

# State of the Art: Process of Pozzolan Formation from Ash and its Applications

## Estado del arte: proceso de formación de puzolanas a partir de cenizas y sus aplicaciones

H. Gallego \* \*\*, E. Toro <sup>1</sup> \*\*, R. Rojas \*\* \*\* \*\*

\* Universidad del Valle – Cali, COLOMBIA

\*\* Universidad Nacional a Distancia – Cali, COLOMBIA

\*\*\* Universidad – ICESI, Cali, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 23/01/2020

Fecha de Aceptación: 07/04/2020

PAG 119-125

### Abstract

*A brief presentation is made on the problem of fly ash from sugar production, which can be transformed into pozzolan through physical, thermal, chemical or mixed activation, and then used as a chemical corrector and additive for the production of Portland cement. The conversion of the ash into pozzolans is carried out with hydrothermal processes that include repetitive actions of incubation, filtration and drying, for which an alkali solution is used at high temperatures, where compounds such as zeolites are formed from the amorphous aluminosilicates present, being necessary in some cases to adjust the Si/Al ratio to produce the desired type of pozzolan. It is concluded that the use of fly ash, as a chemical corrector in the raw clinker mix, depends on the purity of the limestone and the evaluation of the chemical balance of the mix.*

*Keywords: Pozzolan; fly ash; industrial byproducts; sustainability*

### Resumen

Se hace una breve presentación sobre el problema de las cenizas volantes provenientes de la producción de azúcar, las cuales se pueden transformar en puzolana por medio de activación física, térmica, química o mixta, para luego ser utilizadas como corrector químico y adición para la producción de cemento Portland. La conversión de las cenizas en puzolanas se lleva a cabo con procesos hidrotérmicos que incluyen acciones repetitivas de incubación, filtración y secado, para lo cual se utiliza una solución alcalina a altas temperaturas, en donde se forman compuestos como zeolitas a partir de los aluminosilicatos amorfos presentes, siendo necesario en algunos casos, ajustar la proporción de Si/Al para producir el tipo de puzolana deseada. Se concluye que el uso de cenizas volantes, como corrector químico en la mezcla cruda del clínker, depende de la pureza de la piedra caliza y de la valoración del balance químico de la mezcla.

**Palabras clave:** Puzolana; ceniza volante; subproductos industriales; sostenibilidad

## 1. Introducción

En la cogeneración de energía se pueden utilizar diferentes tipos de materiales orgánicos, solos o mezclados entre sí, como residuos sólidos municipales, lodos de depuradora, biomásas, bagazo y carbón, siendo necesario conocer y adecuar las tecnologías de incineración (combustión) a los requerimientos energéticos impuestos por el combustible (Gallego Ocampo, 2015). En la industria azucarera colombiana, es muy común utilizar la mezcla carbón-bagazo como combustible en las calderas de potencia, por la capacidad termodinámica generada (alto poder calorífico) para la producción de energía eléctrica, mecánica y térmica (Margallo et al., 2015); (Mohee et al., 2015).

Durante la combustión se generan grandes cantidades de cenizas -las cuales son consideradas como residuos- por lo que, en la mayoría de los casos, son dispuestas por la industria azucarera en carreteras y lotes baldíos, desaprovechándose de esta manera el potencial que posee el subproducto como cementante, sustituto de Clinker y cemento en morteros y concretos; ya que las cenizas contienen en su estructura minerales puzolánicos como Al, Si, K, Ca, Br, Fe, Mg, Na, Mn con sus correspondientes óxidos ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $SiO_4$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $Br$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $MnO$ ), las cuales reaccionan químicamente durante la combustión dando lugar a la formación del cuarzo ( $SiO_2$ ) y corindón ( $Al_2O_3$ ) a los  $560^\circ C$  debido a la presencia de Ca y S y a la fusión del cuarzo, sílice y de los aluminosilicatos a temperaturas comprendidas entre los  $600$  y  $800^\circ C$ . Sin embargo, la anortita ( $CaAl_2Si_2O_8$ ) se forma a los  $700^\circ C$  al reaccionar el  $CaO$  con el  $Al_2O_3$  y  $SiO_2$  (Jagadesh y Ramachandramurthy, 2015); (Melissari, 2012); (Van Dyk, 2006); (Zhang et al., 2013a).

---

#### Autor de correspondencia:

Universidad Nacional a Distancia – Cali, COLOMBIA  
E-mail: efertoro@hotmail.com



## 2. Cenizas

Las cenizas son el producto final de la reacción de combustión a temperaturas comprendidas entre los 1200 y 1700°C, en donde el combustible puede ser carbón, bagazo, lodos, residuos sólidos municipales y el comburente aire y/o gas. Durante la combustión se llevan a cabo procesos de vaporización, precipitación, nucleación y coalescencia, tal como se observa en la (Figura 1), en este caso, la parte orgánica e inorgánica del combustible sufre transformaciones químicas y físicas a altas temperaturas (Mejía et al., 2014); (Melissari, 2012).

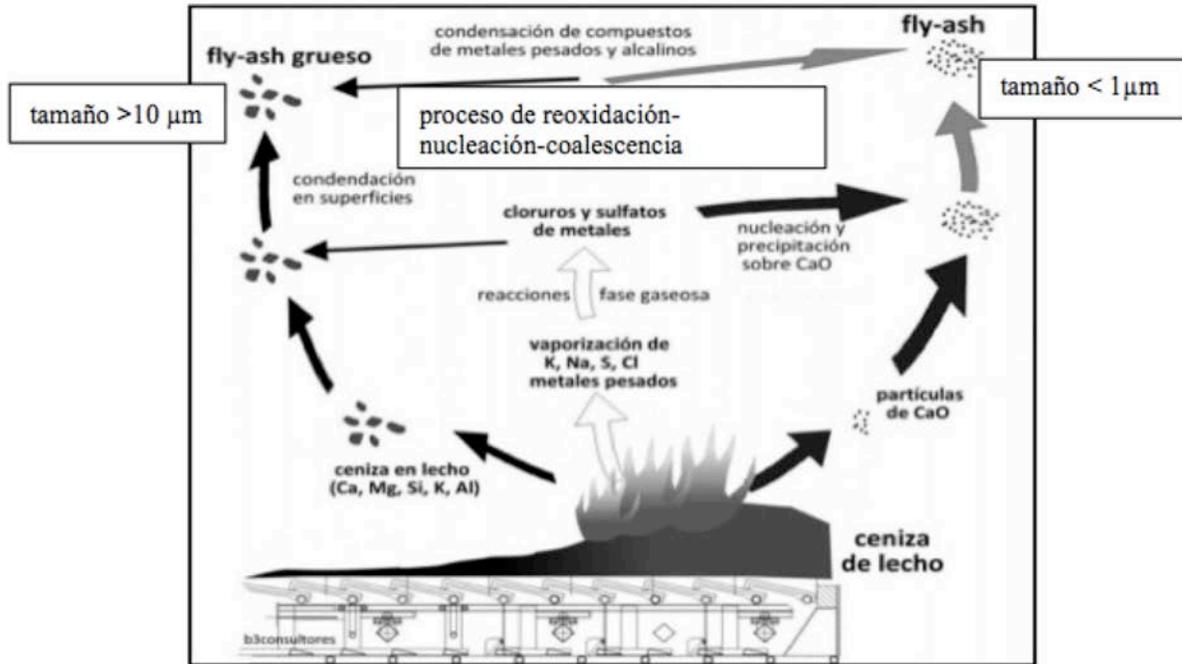


Figura 1. Mecanismo de formación de cenizas. Fuente: (Melissari, 2012).

Las cenizas pueden contener compuestos de alúmina y sílice que incluyen mullita, cuarzo, hematita y calcita y algunos compuestos inorgánicos como la cal y los sulfatos, en donde, a bajos contenidos de calcio, predominan los compuestos cristalinos como el cuarzo y la mullita, mientras que a altos contenidos de calcio predominan los aluminosilicatos como aluminato tricálcico, silicato de calcio y aluminosilicato tetracálcico (Fotovát et al., 2009); (Jankowski et al., 2006). Por otro lado, si el bagazo de caña es calcinado a 600°C durante 6 horas, se puede obtener cenizas con un porcentaje en peso de 84% de SiO<sub>2</sub> tanto en la fase cristalina como en la fase amorfa (Paula et al., 2009).

## 3. Materiales puzolánicos

Los materiales puzolánicos se caracterizan por el empaquetamiento de partículas minerales, en donde la sílice amorfa al entrar en contacto con el agua se solubiliza y reacciona con los iones de Ca<sup>2+</sup> presentes en Ca(OH)<sub>2</sub>, formando silicatos de hidróxido hidratados similares a los producidos en las reacciones de hidratación del cemento como se muestra en (Ecuación 1), en donde el alto contenido de sílice, alúmina y óxido de hierro favorece la actividad puzolana de las cenizas (Abiodun y Jimoh, 2018); (Ribeiro y Morelli, 2014).



La puzolanidad de un compuesto silíceo y aluminoso es función de la composición química, la amorficidad de las fases y la finura, variables que dependen de: la temperatura de activación (entre los 600 y 800°C); forma de captura (húmedo o seco) y almacenamiento; ya que si el material se captura húmedo, se vuelve engorroso el proceso de tratamiento (Ribeiro y Morelli, 2014).



Las cenizas tal como salen del proceso de incineración tendrían una baja actividad puzolánica por poseer tamaños grandes de partícula, en este caso, las cenizas actuarían como un material inerte o sin actividad (filler), por lo que es necesario someterlas a procesos de molienda y tamizado (Kumar y Kumar, 2011); (Margallo et al., 2015); (Park et al., 2016); (Sahoo, 2016; ). El tamaño promedio de partícula de la puzolana puede variar entre 6 y 13  $\mu\text{m}$  dependiendo de la gradación, distribución y finura del cemento (Bentz et al., 2011); (Erdođdu y Türker, 1998); (Givi et al., 2010); (Seraj et al., 2017). Coincidentalmente, en Colombia, el cemento se elabora con un tamaño de partícula entre 8 y 14  $\mu\text{m}$  (Mendoza et al., 2014); (Tobón y Restrepo, 2010).

#### 4. Procesamiento físico-químico para la activación de las cenizas como puzolana

Los cambios físico-químicos de volumen y de superficie que tienen lugar en las cenizas durante la reducción de tamaño, favorecen la desorción reversible del agua, la reactividad química para el intercambio de iones durante las transformaciones minerales, la formación de silicatos de metales alcalinos (K, Na) por la fusión e interacción química del cuarzo y la sílice con otros componentes de las cenizas, las cuales ocurren por: la fusión de aluminosilicatos; la descomposición de carbonatos, oxalatos, cloruros y otras sales inorgánicas; la volatilización de metales alcalinos y otros metales pesados; la fragmentación de partículas por choque térmico y emisión rápida de gases de estas; la coalescencia y aglomeración de partículas minerales (Blissett, 2012); (Hela et al., 2013); (Sahoo, 2016).

Cuando las cenizas son sometidas a procesos hidrotérmicos en una solución álcali como NaOH,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  y KOH a altas temperaturas, tienden a formar nuevos compuestos como zeolitas a partir de los aluminosilicatos amorfos presentes, los cuales se disuelven en la mezcla de reacción y luego se agrupan, se nuclean y crecen como cristales en la superficie de las cenizas de carbón (debido a la presencia de elementos traza como  $\text{TiO}_2$ , MnO, MgO,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , carbonatos y sulfatos). El grado de disolución de los aluminosilicatos determina el porcentaje de conversión y la velocidad de formación de la puzolana, la cual puede verse afectada por factores químicos, tales como: cantidad de hidróxido de calcio disponible para la reacción, naturaleza de la fase activa, contenido de  $\text{SiO}_2$  en las cenizas, relación  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /aluminosilicatos, composición cristalográfica, alcalinidad de la fase acuosa, relación Si/Al, tiempo de reacción y de factores físicos como el área superficial, relación sólido/agua, temperatura, presión, fuentes de calentamiento (hornos convencionales, autoclaves, microondas (MW), ultrasonido (US), entre otros). En algunos casos, es necesario ajustar la proporción de Si/Al agregando aluminatos o silicatos para producir el tipo de puzolana deseada. La evaluación de la efectividad del tratamiento químico se determina por prueba de activación o pruebas indicadoras de puzolanidad, como la prueba de Frattini o el índice de actividad mecánica que se realiza para el cemento Portland (Hollman et al., 1999); (Muraza et al., 2013); (Ribeiro y Morelli, 2014); (Zhang et al., 2013a).

La síntesis hidrotérmica directa de la puzolana (periodo de incubación – inducción) se realiza al mezclar 500 g de ceniza volátil en 1.25  $\text{dm}^3$  de una solución de NaOH al 2 M, seguido por el tratamiento térmico a 90°C por 96 h, tiempo durante el cual se estabiliza la concentración de Si a 6800  $\text{mg}/\text{dm}^3$ . Durante el proceso, se alcanza una máxima concentración de Si (inicio de la cristalización), mientras que el aluminio alcanza un máximo de concentración al inicio de la reacción y luego disminuye hasta cero una hora después de empezar el proceso de cristalización del Si. A los 400 y 600°C se pierde el carbón durante la calcinación y a los 800°C se forman los compuestos cristalinos de sílice, causando la disminución de la actividad puzolánica, por lo que la temperatura óptima para generar sílica amorfa con un índice de actividad puzolánica del 77% y una pérdida de ignición del 5.7% es 600°C (Cordeiro et al., 2009); (Feng et al., 2018).

Otros tratamientos hidrotérmicos incluyen acciones repetitivas de incubación, filtración y secado (residuo sólido – formación de cristales) a las mismas condiciones de mezcla y de incubación pero a diferentes tiempos para ajustar la relación molar de Si/Al entre 0.8 y 2. El primer proceso de incubación se realiza por 6 h, luego se somete al proceso de filtración, para separar el residuo sólido (cristales formados) y ajustar el filtrado; el residuo sólido es secado, mientras al filtrado se le ajusta la relación molar de Si/Al. En el segundo proceso, se incuba el filtrado ajustado durante 48 h, mientras se realiza nuevamente la filtración y el secado; el nuevo filtrado es mezclado con el residuo sólido obtenido durante el primer proceso de incubación e incubado nuevamente durante 24 h (Behin et al., 2016)

Los métodos hidrotérmicos convencionales para la conversión de cenizas son ineficientes industrialmente, debido a: excesivos tiempos empleados y costos asociados y a la baja eficiencia en la producción de las zeolitas. Además de la cantidad de agua empleada para neutralizar la solución de NaOH, ya que después del tratamiento de activación, se torna un problema al disponer el líquido al sistema de alcantarillado. Sin embargo, se ha realizado tratamientos iguales pero con cero descargas al sistema de alcantarillado, reduciendo el consumo de agua y de NaOH en un 50 y 90%, al recircular la solución de NaOH a lo largo del proceso (Behin et al., 2016).

El proceso de formación de puzolanas (síntesis hidrotérmica) con microondas permite acortar el tiempo de cristalización por el calentamiento homogéneo de la mezcla de síntesis a presión atmosférica, y acelerar el proceso



de nucleación (velocidad rápida de reacción), produciéndose cristales de zeolitas puros con diferentes morfologías, gracias al calentamiento inductivo, a la disipación específica de la energía en las moléculas de agua presentes en la capa límite de la superficie y a la inmovilización de iones y cationes metálicos pesados como Ba, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb y V presentes en las cenizas, mientras se disuelve la misma cantidad de Si y de Al (Bukhari et al., 2014); (Kim y Lee, 2009); (Muraza et al., 2013); (Tanaka et al., 2008); (Zhang et al., 2013b).

Por otro lado, el tratamiento ultrasónico llevado a cabo a 300 W con soluciones alcalinas con concentraciones de NaOH entre 1 M y 5 M (a una relación sólido – líquido de 0.5 g/cm<sup>3</sup>) a diferentes intervalos de tiempo entre 30 minutos y 2 h, mejora la transferencia de masa a partir de la cavitación acústica y al colapso de las microburbujas generadas en la fase líquida, produce un cambio de fase correspondiente a la formación de hidroxisodalita, acelera los procesos químicos como la disolución de Al/Si, refuerza los enlaces de las partículas en la interfaz sólido/gel (aumento de la cristalización) y acelera la velocidad de nucleación secundaria. (Andaç et al., 2005); (Belviso et al., 2011); (Hums et al., 2015); (Wang y Zhu, 2005).

## 5. Aplicaciones de la puzolana

El aprovechamiento de las puzolanas en las cementeras como corrector químico y adición para la producción de cemento Portland, aporta ventajas significativas tanto a nivel económico como ambiental, ya que al sustituir una porción del cemento Portland por las puzolanas se reduce la generación de los gases de efecto invernadero producidos durante la calcinación de la caliza (CaO) al producir cemento, mientras se reducen los costos operativos (Gorai y Ash, 2018).

### 5.1 Corrector químico para la obtención de Clinker

Un corrector químico es una materia prima que expone una alta composición de óxido de sílice (SiO<sub>2</sub>), de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); el cual se le adiciona a una mezcla de calizas trituradas y lechada de arcilla para obtener el Clinker, donde la composición química es un elemento concluyente en el desarrollo de las propiedades cementantes, por lo que la calidad del Clinker depende del control químico de la lechada (Enríquez, 2019).

Los correctores químicos se adicionan para equilibrar la composición de los componentes del Clinker (silicatos de calcio, aluminato tricálcico y aluminoferrita cálcica); los cuales se generan en la sinterización de las arcillas y piedra caliza. El balance se efectúa cuando la cantidad de los compuestos presentes en la mezcla cruda son insuficientes para producir el Clinker; se usa materiales denominados “segundas materias primas”, tales como: arcilla, lutita, arena, mineral de hierro, bauxita, cenizas volantes y escoria (Benzaazoua et al., 2010).

La proporción que se utiliza de cenizas volantes como corrector químico en la mezcla cruda del clinker es de 5% al 25%, aunque depende de la pureza de la piedra caliza y de la valoración del balance químico (Ferrari et al., 2012). Las ventajas de usar subproductos industriales como corrector químico son: la disminución de los costos operativos asociados a la materia prima primaria y el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas del cemento Portland (Enríquez, 2019). Por otra parte, las exigencias que debe tener un corrector químico es el bajo contenido de impurezas para evitar inconvenientes en la manufactura del Clinker, como en el caso del óxido de magnesio (MgO); el cual compromete la durabilidad del cemento, si su contenido en las materias primas es superior al 5% (Ahmaruzzaman, 2010); (Blissett, 2012); (Mayor, 2014); (Toro et al., 2014).

### 5.2 Adición para cemento Portland

El sub-producto industrial es considerado puzolana si la concentración de hidróxido de calcio en solución es menor que la concentración de saturación. El efecto puzolánico se establece por una disminución en la concentración de CaO en la fase líquida, ya que el hidróxido de calcio generado a través de la hidratación del cemento es secuestrado y combinado por la puzolana (Ribeiro y Morelli, 2014).

Las cenizas volantes por sus características fisicoquímicas como puzolanas se emplean como adición para el Clinker de cemento y prefabricados, debido a su alto potencial de puzolanidad (Rougeau, 2004). La adición de cenizas volantes de bagazo de caña con reactividad puzolánica puede formar compuestos con propiedades cementantes que cumplen los estándares dados en la norma colombiana NTC 3493 y estadounidense ASTM C618, (ASTM, 2005); (Icontec, 2017). Aunque se debe de tener cuidado, al usar la ceniza de bagazo como adición, ya que un exceso de materia orgánica produce inquemados que contienen sulfatos alcalinos, los cuales reaccionan con el aluminato tricálcico, constituyendo la ettringita, la cual es una sustancia expansiva que afecta las propiedades mecánicas y de durabilidad del compuesto (Valencia et al., 2018). Por ende, existen limitaciones en el empleo de las puzolanas a partir de cenizas de bagazo de caña, en el caso del porcentaje de carbón; el mineral es el remanente del resultado de la mezcla de carbón mineral y bagazo, el cual es denominado en la industria como “inquemados”; por lo que se recomienda que el mineral sea inferior al 5%; ya que forma componentes que



influyen negativamente en la durabilidad y las propiedades del concreto hidráulico (Camilo y Gutiérrez, 2006); (Ribeiro y Morelli, 2014).

La sustitución de iones de CaO y OH<sup>-</sup> por cenizas provenientes del bagazo de caña de azúcar genera una reactividad puzolánica independiente de la temperatura de calcinación de la ceniza (Onésippe et al., 2010); (Ribeiro y Morelli, 2014). En una mezcla de concreto es factible reemplazar entre un 10 – 50% el cemento Portland ordinario por cenizas de bagazo de caña con actividad puzolánica, lo cual puede aumentar la durabilidad del concreto, especialmente la resistencia a la penetración de cloruro (Nunes, 2009); (Paula et al., 2009); (Rerkpiboon et al., 2015); (Xu et al., 2018). Sin embargo, la sustitución de cenizas de bagazo de caña en el intervalo 15 – 20% por cemento Portland produce el mejor comportamiento en pruebas de resistencia a compresión (Pereira et al., 2018).

## 6. Conclusiones

El alto contenido de sílice, alúmina y óxido de hierro favorece la actividad puzolana de las cenizas, por lo que su reactividad depende de la composición química, la amorficidad de las fases y la finura, así como de la temperatura de activación, siendo necesario establecer el método de síntesis hidrotérmica que mejor se adapte a los requerimientos químicos de activación de las cenizas como puzolanas.

Para obtener cenizas con un contenido de SiO<sub>2</sub> de 84% (porcentaje en peso), tanto en la fase cristalina como en la fase amorfa, se debe llevar a cabo un proceso de activación térmica a temperaturas de calcinación alrededor de 600°C durante 6 horas (síntesis hidrotérmica). El grado de disolución de los aluminosilicatos en las cenizas determina el porcentaje de conversión y la velocidad de formación de la puzolana.

Los métodos hidrotérmicos convencionales para la transformación de cenizas a puzolanas son ineficaces industrialmente; por el contrario, los procesos modernos de formación de puzolanas, tal como la síntesis hidrotérmica con microondas y ultrasonido permiten la transformación del subproducto a puzolanas eficientemente.

El uso de cenizas volantes provenientes del bagazo de caña como puzolana como corrector químico en la mezcla cruda del clínker va a depender de la pureza de la piedra caliza y de la valoración del balance químico, por lo que pueden reemplazar en una mezcla de concreto hasta en un 20% el cemento Portland y mejorar la resistencia a la compresión.

## 7. Referencias

- Abiodun, Y. O.; Jimoh, A. A. (2018).** Microstructural characterisation, physical and chemical properties of rice husk ash as viable Pozzolan in building material: a case study of some Nigerian grown rice varieties. *Nigerian Journal of Technology*, 37(1), 71. <https://doi.org/10.4314/njt.v37i1.10>.
- Ahmaruzzaman, M. (2010).** A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*. 36(3), 327-363. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.11.003>.
- Andaç, Ö.; Tatlier, M.; Sirkecioğlu, A.; Ece, I.; Erdem-Şenatalar, A. (2005).** Effects of ultrasound on zeolite A synthesis. *Microporous and Mesoporous Materials*, 79(1), 225–233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.11.007>.
- ASTM C. (2005).** C-618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM). Annual Book of ASTM Standard.
- Behin, J.; Bukhari, S. S.; Kazemian, H.; Rohani, S. (2016).** Developing a zero liquid discharge process for zeolitization of coal fly ash to synthetic NaP zeolite. *Fuel*, 171, 195–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.073>.
- Belviso, C.; Cavalcante, F.; Lettino, A.; Fiore, S. (2011).** Effects of ultrasonic treatment on zeolite synthesized from coal fly ash. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(2), 661–668. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2010.08.011>.
- Bentz, D. P.; Ferraris, C. F.; Filliben, J. J. (2011).** Optimization of Particle Sizes in High Volume Fly Ash Blended Cements. NISTIR 7763.
- Benzaazoua, M.; Peyronnard, O.; Belem, T.; Stephant, A.; Dublet, G. (2010).** Key issues related to behaviour of binders in cemented paste backfilling. *Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, (December 2015), 345–363. [https://doi.org/10.36487/acg\\_rep/1063\\_30\\_benzaazoua](https://doi.org/10.36487/acg_rep/1063_30_benzaazoua).
- Blissett, R. S.; Rowson, N. A. (2012).** A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024>.
- Bukhari, S. S.; Behin, J.; Kazemian, H.; Rohani, S. (2014).** A comparative study using direct hydrothermal and indirect fusion methods to produce zeolites from coal fly ash utilizing single-mode microwave energy. *Journal of Materials Science*, 49(24), 8261–8271. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8535-2>.
- Camilo, J.; Gutiérrez, R. (2006).** Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland. *Dyna*, 73(150), 131–141.
- Cordeiro, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Fairbairn, E. M. R. (2009).** Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3301–3303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>.
- Enríquez, M. (2019).** Aprovechamiento de residuos industriales para la obtención de clínker. Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química. Bogotá, Colombia. <http://bdigital.unal.edu.co/73314/2/MaryeniEnr%C3%ADquez.2019.pdf>.



- Erdoğan, K.; Türker, P. (1998).** Effects of fly ash particle size on strength of portland cement fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, 28(9), 1217–1222. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00116-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00116-1).
- Feng, W.; Wan, Z.; Daniels, J.; Li, Z.; Xiao, G.; et al. (2018).** Synthesis of high quality zeolites from coal fly ash: Mobility of hazardous elements and environmental applications. *Journal of Cleaner Production*, 202, 390–400. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.140>.
- Ferrari, L.; Kaufmann, J.; Winnefeld, F.; Plank, J. (2012).** Reaction of clinker surfaces investigated with atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, 35, 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.089>.
- Fotovat, F.; Kazemeini, M.; Kazemian, H. (2009).** Novel utilization of zeolited fly ash hosting cobalt nanoparticles as a catalyst applied to the Fischer-Tropsch synthesis. *Catalysis Letters*, 127(1–2), 204–212. <https://doi.org/10.1007/s10562-008-9671-6>.
- Gallego Ocampo, H. L. (2015).** Reactivity of the co-combustion of coal-sludge. *UG Ciencia* 21, 91–102.
- Givi, A. N.; Rashid, S. A.; Aziz, F. N. A.; Salleh, M. A. M. (2010).** Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2145–2150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.045>.
- Gorai, S.; Ash, F. (2018).** Utilization of Fly ash for sustainable environment management. *Journal of Materials and Environmental Science* V.9 (2), 385–393.
- Hela, R.; Orsakova, D.; Orsáková, D. (2013).** The mechanical activation of fly ash. *Procedia Engineering*, 65(November), 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.016>.
- Hollman, G. G.; Steenbruggen, G.; Janssen-Jurkovičová, M. (1999).** A two-step process for the synthesis of zeolites from coal fly ash. *Fuel*, 78(10), 1225–1230. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00030-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00030-7).
- Hums, E.; Musyoka, N. M.; Baser, H.; Inayat, A.; Schwieger, W. (2015).** In-situ ultrasound study of the kinetics of formation of zeolites Na-A and Na-X from coal fly ash. *Research on Chemical Intermediates*, 41(7), 4311–4326. <https://doi.org/10.1007/s11164-014-1531-y>.
- Icontec (2017).** NTC 3493: Civil Engineering And Architecture. Fly Ash And Raw Or Calcined Natural Pozzolan For Use In Concrete. Icontec.
- Jagadesh, P.; Ramachandramurthy, A. (2015).** Micro-analytical studies on sugar cane bagasse ash. *Sadhana*, volumen 40 (August), 1629–1638.
- Jankowski, J.; Ward, C. R.; French, D.; Groves, S. (2006).** Mobility of trace elements from selected Australian fly ashes and its potential impact on aquatic ecosystems. *Fuel*, 85(2), 243–256. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.05.028>.
- Kim, J. K.; & Lee, H. D. (2009).** Effects of step change of heating source on synthesis of zeolite 4A from coal fly ash. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15(5), 736–742. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2009.09.055>.
- Kumar, S.; Kumar, R. (2011).** Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. *Ceramics International*, 37(2), 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.038>.
- Margallo, M.; Taddei, M. B. M.; Hernández-Pellón, A.; Aldaco, R.; Irabien, Á. (2015).** Environmental sustainability assessment of the management of municipal solid waste incineration residues: A review of the current situation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(5), 1333–1353. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0961-6>.
- Mayor, J. D. L. (2014).** Efecto de las cenizas volantes tratadas térmicamente como sustituto parcial del cemento en morteros. Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero de Materiales. Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería de Materiales. Santiago de Cali, Colombia.
- Mejía, J. M.; Rodríguez, E. D.; De Gutiérrez, R. M. (2014).** Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros. *Ingeniería y Universidad*, 18(2), 309–327. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.IYU18-2.upcv>.
- Melissari, B. (2012).** Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica, 10, 69–82.
- Mendoza, O.; Sierra, G.; Tobón, J. I. (2014).** Effect of the reagglomeration process of multi-walled carbon nanotubes dispersions on the early activity of nanosilica in cement composites. *Construction and Building Materials*, 54, 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.084>.
- Mohee, R.; Boojhawon, A.; Sewhoo, B.; Rungasamy, S.; Somaroo, G. D.; Mudhoo, A. (2015).** Assessing the potential of coal ash and bagasse ash as inorganic amendments during composting of municipal solid wastes. *Journal of Environmental Management*, 159, 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.008>.
- Muraza, O.; Bakare, I. A.; Tago, T.; Konno, H.; Adedigba, A. lateef, Al-Amer, A. M.; et al. (2013).** Controlled and rapid growth of MTT zeolite crystals with low-aspect-ratio in a microwave reactor. *Chemical Engineering Journal*, 226, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.072>.
- Nunes, I. H. S. (2009).** Estudo Das Características Físicas E Químicas Da Cinza Do Bagaço De Cana-De-Açúcar Para Uso Na Construção. *Revista Tecnológica*, V.17 (1) <http://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/8728>.
- Onésippe, C.; Passe-Coutrin, N.; Toro, F.; Delvasto, S.; Bilba, K.; Arsène, M. A. (2010).** Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 41 (4), 549–556. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X10000096>.
- Park, S. M.; Jang, J. G.; Lee, N. K.; Lee, H. K. (2016).** Physicochemical properties of binder gel in alkali-activated fly ash/slag exposed to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 89, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.004>.
- Patil, A. G.; Anandhan, S. (2012).** Ball Milling of Class-F Indian Fly Ash Obtained from a Thermal Power Station. *International Journal of Energy Engineering(IJEE)*, 2 (2), 57–62.
- Paula, M. O. De; Tinôco, I. D. F. F.; Rodrigues, C. D. S.; Saraz, J. A. O. (2009).** Sugarcane Bagasse Ash as a Partial-Portland-Cement- Replacement material. *Dyna*, 77(163), 47–54.
- Pereira, A. M.; Moraes, J. C. B.; Moraes, M. J. B.; Akasaki, J. L.; Tashima, M. M.; Soriano, L.; Monzó, J.; Payá, J. (2018).** Valorisation of sugarcane bagasse ash (SCBA) with high quartz content as pozzolanic material in Portland cement mixtures. *Materiales de Construcción*, 68 (330), 1–10. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.00617>.
- Rerkpiboon, A.; Tangchirapat, W.; Jaturapitakkul, C. (2015).** Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 101, 983–989. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.140>.
- Ribeiro, D. V.; Morelli, M. R. (2014).** Effect of Calcination Temperature on the Pozzolanic Activity of Brazilian Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA). *Materials Research*. vol.17 no.4 <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000093>.
- Rougeau, P. (2004).** Ultra-high-performance concretes: First recommendations and examples of application. In *Proceedings of the fib Symposium 2004 - Concrete Structures: The Challenge of Creativity*.
- Sahoo, S. (2016).** A Review of Activation Methods in Fly Ash and the Comparison in Context of Concrete Strength. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 3(10), 883–887.
- Seraj, S.; Cano, R.; Ferron, R. D.; Juenger, M. C. G. (2017).** The role of particle size on the performance of pumice as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 80, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.009>.

ENGLISH VERSION.....

- Sevim, O.; Demir, I. (2016).** Particle size optimization of fly ash. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering (IJAMCE)* Volume-4, Issue-1. pp. 85-87.
- Tanaka, H.; Fujii, A.; Fujimoto, S.; Tanaka, Y. (2008).** Microwave-assisted two-step process for the synthesis of a single-phase Na-A zeolite from coal fly ash. *Advanced Powder Technology*, 19(1), 83–94. <https://doi.org/10.1163/156855208X291783>.
- Tobón, D.; Restrepo, O. J. (2010).** Comparative Analysis of Performance of Portland Cement Blended With Nanosilica and Silica Fume. *DYNA*, Volumen 77, Número 163, p. 37-46.
- Toro, F.; Gordillo, M.; Delvasto, S.; Savastano, H. (2014).** Modelación del módulo de la resistencia a la flexión de un material compuesto cementicio a partir de propiedades en estado fresco. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(1), 115–127. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732014000100008>.
- Valencia Saavedra, W. G.; Angulo Ramírez, D. E.; Mejía de Gutiérrez, R. (2018).** Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/ escoria: Sulfatos y ácidos. *Informador Técnico*, 82(1), 67-77. <https://doi.org/10.23850/22565035.1351>.
- Van Dyk, J. C. (2006).** Understanding the influence of acidic components (Si, Al, and Ti) on ash flow temperature of South African coal sources. *Minerals Engineering*, 19 (3), 280–286. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.06.018>
- Wang, S.; Zhu, Z. H. (2005).** Sonochemical treatment of fly ash for dye removal from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 126(1), 91–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.06.009>.
- Xu, Q.; Ji, T.; Gao, S. J.; Yang, Z.; Wu, N. (2018).** Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials*, 12 (1). <https://doi.org/10.3390/ma12010039>.
- Zhang, X.; Tang, D.; Jiang, G. (2013a).** Synthesis of zeolite NaA at room temperature: The effect of synthesis parameters on crystal size and its size distribution. *Advanced Powder Technology*, 24(3), 689–696. <https://doi.org/10.1016/J.APT.2012.12.010>.

