



**COOPERACIÓN
INTERNACIONAL EN
LA INVESTIGACIÓN DE
MATERIALES
SUPLEMENTARIOS
DEL CEMENTO:
COLOMBIA – ESTADOS
UNIDOS**

Erika Daniela Lemos Micolta

Estudiante del programa de Ingeniería Civil
Universidad Javeriana Cali





Enlazando el futuro de los jóvenes Vallecaucanos

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

Grupo de Investigación Velay

Tutoría a cargo del Dr. Mirian Velay Lizancos
Universidad de Purdue

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

Grupo de Investigación MATCON

Tutoría a cargo del Dr. Manuel Alejandro Rojas Manzano
Universidad Javeriana Cali (Colombia)

Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación
Gobernación del Valle del Cauca
Instituto Financiero para el Desarrollo del Valle del Cauca INFIVALLE
Universidad Santiago de Cali

Pasantía Internacional "Nexo Global Valle del Cauca"
Santiago de Cali, Colombia
18 de marzo de 2022

COMITÉ EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI

Carlos Andrés Pérez Galindo

Rector

Claudia Liliana Zúñiga Cañón

Directora General de Investigaciones

Edward Javier Ordóñez

Editor

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Juan Diego Tovar Cardenas

librosusc@usc.edu.co



El conocimiento es de todos

Minciencias

COOPERACIÓN INTERNACIONAL EN LA INVESTIGACIÓN DE MATERIALES SUPLEMENTARIOS DEL CEMENTO: COLOMBIA – ESTADOS UNIDOS*

International Cooperation in Cement Supplementary Materials Research: Colombia – United States

Erika Daniela Lemos Micolta*

Estudiante del programa de Ingeniería Civil

Universidad Javeriana Cali

 erikalemos08@javerianacali.edu.co

Resumen. El crecimiento de la población mundial y sus implicaciones sobre el medio ambiente exige ampliar la búsqueda de nuevas tecnologías que le hagan frente al cambio climático y la contaminación ambiental. La industria de la construcción, específicamente en la producción del cemento, requiere de una serie de mejoras para reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, reducir el consumo de energía y la explotación de recursos naturales no renovables. Una de las opciones más prometedoras para mitigar el impacto ambiental de la construcción ha sido la disminución del porcentaje de Clinker Portland con la utilización de materiales suplementarios del cemento (MSC). En este artículo, se discute la investigación realizada en el marco del programa Nexo Global Valle del Cauca para la formación de jóvenes investigadores en los laboratorios de Pankow y de química de la Universidad de Purdue con la ceniza del bagazo de la caña de azúcar (CBC) como un MSC. Se concluyó que un 10% de reemplazo de ceniza puede aumentar la resistencia a la compresión de las muestras e incluso mejorar el comportamiento del mortero a mayores temperaturas de curado comparado con el mortero de referencia. En esta investigación fue clave la cooperación internacional para avanzar en el conocimiento técnico de la ceniza del bagazo y trabajar problemáticas locales con soluciones sostenibles.

Palabras clave: Materiales suplementarios del cemento, ceniza del bagazo de la caña de azúcar, sostenibilidad.

Abstract. The growth of the world's population and its implications for the environment requires an expanded search for new technologies to address climate change and environmental pollution. The construction industry, specifically in cement production, requires a series of improvements to reduce CO₂ emissions into the atmosphere, reduce energy consumption and the exploitation of non-renewable natural resources. One of the most promising options to mitigate the environmental impact of construction has been to decrease the percentage of Portland clinker with the use of supplementary cementitious materials (SCM). This article discusses research carried out in the framework of the Nexo Global Valle del Cauca program for the training of young researchers in the Pankow and chemistry laboratories at Purdue University using sugarcane bagasse ash (SCBA) as an SCM. It was concluded that 10% ash replacement can increase the compressive strength of the samples and even improve mortar performance at higher curing temperatures compared to the reference mortar. In this research, international cooperation was key to advance the technical knowledge of bagasse ash and work on local problems with sustainable solutions.

Keywords: Supplementary cementitious materials, sugarcane bagasse ash, sustainability.

* Artículo de reflexión desarrollado en el marco del programa Nexo Global -Valle con el apoyo de Velay Research Group de la Universidad de Purdue, Estados Unidos.

** Ingeniera Civil y miembro del grupo de investigación Matcon de la Universidad Javeriana Cali, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la población mundial trae consigo retos para varios sectores económicos entre ellos, el sector de la construcción (Morone, Strzałkowski, and Tani 2019; Nelson 2016; Silva, De Brito, and Dhir 2016). Uno de los mayores desafíos es la construcción de nueva infraestructura y viviendas que sean ambientalmente sostenibles (Coppola et al. 2019; GCCA 2020; United Nations 2018). Pero ¿por qué se debe tener en cuenta la sostenibilidad a la hora de construir? Parece obvia la pregunta dado que, en las últimas décadas, se ha popularizado el concepto de sostenibilidad (Ayarkwa et al. 2022), pero de hecho, el sector de la construcción no siempre desarrolla productos y procesos con leve impacto en el medio ambiente (Liu et al. 2021; Nithya and Ramasamy 2021), aun así, se debe dejar claro que todo proceso dejará huella en el ambiente y lo que se necesita es garantizar una serie de condiciones que permitan reducir los efectos negativos de la intervención humana en el planeta.

El aumento de la temperatura de la Tierra es uno de los aspectos ambientales más preocupantes (Romero-García et al. 2022). Los gases de efecto invernadero (GEI) regulan la temperatura del planeta, pero el aumento de estos gases reduce la salida de calor y por ende, aumenta la temperatura (Scibioh and Viswanathan 2018). Entre los GEI, el dióxido de carbono (CO₂), es responsable del 60% de los efectos del calentamiento global (Olajire 2010).

La búsqueda de soluciones para afrontar el cambio climático y reducir las emisiones de CO₂ condujo a la evaluación de diferentes sectores económicos. Aunque las industrias con mayor emisión de CO₂ son la energética y transporte, el sector de la construcción hace parte del listado (Romero-García et al. 2022). Se halló que este sector es uno de los de mayor emisión de GEI (Wu et al. 2018). Por ejemplo, en 2003 se reportó la emisión de cerca de 900 kg de CO₂ por tonelada de cemento producido (Gale et al. 2003). Actualmente, y para beneficio de la humanidad, se ha reportado una reducción en los valores de emisión de CO₂, aproximadamente hasta 705 kg por tonelada de cemento producido (Nie et al. 2022). Si bien, el valor de emisión depende de los objetivos ambientales y eficiencia de cada fábrica de cemento, las cifras toman mayor relevancia debido a que es el segundo material más usado en el mundo después del agua (Hamidi and Aslani 2019). Además, el cemento es responsable de entre el 6 y 8% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial (Gupta and Chaudhary 2020; Skibsted and Snellings 2019).

Pese a los efectos negativos asociados a la producción del cemento, este material es ampliamente usado para fabricar con-

creto gracias a las excelentes propiedades mecánicas, durabilidad, versatilidad, economía y disponibilidad (Hamidi and Aslani 2019; Yuan et al. 2021).

Debido a que se proyecta un gran crecimiento del sector de la construcción (Coppola et al. 2019), mejorar el proceso de producción del cemento es fundamental para contribuir a la sostenibilidad.

Las cuatro áreas que han sido identificadas para reducir las emisiones de GEI en la industria del cemento son: 1) mayor eficiencia térmica y eléctrica, 2) combustibles alternativos, 3) sustitución de clinker, y 4) captura y almacenamiento de carbono (WBCSD and IEA 2009).

La mejor alternativa con menores implicaciones técnicas y económicas es la reducción del Clinker en el cemento o del cemento en el concreto (GCCA 2020; Juenger, Snellings, and Bernal 2019). Reducir los porcentajes de estos materiales permitiría estar más cerca del objetivo de concreto neutro en carbono de la industria del cemento para el 2050 (GCCA 2020; Worrell and Boyd 2022). Una opción prometedora para lograr disminuir la cantidad de Clinker o cemento, es la utilización de materiales suplementarios del cemento (MSC) (Gupta and Chaudhary 2020; Juenger et al. 2019). En muchos casos, los MSC son residuos o subproductos de otras industrias, por lo cual, ambas partes se benefician al utilizar estos materiales alternativos (Juenger et al. 2019).

2. CONTEXTO DE LOS MATERIALES SUPLEMENTARIOS DEL CEMENTO PROVENIENTES DE RESIDUOS DE LA AGROINDUSTRIA DEL VALLE DEL CAUCA

Una de las ventajas del desarrollo de materiales de construcción alternativos es que pueden provenir de subproductos de diferentes industrias. Por ende, su disponibilidad depende de la producción de residuos de las empresas locales. Teniendo en cuenta lo anterior, se necesita evaluar en cada región los diversos tipos de subproductos que existen y explorar la posibilidad de procesar ese material para ser usado en la industria del cemento.

La agroindustria, ha planteado ser una fuente de diversos productos que tienen potencial para ser MSC. Algunos de estos materiales son: ceniza de cáscara de arroz, ceniza de la palma de aceite, ceniza de residuos de madera, ceniza de la hoja de bambú, ceniza de mazorca de maíz y la ceniza del bagazo de la caña de azúcar (CBC) (Aprianti et al. 2015; Aprianti S 2017).

El departamento del Valle del Cauca es uno de los seis departamentos productores de caña de azúcar de Colombia



(Asocaña 2021). La producción nacional de azúcar en 2020 fue 2.22 millones de toneladas y tuvo un incremento con respecto al 2019 de 0.6% (Asocaña 2021).

Según Asocaña (2017), el procesamiento de la caña de azúcar empieza con la cosecha, trituración y extracción de jugos de la caña, dejando como residuo el bagazo. Después, se procesan los jugos y se obtiene azúcar y bioetanol. Para la cogeneración de energía eléctrica, se utiliza el bagazo, el cual es quemado y se aprovecha el calor generado para producir energía mediante turbogeneradores. Al final de todo este proceso se produce la ceniza del bagazo de la caña de azúcar (CBC).

La inadecuada disposición de la CBC en rellenos, y la falta de control ambiental sobre este residuo (Jittin, Minnu, and Bahurudeen 2021; Medina et al. 2019; Montakarntiwong et al. 2013), hace necesario desarrollar investigaciones que permitan reintegrar este subproducto a la cadena productiva.

La reutilización de la CBC ha generado interés en investigadores de diversas partes del mundo desde hace varios años (Kolawole et al. 2021). Debido a las propiedades químicas y físicas de la CBC, es posible incorporarla a la industria de la construcción como material suplementario del cemento, buscando al mismo tiempo reducir los impactos ambientales negativos que genera la extracción y transformación de recursos no renovables para producir cemento.

Todo lo anterior fue la base para desarrollar una investigación en la Universidad de Purdue, Indiana, Estados Unidos, con el fin de analizar la posibilidad de incorporar la CBC como reemplazo parcial del cemento Portland en morteros.

3. ESTUDIO DE LA CBC COMO RESIDUO DE LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL MARCO DE LA PASANTÍA INTERNACIONAL "NEXO GLOBAL VALLE"

La investigación que desarrollé en conjunto con "Velay Research Group" y el "Semillero Matcon" en el laboratorio Pankow y el laboratorio de química del departamento de ingeniería civil de la Universidad de Purdue se ajustó a un cronograma experimental de seis meses, distribuido en seis etapas. Cada etapa fue determinada previo al inicio de la pasantía y se siguió rigurosamente el proceso de ejecución de los ensayos para cumplir a cabalidad con la normativa vigente y el tiempo estipulado de la pasantía internacional.

Primera etapa: revisión del estado del arte

El estudio de los artículos existentes sobre la industria del cemento, la agroindustria y las diversas investigaciones realizadas sobre la CBC como reemplazo parcial del cemento Portland en morteros y concreto, dio claridad sobre las variables que aún no habían sido analizadas en conjunto. De esta manera, se decidió investigar los efectos de la reducción del tamaño de partícula y la temperatura de curado en la resistencia a compresión de las muestras de mortero.

La ceniza fue estudiada como adición puzolánica con reemplazo de cemento del 0%, 10%, 20% y 30%. Este tipo de material reacciona con los productos de hidratación del cemento para generar más productos de hidratación y de esta manera se logra aumentar la resistencia a compresión del mortero (De Belie, Soutsos, and Gruyaert 2018).

Por otra parte, el proceso de curado se realizó sumergiendo la mitad de las muestras en agua a temperatura ambiente, 22°C, y la otra mitad en agua a 45°C en un horno hasta la edad de ensayo. La temperatura de curado puede acelerar o retardar el proceso de hidratación de la mezcla, así que es fundamental determinar las temperaturas a las cuales se puede curar el mortero con la adición de CBC. En el sector de prefabricados toma aún más importancia la temperatura de curado debido a que los procesos de fundido y desmolde son rápidos para lograr mantener el ritmo de producción establecido. Si se aumenta la temperatura de curado, se puede llegar a desmoldar en un menor tiempo, garantizando la continuación del proceso productivo.

Segunda etapa: selección de los materiales

Se usó cemento Portland tipo I, arena 0/0.25, agua, y ceniza del bagazo de la caña de azúcar proveniente de la región del Valle del Cauca, Colombia.

Existen dos tipos de CBC, la ceniza baja parrilla, y la ceniza volante. La primera se recolecta en la caldera y es la fracción más gruesa, mientras la segunda es más fina, viaja con los gases de combustión a través del sistema de producción y se recolecta antes de ser emitidas a la atmósfera. La ceniza bajo parrilla representa el 20% de la ceniza total producida y la volante el 80%.

Después de la revisión de la literatura, se evidenció que el tamaño de partícula de la ceniza volante influye ampliamente en el desarrollo de la resistencia a compresión de mezclas de concreto y mortero producidas con CBC. Se obtuvo una mayor resistencia cuando la ceniza tuvo un tamaño de partícula similar o menor a la del cemento Portland utilizado en la investiga-

ción (Bahurudeen and Santhanam 2015; Cordeiro, Andreão, and Tavares 2019; Cordeiro and Kurtis 2017). Debido a lo anterior, se decidió moler la CBC para alterar su distribución de tamaño de partículas. Finalmente, se realizaron cubos de mortero con ceniza inalterada y ceniza molida con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento para comparar los resultados y determinar el efecto de la temperatura de curado en estos dos tipos de materiales.

Tercera etapa: caracterización de los materiales

Debido a que el cemento y la arena son constantemente usados en otras investigaciones, ya se contaba con la caracterización de estos materiales, por ende, sólo se realizó la caracterización de la CBC. Se determinó el contenido de humedad, densidad, pérdidas por ignición, fluorescencia de rayos X (FRX), termogravimetría (TGA), difracción de rayos X (DRX), y distribución del tamaño de partícula antes y después de la molienda.

Cuarta etapa: diseño de mezcla

Esta etapa consistió en establecer las proporciones de cada material para cumplir con los parámetros de diseño establecidos para el mortero con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento conforme a la norma ASTM C109 (ASTM 2021).

Quinta etapa: propiedades de los morteros

Debido a que la reacción de la puzolana con los productos de hidratación es lenta, se estudió su comportamiento mediante ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días de curado (De Belie et al. 2018). Además, se analizó el comportamiento químico de la ceniza en pastas de cemento mediante difracción de rayos X (DRX) y termogravimetría (TGA). Esto se hace con el objetivo de conocer solo las reacciones entre cemento y ceniza sin incluir la arena, dado que sus componentes químicos pueden afectar el análisis de la reacción puzolánica.

Sexta etapa: análisis de resultados

En esta última sección se seleccionó el formato de las tablas y gráficos para presentar la información de forma organizada y que el futuro lector entienda con facilidad los datos. En resumen, durante la investigación se usaron los siguientes equipos: analizador de tamaño de partícula, difractómetro de rayos X, analizador de fluorescencia de rayos X, analizador termogravimétrico, mufla de laboratorio, y máquina hidráulica de ensayo a compresión de materiales. El uso de estos elementos permitió cumplir con los objetivos del proyecto y amplió mi conocimiento y habilidad en el manejo de esos equipos y los software relacionados. Además, se interpretaron los resultados químicos y físicos para explicar

el efecto de la reducción del tamaño de partícula y el curado a diferentes temperaturas.

En general, se observó un mejor comportamiento mecánico de las muestras de mortero con ceniza molida. Al disminuir el tamaño de partícula de la CBC, los cubos mostraron una menor cantidad de poros en su estructura, por lo cual, se aumentó la densidad y la resistencia a compresión de estas muestras. Adicionalmente, al aumentar el porcentaje de reemplazo de CBC, se aumentó el porcentaje de poros con ambos materiales y se disminuyó la resistencia, por lo tanto, se concluyó que el porcentaje óptimo de reemplazo es de 10% de CBC.

Por otra parte, el curado en agua a 45°C aumentó la resistencia a los 7 días de ensayo en comparación con el curado a 22°C. Aunque se evidenció que una mayor temperatura afecta al mortero de referencia elaborado sin ningún tipo de CBC, la adición de ceniza mejora el comportamiento mecánico de las muestras de morteros curadas a 45°C.

4. IMPACTO DE PASANTÍA INTERNACIONAL "NEXO GLOBAL VALLE" – EXPERIENCIA PERSONAL

"Proporcionar apoyo a los países menos adelantados, incluso mediante asistencia financiera y técnica, para que puedan construir edificios sostenibles y resilientes utilizando materiales locales" ODS 11.C (United Nations 2018)

La cooperación internacional es primordial para el avance de los países en desarrollo, ahí radica la importancia del programa de pasantía internacional de Nexo Global Valle. El programa permitió la colaboración y asesoría técnica entre la Universidad Javeriana Cali en Colombia y la Universidad de Purdue en Estados Unidos para aportar conjuntamente al aumento y divulgación del conocimiento técnico de la CBC.

Además, el uso de un subproducto de la agroindustria del Valle del Cauca permite la utilización de materiales locales a favor del desarrollo sostenible y la reducción de la cantidad de material dispuestos en rellenos.

Como ingeniera civil, siento un gran compromiso con el medio ambiente debido al impacto de la construcción en la sociedad y los ecosistemas. En la búsqueda por aportar desde mi área del conocimiento al desarrollo sostenible, encontré en la investigación el medio para construir edificios y comunidades sostenibles. El reto es grande. Mi objetivo es liderar investigaciones cuyos resultados puedan ser implementados en las comunidades y servir



de ejemplo para las nuevas generaciones. Después de realizar la pasantía Nexo Global en la Universidad de Purdue considero que la investigación es una excelente opción para seguir transformando la construcción y acercarnos a procesos constructivos más eficientes y amigables con el medio ambiente.

“De aquí a 2030, asegurar el acceso igualitario de todos los hombres y las mujeres a una formación técnica, profesional y superior de calidad, incluida la enseñanza universitaria” ODS 4.3 (United Nations 2018).

La calidad de la educación también es clave para el desarrollo sostenible de las naciones. La ejecución del programa Nexo Global Valle, permitió la formación de los jóvenes en áreas de ciencia, tecnología e innovación, facilitando la solución de problemáticas específicas del departamento del Valle del Cauca con asesoría profesional en Estados Unidos.

Como mujer y afrocolombiana, me sentí privilegiada de ser parte de esta pasantía internacional. La representación racial y de género es importante para empoderar a las futuras generaciones y demostrar que la ciencia y la investigación no tienen género ni color.

Por medio de la pasantía Nexo Global tuve la oportunidad de observar a excelentes mujeres investigadoras en la Universidad de Purdue. Ver como ellas son capaces de defender sus ideas y proponer investigaciones con sentido ambiental me motivó aún más a seguir explorando el mundo de la ciencia. Regresé al país con más sueños por cumplir y ganas de liderar investigaciones que aporten a la sostenibilidad en Colombia y el mundo.

Finalmente, considero que fomentar la vocación científica en los jóvenes es el primer paso para construir una Colombia con mejores oportunidades académicas, profesionales y laborales.

5. CONCLUSIONES

El uso de la CBC como reemplazo parcial del cemento Portland en mortero es solo una de las tantas opciones para reducir el porcentaje de cemento en las mezclas e indirectamente disminuir las emisiones de CO₂ relacionadas con la industria de la construcción y del cemento, además de reducir subproductos industriales dispuestos en vertederos. La investigación plantea diversas formas de contribuir al desarrollo sostenible de las comunidades a nivel regional y nacional. La pasantía internacional Nexo Global tomó en cuenta las áreas de interés más importantes para el departamento del Valle del Cauca, y eso fue clave para delimitar la investigación y proponer una investigación que beneficie a la región. Adicionalmente, el avance en la ejecución de

los Objetivos de Desarrollo Sostenible como nación es viable mediante la capacitación de los jóvenes en área de interés para los departamentos de Colombia. La cooperación internacional también es una herramienta útil en la lucha por mejorar la calidad de la educación e incrementar los niveles de investigación a nivel de pregrado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que trabajaron arduamente para lograr la implementación del programa Nexo Global Valle del Cauca, y a las entidades: Gobernación del Valle, Invalle, Universidad Santiago de Cali y Minciencias. Gracias a Dios y a todos aquellos que me brindaron su apoyo y asesoría durante la pasantía de investigación, PhD Mirian Velay Lizancos (Profesora Universidad de Purdue), Vito Francioso, candidato a PhD (Universidad de Purdue), PhD Manuel Alejandro Rojas Manzano (Profesor Universidad Javeriana Cali), mi familia y la Universidad Javeriana Cali, mi segundo hogar.

REFERENCIAS

- Aprianti, Evi, Payam Shafigh, Syamsul Bahri, and Javad Nodeh Farahani. 2015. “Supplementary Cementitious Materials Origin from Agricultural Wastes - A Review.” *Construction and Building Materials* 74:176–87.
- Aprianti S, Evi. 2017. “A Huge Number of Artificial Waste Material Can Be Supplementary Cementitious Material (SCM) for Concrete Production – a Review Part II.” *Journal of Cleaner Production* 142:4178–94.
- Asocaña. 2017. “Más Que Azúcar, Una Fuente de Energía Renovable Para El País.” *Sector Agroindustrial de La Caña* 10.
- Asocaña, Sector Agroindustrial de la Caña. 2021. “Informe Anual 2020-2021.” *Sector Agroindustrial de La Caña*.
- ASTM, American Society of Testing and Materials. 2021. “ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 Mm] Cube Specimens).” *ASTM International*.
- Ayarkwa, Joshua, De-graft Joe Opoku, Prince Antwi-afari, Rita Yi, and Man Li. 2022. “Sustainable Building Processes’ Challenges and Strategies : The Relative Important Index Approach.” 7.
- Bahurudeen, A., and Manu Santhanam. 2015. “Influence of Different Processing Methods on the Pozzolanic Performance of

- Sugarcane Bagasse Ash." *Cement and Concrete Composites* 56:32–45.
- De Belie, Nele, Marios Soutsos, and Elke Gruyaert. 2018. *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4*.
- Coppola, L., D. Coffetti, E. Crotti, G. Gazzaniga, and T. Pastore. 2019. "An Empathetic Added Sustainability Index (EASI) for Cementitious Based Construction Materials." *Journal of Cleaner Production* 220:475–82.
- Cordeiro, Guilherme C., and Kimberly E. Kurtis. 2017. "Effect of Mechanical Processing on Sugar Cane Bagasse Ash Pozzolanicity." *Cement and Concrete Research* 97:41–49.
- Cordeiro, Guilherme Chagas, Priscila Vinco Andreão, and Luis Marcelo Tavares. 2019. "Pozzolanic Properties of Ultrafine Sugar Cane Bagasse Ash Produced by Controlled Burning." *Heliyon* 5 (10):0–5.
- Gale, J., Natesan Mahasanen, Steve Smith, and Kenneth Humphreys. 2003. "The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO₂ Emissions." *Greenhouse Gas Control Technologies* 11(1):995–1000.
- GCCA, Global Cement and Concrete association. 2020. "GCCA Climate Ambition Statement: Towards Carbon Neutral Concrete."
- Gupta, Sanchit, and Sandeep Chaudhary. 2020. "State of the Art Review on Supplementary Cementitious Materials in India – I: An Overview of Legal Perspective, Governing Organizations, and Development Patterns." *Journal of Cleaner Production* 261:121203.
- Hamidi, Fatemeh, and Farhad Aslani. 2019. "Additive Manufacturing of Cementitious Composites: Materials, Methods, Potentials, and Challenges." *Construction and Building Materials* 218:582–609.
- Jittin, V., S. N. Minnu, and A. Bahurudeen. 2021. "Potential of Sugarcane Bagasse Ash as Supplementary Cementitious Material and Comparison with Currently Used Rice Husk Ash." *Construction and Building Materials* 273:121679.
- Juenger, Maria C. G., Ruben Snellings, and Susan A. Bernal. 2019. "Supplementary Cementitious Materials: New Sources, Characterization, and Performance Insights." *Cement and Concrete Research* 122(May):257–73.
- Kolawole, John Temitope, Adewumi John Babafemi, Ebenezer Fanijo, Suvash Chandra Paul, and Riaan Combrinck. 2021. "State-of-the-Art Review on the Use of Sugarcane Bagasse Ash in Cementitious Materials." *Cement and Concrete Composites* 118(September 2020):103975.
- Liu, Bin, Qun Gao, Lingfeng Liang, Jide Sun, Chunlu Liu, and Youquan Xu. 2021. "Ecological Relationships of Global Construction Industries in Sustainable Economic and Energy Development." *Energy* 234:121249.
- Medina, J. M., I. F. Sáez del Bosque, M. Frías, M. I. Sánchez de Rojas, and C. Medina. 2019. "Design and Properties of Eco-Friendly Binary Mortars Containing Ash from Biomass-Fuelled Power Plants." *Cement and Concrete Composites* 104(August 2018):103372.
- Montakarntiwong, Kawee, Nuntachai Chusilp, Weerachart Tangchirapat, and Chai Jaturapitakkul. 2013. "Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Bagasse Ash from Thermal Power Plants in Sugar Industry." *Materials and Design* 49:414–20.
- Morone, Piergiuseppe, Andrzej Strzałkowski, and Almona Tani. 2019. "Biofuel Transitions: An Overview of Regulations and Standards for a More Sustainable Framework." *Biofuels for a More Sustainable Future: Life Cycle Sustainability Assessment and Multi-Criteria Decision Making* 2050:21–46.
- Nelson, Priscilla P. 2016. "A Framework for the Future of Urban Underground Engineering." *Tunnelling and Underground Space Technology* 55:32–39.
- Nie, Song, Jian Zhou, Fan Yang, Mingzhang Lan, Jinmei Li, Zhenqiu Zhang, Zhifeng Chen, Mingfeng Xu, Hui Li, and Jay G. Sanjayan. 2022. "Analysis of Theoretical Carbon Dioxide Emissions from Cement Production: Methodology and Application." *Journal of Cleaner Production* 334(July 2021):130270.
- Nithya, M., and Muthukumaran Ramasamy. 2021. "Sustainability in Construction Industry through Zero Waste Technology in India." *Materials Today: Proceedings* 46:849–51.
- Olajire, Abass A. 2010. "CO₂ Capture and Separation Technologies for End-of-Pipe Applications – A Review." *Energy* 35(6):2610–28.
- Romero-García, Ana Gabriela, Carolina Mora-Morales, Juan Pablo Chargoy-Amador, Nelly Ramírez-Corona, Eduardo Sánchez-Ramírez, and Juan Gabriel Segovia-Hernández. 2022. "Implementing CO₂ Capture Process in Power Plants: Optimization Procedure and Environmental Impact." *Chemical Engineering Research and Design* 180:232–42.



- Scibioh, M. Aulice, and B. Viswanathan. 2018. "CO2 Conversion—Relevance and Importance." *Carbon Dioxide to Chemicals and Fuels* 1–22.
- Silva, R. V., J. De Brito, and R. K. Dhir. 2016. "Performance of Cementitious Renderings and Masonry Mortars Containing Recycled Aggregates from Construction and Demolition Wastes." *Construction and Building Materials* 105:400–415.
- Skibsted, Jørgen, and Ruben Snellings. 2019. "Reactivity of Supplementary Cementitious Materials (SCMs) in Cement Blends." *Cement and Concrete Research* 124(May):105799.
- United Nations. 2018. *The 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals An Opportunity for Latin America and the Caribbean*.
- WBCSD, World Business Council for Sustainable Development, and International Energy Agency IEA. 2009. "Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050."
- Worrell, Ernst, and Gale Boyd. 2022. "Bottom-up Estimates of Deep Decarbonization of U.S. Manufacturing in 2050." *Journal of Cleaner Production* 330(November 2021):129758.
- Wu, Ya, K. W. Chau, Weisheng Lu, Liyin Shen, Chenyang Shuai, and Jindao Chen. 2018. "Decoupling Relationship between Economic Output and Carbon Emission in the Chinese Construction Industry." *Environmental Impact Assessment Review* 71(January):60–69.
- Yuan, Qiang, Zanqun Liu, Keren Zheng, and Cong Ma. 2021. *Chapter 3 – Portland Cement Concrete*. Vol. 32.

Cita recomendada

Lemos Micolta, E. D. (2022). Cooperación Internacional en la Investigación de Materiales Suplementarios del Cemento: Colombia – Estados Unidos. *Nexo Global. Artículos de reflexión*, pp. 1-9.