso.

A pesar de que las adiciones de biomasa al concreto representan una opción prometedora para fabricar concreto sustentable, este tipo de estudios se han realizado en su mayoría en otros países. En México, existe poca investigación publicada en este campo, por lo que se considera una excelente oportunidad incursionar en este tema. Es necesario analizar los estudios realizados en otros países para identificar las posibles fallas y corregirlas, así como desarrollar una metodología de diseño que se pueda generalizar. Estudios sólidos en este ámbito de investigación demostrarían la factibilidad de la aplicación masiva e industrialización del concreto sustentable a un costo adecuado.

ISSN digital: 2448-9026 | DOI: 10.30973/inventio/2025.21.53/2

Referencias

Al-Khalaf, M. N. y Yousif, H. A. (1984). Use of rice husk ash in concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, *6*(4), 241-248. https://doi.org/10.1016/0262-5075(84)90019-8

Andalib, R., Abd Majid, M. Z., Hussin, M. W., Ponraj, M., Keyvanfar, A., Mirza, J. y Lee, H.-S. (2016). Optimum concentration of *Bacillus megaterium* for strengthening structural concrete. *Construction and Building Materials*, *118*, 180-193, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.142

Andrew, R. M. (2019). Global CO_2 emissions from cement production, 1928-2018. *Earth System Sciencie Data*, *11*(4), 1675-1710. https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019

Global Cement and Concrete Association (2021). *Futuro del hormigón. Plan de trabajo hacia una industria del cemento y hormigón neutra en carbono para el 2050 de la Asociación Mundial de Productores de Cemento y Hormigón*. GCCA. https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2022/10/Roadmap_Spanish_2022.pdf

Goñi, S., Guerrero, A., Macías, A. y Lorenzo, M. P. (2011). Materias primas alternativas para la fabricación de cementos más ecoeficientes de baja energía. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, *1*(1), 17-29. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427639584003

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (2013). *Guías técnicas. Hormigón en ambiente marino*. IECA. https://www.ieca.es/producto/hormigon-en-ambiente-marino/

International Energy Agency (2018). Technology roadmap – Low-Carbon transition in the cement industry. IEA, sp. https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry

Khedheyer Al-Alwan, A., Al-Bazoon, M., Mussa, F. I., Alalwan, H. A., Hatem Shadhar, M., Mohammed, M. M. y Fakhri, M. F. (2022). The impact of using rice husk ash as a replacement material in concrete: an experimental study. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, *36*(4), 249-255. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.03.002

Lu, B., Shi, C. y Hou, G. (2018). Strength and microstructure of CO_2 cured low-calcium Clinker. *Construction and Building Materials*, *188*, 417-423. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.134

Matallana Rodríguez, R., (2019). *El concreto. Fundamentos y nuevas tecnologías*. Constructora Concreto y Corona. https://conconcreto.com/wp-content/uploads/2023/02/EL-CONCRETO-Fundamentos-y-nuevas-tecnologias..pdf

Mehta, P. K. y Monteiro, P. J. M. (1998). *Concreto. Estructuras, propiedades y materiales*. IMCYC. https://es.scribd.com/document/591736662/Concreto-Mehta-Monteiro

Ponce de León, C. F., Huamani, S. K. y Sánchez, E., (2015), Los beneficios del uso de bacterias en el concreto autorregenerante. *Civilizate, 7*, pp. 36-38, https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/16153/16575

Ribeiro, D. V. y Morelli, M. R. (2014). Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of brazilian sugar cane bagasse ash (SCBA). *Materials Research*, *17*(4), 974-981. https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000093

Ruviaro, A. S., Dos Santos Lima, G. T., Silvestro, L., Taborda Barraza, M., Cavalcante Rocha, J., De Brito, J., Gleize, P. J. P. y Pelisser, F. (2023). Characterization and investigation of the use of oat husk ash as supplementary cementitious material as partial replacement of Portland cement: analysis of fresh and hardened properties and environmental assessment. *Construction and Building Materials*, *363*, 1-20. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129762

Sakib, N., Hasan, R., Mutalib, A. A., Jamil, M, Raman, S. N. y Kaish, A. B. M. A. (2023). Utilization of sugar mill waste ash as pozzolanic material in structural mortar. *Minerals*, *13*(3), 1-18. https://doi.org/10.3390/min13030324

Tan, K., Qin, Y. y Wang, J. (2022). Evaluation of the properties and carbon sequestration potential of biochar-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *314*, Parte A, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125648

Thomas, B. S., Yang, J., Mo, K. H., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A. y Ariyachandra, E. (2021). Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: a comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, *40*, 1-29. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332

Zhipeng, L. y Xianming, S. (2023). Towards sustainable industrial application of carbon-negative concrete: synergistic carbon-capture by concrete washout water and biochar. *Materials Letters*, *342*. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134368