

Uso de cenizas de carbón para mejorar la resistencia a la compresión del concreto

Use of coal ash to improve the compressive strength of concrete

Mariseli Angaspilco Llamo¹, Jhan C. Bocanegra Avellaneda¹, Sócrates P. Muñoz Pérez^{1,*}
Lesly J. Torres Zavaleta¹, Cristian D. Villanueva Meza¹

¹Universidad Señor de Sipán (USS). km 5. Pimentel – Chiclayo. Perú.

*Autor correspondiente [e-mail: msocrates@crece.uss.edu.pe]

RESUMEN

Las cenizas de carbón son contaminantes ambientales, sin embargo, son utilizadas como aditivo en el cemento para la elaboración de hormigón, en obras de ingeniería civil. Se tuvo por objetivo evaluar información del uso de cenizas de carbón en la optimización de la resistencia del hormigón. Se realizó análisis de 61 artículos científicos de actualidad, identificando así informaciones referentes al uso de cenizas de carbón para mejorar la resistencia a la compresión del concreto. Se determinó que la resistencia promedio del hormigón habitual a los 28 días fue de 221 kg/cm², con 2,5% de cenizas fue de 223 kg/cm², con 5% fue de 231 kg/cm², con 10% fue de 200 kg/cm² y con el 15 % fue de 192 kg/cm² respectivamente. Las cenizas de carbón usadas en proporciones menores al 10% en sustitución de cemento, mejora la resistencia del hormigón; en contraste, el uso superior al 10% puede disminuir la calidad del hormigón.

Palabras clave: cemento, ceniza volante, concreto, diseño.

ABSTRACT

Coal ashes are environmental pollutants, however, they are used as an additive in cement for the production of concrete, in civil engineering works. The objective was to evaluate information on the use of coal ash in the optimization of concrete strength. Analysis of 61 current scientific articles, thus identifying information regarding the use of coal ash to improve the compressive strength of concrete. It was determined that the average resistance of the usual concrete at 28 days was 221 kg/cm², with 2.5% ashes it was 223 kg/cm², with 5% it was 231 kg/cm², with 10% it was 200 kg/cm² and with 15% it was 192kg/cm² respectively. The coal ashes used in proportions less than 10% in substitution of cement, improves the resistance of the concrete; in contrast, use greater than 10% can lower the quality of the concrete.

Keywords: cement, fly ash, concrete, design.

INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales mayormente utilizado en obras de Ingeniería Civil, siendo su dosificación el que requiere uso de aditivos de diversas fuentes (Zhenna et al. 2019). Para Abbas et al. (2020), el usar cenizas como aditivo, mejorará la calidad del hormigón, incrementando así su resistencia, a la vez que resulta significativo emplear el hormigón en pequeñas cantidades y de esa forma minimizar su impacto ambiental en zonas expuestas. Las cenizas de carbón (CDC) vienen hacer un desecho ecológicamente situacional, el cual descartan las centrales termoeléctricas, para evitar que estén almacenados al descubierto (Alam et al. 2021). Este hábito se convierte en un perjuicio ambiental, debido a que su roce con el aire, el agua y el suelo, produce elevadas situaciones de inoculación (Nuaklong et al. 2021).

La contaminación ambiental por cenizas, altera las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, aire y agua; de tal manera, es fundamental realizar procedimientos de reciclaje de cenizas para su incorporación en la mejora de las industrias de construcción y cerámica, y en la conservación del suelo (Bhat, 2020). Por lo tanto, existe una necesidad continua y apremiante de desarrollar nuevos métodos con la finalidad de reciclar la CDC para ayudar a sus aplicaciones potenciales actuales en la mejora de la industria de la construcción (Mangi et al. 2019). La transcendencia del empleo de CDC con características puzolanas en la operatividad del hormigón y en su eficiencia; se da en los niveles de contracción por secado y resistencia a la compresión (Cen et al. 2019). Por otro lado, para conseguir alta resistencia a la compresión en hormigones se debe describir la

magnitud de contracción por secado para así definir la dosis óptima de CDC (Bahri et al. 2018). Se ha estimado la disminución de las relaciones de agua/cemento obtenidas como resultado de adiciones de CDC, facultando la resistencia a la abrasión y retracción por secado para concreto fluido (Howladar y Islam, 2016). La aplicación de cementos sulforresistentes y adiciones enriquecen las características mecánicas del concreto en base al sulfato (Teara y Shu Ing, 2020). Las adiciones de humo de sílice tienen una estructura porosa mucho más compactada que no cambia significativamente con el paso del tiempo y potencie actividad puzolana a edades tempranas (Marathe et al. 2021). Un proceder distinto tiene la CDC, ya que muestra un cambio positivo en sus propiedades micro estructurales y mecánicas a edades más largas, por lo tanto, ayuda a mejorar las características micro estructurales de la matriz cementicia (Shahidan et al. 2021). Por otra parte, Nakamura et al. (2021) en su investigación acerca de la porosidad, determinaron que las CDC tienden a reducir de manera parcial en la mezcla de cemento con lo cual ayuda a una mayor resistencia y durabilidad a largas edades. Este tipo de concreto presenta condiciones durables aptas para los ciclos de hielo y deshielo, asimismo pueden resultar útiles para regiones localizadas a gran altura en relación al nivel del mar (Antoni et al. 2017). Con lo expuesto, se tuvo por objetivo evaluar información del uso de cenizas de carbón en la optimización de la resistencia del hormigón.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó entre los meses 25/01/2021 a 6/03/2021; el trabajo se dividió en

etapas como planificación, selección de base de datos y revistas; obtención de la información, interpretación y sistematización. La recopilación de los artículos pertenece al estrato de tiempo de 2014 al 2021; distribuidos según base de datos, 1 artículo de EBSCO, 2 de IOP Science, 27 de Scopus, 1 de SciELO y 30 de ScienceDirect. En la búsqueda fue utilizando las frases: "formas innovadoras y sostenibles en la construcción", "estructuras con materiales innovadores, tecnologías y materiales de construcción para el desarrollo", "estructuras con materiales innovadores", "procesos constructivos innovadores", "resistencia a la compresión y tracción para hormigón con cenizas", "porosidad del concreto con ceniza de carbón", "propiedades mecánicas del hormigón de alta resistencia", "durabilidad y conservación del patrimonio", "materiales innovadores y materiales tradicionales", "resistencia del concreto", "tecnología e innovación de estructuras para el sector de la construcción", "aplicación innovadora de materiales de construcción", "propiedades de resistencia y durabilidad de las cenizas de carbón del concreto".

La información recopilada se clasifica en una matriz de contenido analítico y los objetivos, métodos y resultados generales se extrajeron de cada texto. Finalmente, se estructuró la información en función de las directrices de redacción científica, combinando los resultados de diferentes artículos, realizando análisis crítico e interpretativo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Propiedades mecánicas

Influencia de CDC en la resistencia a la compresión del concreto

A los 28 días añadiendo 5% de CDC a briquetas de concreto llegan a aumentar su resistencia, ayudando a mejorar la resistencia a compresión a los 28 días de edad, resultando una calidad óptima en relación con los concretos convencionales (Ahmed et al. 2021). El concreto efectuado con CDC alcanza excelentes propiedades mecánicas siendo una de estos: durabilidad (Lo et al. 2021). Sin embargo, es indispensable que se tome en cuenta el resultado de hidratación de la CDC siendo esta menor que la del cemento Portland, es por ello que se obtienen mejores resistencias, pero a más días de edad (Saloni 2021; Caro et al. 2016).

La influencia de la CDC con respecto a la resistencia a la compresión a los 28 días $f'c$ es aceptable y excelente (Wallace y Moizinho 2017). Logrando con ello incrementos resistentes cercanos al 20, 21 y 18% cuando es incorporado reemplazando en parte al cemento en porcentajes de 10, 20 y 30% (Araújo et al. 2020). Concluyendo que la incorporación del 10, 20 y 30% de CDC en reemplazo del cemento, la resistencia a la compresión de las muestras disminuyó ligeramente a los 7 días de curado, pero al reemplazar al cemento en un 40% por CDC, la resistencia a la compresión en el proceso de compresión disminuyó drásticamente; esto se debe a que, a una edad temprana las CDC no contribuyen a la reacción de hidratación, por lo que la reacción de hidratación se reduce porque la cantidad de cemento en la muestra es menor (Ibeto et al. 2020).

La adición de 10 CDC se considera la relación de adición óptima porque aumenta la resistencia mecánica del mortero en un 35% durante el

tiempo de curado de 28 días y tiene un efecto positivo en la durabilidad (Adamu et al. 2021). Otro estudio también afirma que la tasa óptima de adición de CDC es del 10% desde un punto de vista mecánico (Al-Hdabi, 2016). Para (Dey et al. 2021) la resistencia baja y es producto de una baja temperatura del curado. Por lo tanto, se considera para un diseño de concreto hasta un 7,5% óptimo para un diseño de mezcla de concreto Alireza et al. 2020). Las dosificaciones antes mencionadas son para concretos de 210 kg/cm² con acero de refuerzo, mas no para morteros (Ameri et al. 2015).

Según plantean que la CDC utilizada en los diseños de mezclas de concreto en porcentajes que varían entre el 3 al 6% optimizarán su resistencia (Delgado et al. 2016). Al utilizar dichos porcentajes de CDC, su resistencia alcanzaría un nivel superior al del hormigón ordinario (Okoye et al. 2017).

Por otro lado, no deberían emplearse porcentajes mayores al 6% en los diseños de mezcla de hormigón porque siendo así tenderían a perder su resistencia, en cambio para un hormigón con porcentaje inferior al 3% su resistencia es aproximadamente la misma del hormigón ordinario (Menéndez et al. 2021). La muestra de los aglomerados del hormigón con un contenido de CDC del 5 %, alcanzan una mayor resistencia después de los 28 días, por consiguiente, tienen la posibilidad ayudar a elevar las resistencias a edades tempranas (Ibrahim et al. 2019). Es posible diseñar hormigones de CDC con una resistencia según la norma especificada, ya que se puede determinar que su edad excede los 28 días (Rafieizonooz et al., 2017).

Esta aseveración es corroborada por el estudio de Skibsted y Snellings (2019), en donde, en cada una de las dosificaciones estudiadas con base a el tamaño que se incrementa la edad del hormigón, se incrementa además la resistencia del concreto. Para (Juenger et al.2019) el concreto elaborado a partir de este residuo, resulta con propiedades mecánicas óptimas y con durabilidad mayor debido a su resistencia de ácidos corrosivos y árido- álcalis, además, Arabani et al. (2015) consideran que la postura de la hidratación de las mismas es un poco lente a diferencia del cemento Portland, por lo que se puede obtener mayor resistencia, pero la vida útil es mayor. Recomiendan que la edad del diseño de la mezcla de concreto con CDC no debe excederlos 28 días (Nakamura et al. 2021).

Según estudios hechos nos indican que la investigación realizada demostró que las ventajas de las CDC con respecto a su resistencia a la compresión resultan ser aceptables en un corto periodo de tiempo, mientras que se desempeña bien en edades de curados superiores a los 28 días (Arif 2016). Lo que puede aumentar la resistencia en aproximadamente 20 días, con porcentajes cercanos al 20, 21 y 18% y una vez que este es incorporado como sustituto parcial del cemento el porcentaje varía entre el 10, 20 y 30% proporcionalmente (Carsana 2016). Otros estudios han demostrado que agregar un 10% de CDC se considera el mejor porcentaje de adición porque puede aumentar la resistencia mecánica cuando se cura durante 28 días (Basirun et al. 2017). Desde un punto de vista mecánico, se demostró que el porcentaje relativo de CDC agregadas fue del 10% (Al-Hdabi, 2016). Sin embargo, según el análisis, se cree que la resistencia se reduce debido a la baja

temperatura de curado (Zhipeng et al. 2021). Por lo tanto, lo óptimo en proporción sería de 0 a 7,5% para su diseño de mezcla de concreto (Bhat, 2020).

Durante un curado de 28 a 56 días, los valores de resistencia a la compresión del hormigón con 0, 25, 50, 75 y 100% de sustitución de áridos finos por CDC incrementaron en un 10,2, 6,9, 10,4, y 13,6%, respectivamente (Yang et al. 2020). El crecimiento importante de la resistencia a la compresión de las mezclas de hormigón a una edad de curado de 56 días se debió a la actividad puzolana de la CDC, se ha comprobado que la sustitución parcial de la arena por la CDC aumento hasta un 20%, la compresión más alta se obtuvo cuando la arena se reemplazó con un 15% de CBA en peso (Mustapha et al. 2021).

Influencia del CDC en la resistencia a la tracción del concreto.

La reducción en la resistencia a la tracción por división a 7 días fue del 26,6, 32,69 y 39,1% con la inclusión de 50, 60 y 70% CA, respectivamente, mientras que la reducción en los 56 días; la resistencia a la compresión fue del 24,94, 31,97 y 38,55%, respectivamente (Rashad, 2015). Por otro lado, Keerio et al. (2021) estudió la influencia de las CDC en el concreto, se utilizó

proporciones al 10,20;30 y 40% con respecto al agregado fino, se preparó una proporción 1:2:4, con una relación a/c de 0.5, se concluyó que cuando se utiliza un 30% de CDC la resistencia a la tracción fue 3.89 MPa, aumentando 9.10% en comparación con un concreto normal.

La demanda de los materiales en la industria de la producción del concreto, ya que esta situación es de suma importancia el uso de la CDC que viene a ser un reemplazante de la arena, en sus resultados nos muestra el 70 y el 80% de efectividad correspondiente a la resistencia a la tracción, dando como resultado 3.03MPa a los 7 días y 3.63 MPa a los 28 días (Sevim et al. 2021). La eliminación de la CDC son uno de los principales contaminantes del medio ambiente, también nos dice que el carbón reemplazo a la arena en un 20, 30, 40 y 100 % y que los resultados de la trabajabilidad disminuyeron; la resistencia a la tracción con las mezclas de hormigón de cenizas es casi comparable a la del hormigón de control (Siddique y Singh, 2016).

En la tabla 1 se muestra la comparación de la resistencia a la tracción del concreto patrón o normal con el concreto con reemplazo parcial del agregado fino con CA.

Tabla 1. Resumen de comparaciones de la resistencia de concreto a la tensión con ceniza de carbón (CDC).

Referencias	Relación agua cemento (a/c)	Contenido de CDC como agregado fino (%)	f't concreto normal vs f't concreto con CA(%)
Keerio et al. 2021	0,5	30	Aumenta un 9.10
Sevim et al. 2021	0,6	6 a 8	Aumenta entre 70-80
Siddique y Singh, 2016	0,7	8	Disminuye en 30

Influencia del CDC en la resistencia a la flexión del concreto.

Con respecto a la flexión se hicieron investigaciones con mezclas con relación agua/cemento que varía desde 0.33 a 0.50 y con

reemplazos parciales de la arena con 10 y 20% de CDC donde se obtuvieron aumentos de la resistencia a la flexión tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la resistencia del concreto a la flexión con reemplazo parcial de ceniza de carbón (CDC).

Referencia	Relación agua cemento (a/c)	Contenido CDC (%)	Concretos de 210 kg/cm ² con acero	Resistencia a la flexión
Prakash et al. 2019	0,33	10	Sí	Es comparable con otros concretos ligeros
Kumara y Anadinni, 2019	0,50	20	Sí	Incremento en un 18.78% en comparación a un concreto tradicional
Prakash et al. 2020	0,40	10	Sí	Obtuvo ligera mejora en comparación al concreto tradicional
Goudar et al 2018	0,45	20	Sí	Incrementó 25.6% en comparación a un concreto tradicional

2. Propiedades físicas

Influencia del CDC en la trabajabilidad del concreto

Integraron CDC en el concreto, disminuyendo la trabajabilidad a medida que la cantidad de ceniza aumenta; del mismo modo, la alta trabajabilidad es cuando la CDC es añadida en la mezcla en el rango de 10-30%: la pérdida de agua que estaba destinada a facilitar el movimiento de las partículas de la mezcla podría deberse a la absorción de la ceniza que es una propiedad inherente de ella y que es rica en poros vacíos (Muthusamy et al. 2020). Esto lleva a aumentar la fuerza de fricción que reduce la

trabajabilidad de la mezcla, las propiedades físicas de la ceniza con su comportamiento entrelazado, forma irregular y textura de superficie rugosa también son otra causa que reduce la trabajabilidad de la mezcla; la incorporación del CDC a un tamaño de partícula inferior a 300 mm reduce la trabajabilidad debido a su mayor superficie en comparación con la arena (Menéndez et al. 2021). El uso de CDC de superficie saturada como reemplazo de arena tiende a mejorar la trabajabilidad. La facilidad de mezclar el concreto aumenta cuando la arena se reemplaza con 30% a 100% de CDC (Shahidan et al. 2021). Referente a la propiedad de trabajabilidad el uso de CDC y del

polvo de escoria, presenta características similares a un concreto elaborado con el mismo cemento, teniendo un asentamiento aproximado de 70 mm (Sukhoon y Hyeong-Ki, 2017). Los efectos del fondo de CDC sobre las propiedades del concreto autocompactante (SCC) se investigaron comparando los resultados de la prueba de SCC mezclado con CDC con los del control de SCC de arena de ríos; los resultados de la prueba revelaron que el flujo de asentamiento las mezclas de SCC con la CDC fue reducida, mientras que el tiempo de asentamiento de 50 mm aumentó con el aumento de la CDC a nivel de reemplazo (Dhawan et al. 2021).

El carbón de ceniza son residuos que se utilizaran como reemplazo del cemento Portland, para la producción de mezcla de concreto, los resultados mostraron que la CDC se obtuvieron valores de asentamiento ligeramente más bajos con una densidad fresca

ligeramente más baja, tenían estructuras más compactas en comparación con la mezcla convencional mostraron una mayor permeabilidad al sonido, conductividad térmica, permeabilidad al agua y porosidad (Carsan et al. 2016). Las probetas de concreto incorporando 0, 20, 50, 75 y 100 % de CDC que retiene la malla N°200 en sustitución de arena y 20% de CDC que pasa la malla N°200 como sustituto del cemento Portland ordinario y una relación a/c de 0,55 se obtuvieron las caídas de 73, 92, 76, 53 y 37 mm para las incorporaciones de 0, 20, 50, 75 y 100 % de CBA respectivamente, mostrando como resultado una mayor trabajabilidad al 25% para el reemplazo de 20 % de CDC y una disminución de la misma para el reemplazo de hasta el 100 % de CDC. (Rafieizonooz et al. 2016).

En la tabla 3 se mostrará los resultados de la trabajabilidad de concreto añadiendo CDC con respecto a su proporción óptima y resistencia.

Tabla 3. Resultados de la trabajabilidad del concreto añadiendo ceniza de carbón (CDC).

Referencia	Proporción optima de CA (%)	Resistencia trabajada (kg/cm ²)	Trabajabilidad
Mthusamy et al. 2020	30	210	Incrementada 25%
Sukhoon y Hyeong, 2017	23	< 210	Se mantiene igual
Bostanci, 2020	-	-	Disminuye

Influencia del CDC en la porosidad del concreto

En cuanto a la porosidad del hormigón, mencionaron que cuando aumentan las FA debido a la carbonización, esta porosidad disminuirá, lo que no significa que la resistencia del hormigón aumente (Huaquisto y Belizario, 2018). Por tanto, requiere un mayor tiempo de reacción para conseguir el mayor desarrollo de

su acción puzolana dado que el contacto entre los productos de hidratación de la CDC y el cemento es mayor (Sabo et al. 2019), además, Kubissa (2017) afirma que un valor agregado moderado parece proporcionar un mejor coeficiente de eficiencia, lo que favorece la reacción puzolana de la ceniza de hueso.

Los estudios han demostrado que la durabilidad del hormigón que contiene un 38% de CDC y "nano sílice parcial" como sustituto del cemento es mejor que la del hormigón ordinario que contiene un 100% de cemento (Ankur y Singh, 2021).

Las de CDC producen reducción de la generación de hidratación en el calor, mejoran la resistencia a la acción de los sulfatos y por tratarse de un residuo industrial contaminante también se obtienen productos sostenibles (Gazdič et al. 2017), además, Gunasekera et al. (2018) afirman que el uso de CDC ayuda a aumentar la resistencia y reduce la pérdida de asentamiento. Esto se atribuye al hecho de que las partículas de CDC se depositan en el espacio entre las partículas de cemento agregadas reducen la exudación de la zona de transición de lodo-agregado al reducir la contracción por secado (Lee y Lee, 2016).

Para Mizal et al. (2018) las CDC base congelación, una permeabilidad extremadamente baja a los iones de cloruro los

cuales no se expandirán de manera adversa cuando se mezclen con agregados altamente reactivos en el concreto. Cabe recalcar que mecánicamente el porcentaje óptimo de adición de CDC incluidas es un 10% en el, así como un crecimiento en este porcentaje aumentaría las habilidades de absorción capilar y permeabilidad en cloruros (Huseien et al. 2021).

La absorción de agua se utiliza para determinar la cantidad de agua absorbida en condiciones específicas que indican el grado de porosidad del material; es así que, a partir de la absorción de agua, se mostró que con el aumento CDC, la absorción de agua disminuyó ligeramente en 1.08, 1.02 y 0.67% para adiciones de CDC en 10, 20 y 30% respectivamente (Çavuşoğlu et al. 2021).

Tal como muestra la tabla 4, los porcentajes que diferentes autores optaron por añadir de CDC a concretos de 210kg/cm² con acero de refuerzo, y dando así una resistencia factible para ser utilizado en la construcción.

Tabla 4. Comparación de la resistencia de concreto a la compresión con ceniza de carbón (CDC).

Referencia	Relación agua cemento (a/c)	Contenido de CDC (%)	Concretos de 210 kg/cm ² con acero	Resistencia a los 28 días f'c (Mpa)	Porosidad Total (%)
Sobiecka, 2016	0.5	5	--	Aumenta	15.4
Svietkina et al. 2018	0.7	8	--	Aumenta	--
Adamu et al. 2021	0.8	10	Sí	Optima (35%)	13.7
Al-Hdabi, 2016	0.8	10	Sí	Optima	13.7
Águila, 2021	0.9	10	Sí	Disminuye	13.4
Delgado et al. 2016	0.6	3 al 6	--	Aumenta	--
Argiz et al.2017	0.5	6> <3	--	Disminuye Igual	14.8 15.9
Shahidan et al. 2017	0.5	5%	--	Aumenta	15.2

Influencia del CDC en la densidad del concreto

Para Hsholt et al. (2019) las características frescas y endurecidas del concreto SCC utilizando minerales CDC y cenizas volantes para sustituir parcialmente el cemento con un 10%, 20% y 30%, tomando como fuente de recursos diferentes restaurantes en Irak; durante el procedimiento para obtener las densidades óptimas de absorción y propiedades frescas, se probaron 9 moldes para recipientes de 100*100*100mm y tres de 500*100*100 mm, a una temperatura de 20°; así también para las propiedades endurecidas utilizaron la normativa ASTM C138.1986, como resultado obtuvieron que la densidad seca con 20% FA (rango de 2450-2225 kg/m³) que es aproximadamente 7% y 9.5% más baja que el mismo porcentaje con el CDC (rango de 2300 - 2475 kg/m³).

CONCLUSIONES

El porcentaje de ceniza de carbón debe ser menor a un 10%, para alcanzar máximas resistencias a la compresión de lo contrario si esta cantidad aumenta disminuirá la resistencia, por lo que se deberán utilizar aditivos como nano-sílice y entre otros insumos.

Cuando se usan cenizas de carbón en lugar de cemento para incrementar la resistencia del concreto, es necesario usarlo en una proporción óptima que vaya desde un 3% a un 6% sin necesidad de agregar otras sustancias para hacerlo viable, duradero y económico.

La ceniza de carbón incorporada al hormigón debido su finura, disminuirá su porosidad, pero esto no significa un aumento de la resistencia mecánica del hormigón.

REFERENCIAS

- ABBAS, S., ARSHAD, U., ABBAS, W., & AHMED, A. (2020). Recycling untreated coal bottom ash with added value for mitigating alkali-silica reaction in concrete: A sustainable approach. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1-24. doi:10.3390/su122410631
- ADAMU, M., HARUNA, S., IBARAHIM, S., & KINGSLEY, A. (2021). Durability performance of pervious concrete containing rice husk ash and calcium carbide: A response surface methodology approach. *Case Studies in Construction Materials*, 14, 547-556. doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00547
- AHMED, T., ELCHALAKANI, M., KARRECH, A., DONG, M., ALI, M., & YANG, H. (2021). ECO-UHPC with High-Volume Class-F Fly Ash: New Insight into Mechanical and Durability Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33, 1-8. doi:10.1061 / (ASCE) MT.1943-5533.0003726
- ALAM, J., VIRENDRA, K. Y., KUMAR, K. Y., MARINA MS, C.-P., TAVKER, N., NISHA, C., . . . ALI, A. H. (2021). Recent advances in methods for the recovery of carbon nanominerals and polyaromatic hydrocarbons from coal fly ash and their emerging applications. *Crystals*, 11(2), 1-24. doi:10.3390/cryst11020088
- AL-HDABI, A. (2016). Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. *Construction & Building Materials*, 126, 544-551. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.070
- ALIREZA, A., REZVAN, R. B., NAVID, N., FARHANG, J., & FARZIN POORHEYDARI, M. (2020). Laboratory evaluation of the effect of

- coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture. *Construction and Building Materials*, 236, 1-16. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117557
- AMERI, M., GOZALI ASL, F., MODIRI GHAREHVERAN, M., & BEHNOOD, A. (2015). Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash. *Construction and Building Materials*, 96, 172-180. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.021
- ANKUR, N., & SINGH, N. (2021). Performance of cement mortars and concretes containing coal bottom ash: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111361. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111361
- ANTONI, A., WIDIANTO, A. K., WIRANEGARA, J. L., & HARDJITO, D. (2017). Consistency of fly ash quality for making high volume fly ash concrete. *Jurnal Teknologi*, 79(7-2), 13-20. doi:10.11113 / jt.v79.11870
- ARABANI, M., TAHAMI, S. A., & TAGHIPOOR, M. (2015). Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials. *Road Materials and Pavement Design*, 18, 713-729. doi:10.1080/14680629.2016.1189349
- ARAÚJO, A. J., MACEDO, D. A., DUTRA, R. P., & CAMPOS, L. F. (2020). Effects of granite waste addition on the technological properties of industrial silicate based-ceramics. *Materials Research Express*, 12-22. doi:10.1088/2053-1591/ab62e8
- ARIF KAMAL, M. (2016). Recycling of Fly Ash as an Energy Efficient Building Material: A Sustainable Approach. *Key Engineering Materials*, 692, 54-65. doi:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.692.54
- BAHRI, S., MAHMUD, H. B., & SHAFIGH, P. (2018). Effect of utilizing unground and ground normal and black rice husk ash on the mechanical and durability properties of high-strength concrete. *Sadhana*, 43, 8. doi:10.1007/s12046-018-0795-0
- BASIRUN, N., WAN, H., JAMALUDIN, N., & PUTRA, R. (2017). A Review: The Effect of Grinded Coal Bottom Ash on Concrete. *MATEC Web of Conferences*, 103, 1-8. doi:10.1051/mateconf/201710301007
- BHAT, J. (2020). Mechanical behaviour of self compacting concrete: Effect of wood ash and coal ash as partial cement replacement. *materialstoday:PROCEEDINGS*, 1-10. doi:10.1016/j.matpr.2021.01.311
- CARO-SPINEL, S., VEGA, N., HUSSERL, J., & ÁLVAREZ, A. E. (2016). Studying the impact of biomodifiers produced from agroindustrial. *Construction and Building Materials*, 126, 369-380. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.043
- CARSANA, M., GASTALDI, M., LOLLINI, F., REDAELLI, E., & BERTOLINI, L. (2016). Improving durability of reinforced concrete structures by recycling wet-ground MSWI bottom ash. *Materials and Corrosion*, 67, 573-582. doi:10.1002/maco.201608881
- ÇAVUŞOĞLU, I., YILMAZ, E., & YILMAZ, A. O. (2021). Sodium silicate effect on setting properties, strength behavior and microstructure of cemented coal fly ash backfill. *Powder Technology*, 384, 17-28.

- doi:<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.013>
- CEN, X., WANG, Q., SHI, X., SU, Y., & QIU, J. (2019). Optimization of concrete mixture design using adaptive surrogate model. *Sustainability*, 11, 18. doi:10.3390 / su11071991
- DELGADO , E., APERADOR, W., & DUQUE, J. (2016). Comparison of electrochemical properties between portland cement, ground slag and fly ash. *International Journal of Electrochemical Science*, 11(5), 3755-3766. doi:10.20964/110471
- DEY, S., KUMAR, V. V., GOUD, K. R., & BASHA, S. K. (2021). State of art review on self compacting concrete using mineral admixtures. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6, 18. doi:10.1007/s41024-021-00110-9
- DHAWAN, A., GUPTA, N., GOYAL, R., & SAXENA, K. K. (2021). Evaluation of mechanical properties of concrete manufactured with fly ash, bagasse ash and banana fibre. *Materials Today: Proceedings*, 44, 17-22. doi:10.1016/j.matpr.2020.06.006
- GAZDIČ, D., FRIDRICOVÁ, M., KULÍSEK, K., & VEHOVSKÁ, L. (2017). The Potential Use of the FBC Ash for the Preparation of Blended Cements. *Procedia Engineering*, 180, 1298-1305. doi:10.1016/j.proeng.2017.04.292
- GOUDAR, S., SHIVAPRASAD, K., & DAS, B. (2018). Goudar, S. K., Shivaprasad, K. N., & Das, B. B. (2018) Mechanical properties of fiber-reinforced concrete using Coal-bottom ash as replacement of fine aggregate. *Sustainable Construction and Building Materials*, 25(2018), 863-872. doi:10.1007/978-981-13-3317-0_77
- GUNASEKERA, C., LAW, D.W., & SETUNGE, S. (2018). Effect of geopolymer aggregate on strength and microstructure of concrete. *ACI Materials Journal*, 115(6), 899-908. doi: 10.14359/51706846
- HASHOLT, M. T., CHRISTENSEN, K. U., & PADE, C. (2019). Frost resistance of concrete with high contents of fly ash - A study on how hollow fly ash particles distort the air void analysis. *Cement and Concrete Research*, 119, 102-112. doi:10.1016/j.cemconres.2019.02.013
- HOWLADAR, M., & ISLAM, M. R. (2016). A study on physico-chemical properties and uses of coal ash of Barapukuria Coal Fired Thermal Power Plant, Dinajpur, for environmental sustainability. *Energy, Ecology and Environment*, 1(4), 233-247. doi:10.1007/s40974-016-0022-y
- HUAQUISTO, S., & BELIZARIO, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de investigaciones altoandinas*, 20(2), 225-234. doi:10.18271/ria.2018.366
- HUSEIEN, G. F., MOHD.SAM, A. R., ALGAIFI, H. A., & ALYQUEF, R. (2021). Development of a sustainable concrete incorporated with effective microorganism and fly Ash: Characteristics and modeling studies. *Construction and Building Materials*(285), 122899. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122899>
- IBETO, C. N., OBIEFUNA, C. J., & UGWU, K. E. (2020). Environmental effects of concretes produced from partial replacement of cement and sand with coal ash. *International Journal of Environmental Science and*

- Technology*, 17, 2967–2976.
doi:<https://doi.org/10.1007/s13762-020-02682-4>
- IBRAHIM, A. H., KEONG, C. K., MEGAT JOHARI, M. A., RASHID, M. R., & ARIFFIN, K. S. (2019). Influence of coal bottom ash on properties of Portland cement mortar. *International Journal of Integrated Engineering*, 11, 069 - 077.
doi:10.30880/ijie.2019.11.02.008
- JUENGER, M. C., SNELLINGS, R., & BERNAL, S. A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 22, 257-273.
doi:10.1016/j.cemconres.2019.05.008
- KEERIO, M. A., KUMAR, A., SHAHZAIB, J., ZOHAIB, A., ALI, M., SOHU, S., & BHEEL, N. (2021). An Investigation on Fresh and Hardened Properties of Concrete Blended with Rice Husk Ash as Cementitious Ingredient and Coal Bottom Ash as Sand Replacement Material. *Silicon*.
doi:<https://doi.org/10.1007/s12633-020-00906-3>
- KUBISSA, W., TAMAS, S., JASKULSKI, R., REITERMAN, P., & SUPERA, M. (2017). Ecological High Performance Concrete. *Procedia Engineering*, 172, 595-603.
doi:10.1016/j.proeng.2017.02.186
- LEE, J.-H., & LEE, K. (2016). Carbonation behavior of lightweight foamed concrete using coal fly ash. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 53(3), 354-361.
doi:10.4191/kcers.2016.53.3.354
- LO, F., LEE, M. G., & LO, S.-L. (2021). Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 286, 122947.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122947
- MANGI, S.; IBRAHIM, M., JAMALUDDIN, N., ARSHAD, M., & MUDJANARKO, S. (2019). Recycling of coal ash in concrete as a partial cementitious resource. *Resource*, 8, 10.
doi:10.3390/resources8020099
- MARATHE, S., MITHANTHAYA, I., MITHUN, B., SHETTY, S. S., & AKARSH, P. (2021). Performance of slag-fly ash based alkali activated concrete for paver applications utilizing powdered waste glass as a binding ingredient. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14, 196-203.
doi:10.1007/s42947-020-0173-2
- MENÉNDEZ, E., SANJUÁN, M. Á., GARCÍA-ROVÉS, R., ARGIZ, C., & RECINO, H. (2021). Durability of blended cements made with reactive aggregates. *Materials*, 14, 2948.
doi:10.3390/ma14112948
- MIZAL-AZZMI, N., MOHAMAD YATIM, J., ABDUL HAMID, H., ABDUL AZIZ, A., & ADOLE, A. M. (2018). Mechanical properties of kenaf fibrous pulverized fuel ash concrete. *MATEC Web of Conferences*, 250, 1-8.
doi:10.1051/mateconf/201825005007
- MUSTAPHA, F. A., SULAIMAN, A. B., NOOR MOHAMED, R., & UMARA, S. A. (2021). The effect of fly ash and silica fume on self-compacting high-performance concrete. *Materials Today: Proceedings*, 39, 965-969.
doi:10.1016/j.matpr.2020.04.493
- MUTHUSAMY, K. B., RASID, M. H., JOKHIO, G. A., BUDIEA, A. M., HUSSIN, M. W., & MIRZA, J. (2020). Coal bottom ash as sand replacement in concrete: A review. *Construction and Building Material*, 236(117507), 1-12.

- doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117507>
- NAKAMURA, K., INOUE, Y., & KOMAI, T. (2021). Consideration of strength development by three-dimensional visualization of porosity distribution in coal fly ash concrete. *Journal of Building Engineering*, 35, 101948. doi:doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101948
- NUAKLONG, P., WONGSA, A., BOONSERM, K., NGOHPOK, C., JONGVIVATSAKUL, P., SATA, V., . . . CHINDAPRASIRT, P. (2021). Enhancement of mechanical properties of fly ash geopolymer containing fine recycled concrete aggregate with micro carbon fiber. *Journal of Building Engineering*, 41, 102403. doi:[10.1016/j.jobe.2021.102403](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102403)
- OKOYE, F. N., PRAKASH, S., & SINGH, N. B. (2017). Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1062-1067. doi:[10.1016/j.jclepro.2017.02.176](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.176)
- PRAKASH, R., THENMOZHI, R., RAMAN, S. N., & SUBRAMANIAN, C. (2020). Hormigón armado con fibras que contiene residuos de cáscara de coco, cenizas volantes y fibras de polipropileno. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(94), 33 - 42. doi:<https://doi.org/10.17533/10.17533/udea.re din.20190403>
- RAFIEIZONOOZ, M., MIRZA, J., RAZMAN SALIM, M., WARID HUSSIN, M., & KHANKHAJE, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement. *Construction and Building Materials*, 15-24. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.080>
- RAFIEIZONOOZ, M., SALIM, M. R., MIRZA, J., HUSSIN, M. W., SALMIATI, S., KHAN, R., & KHANKHAJE, E. (2017). Toxicity characteristics and durability of concrete containing coal ash as substitute for cement and river sand. *Construction and Building Materials*, 143, 234-246. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2017.03.151](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.151)
- RASHAD, M. A. (2015). A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(2), 278-306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.10.002>
- SABOO, N., SHIVHARE, S., KORI, K. K., & CHANDRAPPA, A. K. (2019). Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. *Construction and Building Materials*, 233, 322-328. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.185>
- SALONI, PARVEEN, LIM, Y. Y., PHAM, T. M., JATIN, & KUMAR, J. (2021). Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studies. *Construction and Building Materials*, 283, 122795. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122795>
- SEVIM, U. K., BILGIC, H. H., CANSIZ, Ö. F., ÖZTÜRK, M., & ATIS, C. D. (2021). Compressive strength prediction models for cementitious composites with fly ash using machine learning techniques. *Construction and Building Materials*, 271, 121584. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2020.121584](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121584)
- SHAHIDAN, S., MANGI, S. A., SENIN, M. S., MOHD ZUKI, S. S., & WAN IBRAHIM, M.

- (2021). Characterization of tyre rubber ash and crumb as fine aggregate resource. *Journal of Engineering Science and Technology*, 16, 510 - 526.
- SIDDIQUE, R., & SINGH, M. (2016). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability. *Journal of Cleaner Production*, 112, 620 - 630. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.001>
- SKIBSTED, J., & SNELLINGS, R. (2019). Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. *Cement and Concrete Research*, 124, 105799. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>
- SUKHOON, P., & HYEONG-KI, K. (2017). Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder. *Construction and Building Materials*, 459-466. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.109>
- TEARA, A., & SHU ING, D. (2020). Mechanical properties of high strength concrete that replace cement partly by using fly ash and eggshell powder. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 120, 102942. doi:[10.1051/mateconf/20166600034](https://doi.org/10.1051/mateconf/20166600034)
- WALLACE CAVALCATE FERRÃO, & JOEL CARLOS MOIZINHO. (2017). The Influence of Unusual Materials as Prospective Fillers in the Hot Mix Asphalt. *Materials Science and Engineering*, 245, 022067. doi:[10.1088/1757-899X/245/2/022067](https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022067)
- YANG, I. H., PARK, J., DINH LE, N., & JUNG, S. (2020). Strength Properties of High-Strength Concrete Containing Coal Bottom Ash as a Replacement of Aggregates. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 4246396. doi:<https://doi.org/10.1155/2020/4246396>
- ZHENNA, Z., DANLONG, L., XIAOKANG, Y., & HAIJUN, Z. (2019). Effects of particle size on the flotation behavior of coal fly ash. *PubMed*, 490-497. doi:[10.1016/j.wasman.2019.01.017](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.017)
- ZHIPENG, L., GANG, X., & XIANMING, S. (2021). Reactivity of coal fly ash used in cementitious binder systems: A state-of-the-art overview. *Fuel*, 301, 121031. doi:[10.1016/j.fuel.2021.121031](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121031)

Recibido: 11-07-2021 Aceptado: 26-07-2021 Publicado: 22-09-2021