

Empleo de morteros estructurales eco-eficientes. Revisión crítica desde un análisis DAFO.

**González-Kunz, Rocío⁽¹⁾; Pineda, Paloma⁽²⁾; Brás, Ana⁽³⁾; Morillas,
Leandro⁽⁴⁾**

(1) Doctoranda del Programa de Doctorado en Arquitectura (línea Estructuras en la Edificación y en la Obra Civil), Universidad de Sevilla, España

(2) Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del terreno, Escuela de Arquitectura, Universidad de Sevilla. España.

(3) Departamento de Ingeniería Civil, NOVA Universidad de Lisboa, Portugal

(4) Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del terreno, Mecánica de medios continuos y Teoría de estructuras, Universidad de Valladolid, España.

Resumen. Uno de los principales detonantes del cambio climático son las emisiones de CO₂. En el ámbito de la arquitectura y la construcción, uno de los materiales más perjudiciales en relación a su uso y su poder contaminante es el cemento (entre el 5 y 8% de las emisiones de CO₂ en el mundo son generadas por éste). Por tanto, es fundamental buscar alternativas a su uso.

Esta investigación muestra la posibilidad del uso de morteros eco-eficientes como materiales estructurales que garanticen tanto la seguridad de la construcción como la preservación del medioambiente en intervenciones de refuerzo/rehabilitación/consolidación estructural. En estos morteros, el conglomerante o bien es un material distinto al cemento o se realiza la sustitución de parte de éste por materiales orgánicos o inorgánicos como cenizas volantes, residuos de altos hornos, cáscaras de arroz, cenizas de aceite de palma, entre otros, con lo que también se propiciaría la reducción de residuos que pasarían a inmovilizarse sin contaminar la naturaleza. Así, se fomenta el reciclaje de la arquitectura, siendo éste un factor clave para un hábitat sostenible. Los resultados obtenidos permiten establecer una guía que facilite a los agentes implicados en las actuaciones de intervención estructural la selección de morteros eco-eficientes óptimos, tanto para garantizar la seguridad como para preservar el medioambiente.

Palabras clave Refuerzo estructural, Rehabilitación, Mortero, Eco-eficiente.

1 Introducción

En la actualidad, la rehabilitación estructural de edificios existentes se ha convertido en una atractiva alternativa a la nueva construcción.

Así, la sociedad muestra una creciente preocupación por la contaminación medioambiental. La construcción de nueva planta es altamente responsable de dicha contaminación ya que, el cemento, principal material constructivo en la arquitectura actual, es uno de los materiales con mayor demanda energética y emisiones de CO₂ en su producción, Fig. 1.

Por esta razón, la búsqueda de alternativas a este material, aunque son contempladas en normas como la EC2 y EHE2008, es un gran reto para la investigación y mejora de la arquitectura actual.

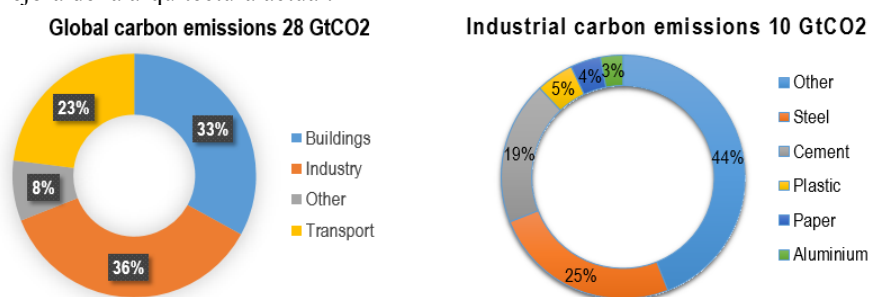


Fig. 1 Análisis global de emisiones de CO₂ en 2006 demostrando la importancia de los 5 materiales clave. (Allwood J. et al, Material efficiency: A white paper, Resources, Conservation and Recycling, Volume 55, Issue 3, January 2011, Pages 362–381)

2 Morteros eco-eficientes

A continuación, se presenta una relación de morteros eco-eficientes formados por sustitución parcial o total del cemento por otros materiales. La revisión a desarrollar se basa en la siguiente clasificación:

- (i) Morteros de cemento con sustitutivos orgánicos;
- (ii) Morteros de cemento con sustitutivos inorgánicos;
- (iii) Morteros de cal;
- (iv) Morteros de cal con sustitutivos orgánicos;
- (v) Morteros de cal con sustitutivos inorgánicos.

2.1 Morteros de cemento con sustitutivos orgánicos

Los siguientes materiales orgánicos han sido propuestos en diversas investigaciones como sustitutivos parciales del cemento:

- *Ceniza de cáscara de arroz* (Aprianti, Shafigh, Bahri, & Farahani, 2015): las principales ventajas del uso de la ceniza de arroz son su baja densidad y la alta producción mundial del producto de procedencia (Khan, Jabbar, Ahmad, Khan, Khan, & Mirza, 2012). Por ejemplo, en 2015 fueron producidas alrededor de 740.2 millones de toneladas de arroz (Seguimiento del mercado del arroz de la

FAO, 2015) y en 2013, más de 200 millones de toneladas fueron producidas sólo por China (Yang, Xue, Wu, Xiao, & Zhou, 2016). La ceniza de cascara de arroz (RHA) es el residuo generado durante la combustión de la cascara de arroz. El pequeño tamaño de las partículas de ceniza de arroz fundamenta su propiedad principal, ya que influye en la velocidad de reacción con el cemento y agua, lo que genera un aumento de la resistencia, trabajabilidad, relación agua/cemento, retracción y capacidad de deslizamiento, también en el hormigón. Con una sustitución del 20% del cemento por RHA, el mortero puede llegar a alcanzar 25MPa de resistencia a compresión a los 28 días (Potty, Vallyutham, Yusoff, Anwar, Haron, & Alias, 2014). Estos datos han sido obtenidos siguiendo las prescripciones de la ASTM C109, con 0,50 de relación agua-cemento y proporción cemento/arena 1:3.

- *Ceniza de aceite de palma* (Karim, Hossain, Newaz Khan, Zain, Jamil, & Lain, 2014): anualmente se genera miles de toneladas de cenizas de aceite de palma (POFA) que terminan siendo depositadas en vertederos (59,23 millones de toneladas de aceite de palma en 2014 (Fedepalma. Statistical Yearbook The Oil Palm Agroindustry in Colombia and the World 2010–2014, 2015)). Tailandia y Malasia son considerados los principales productores de POFA, de hecho, este último produce alrededor de 3,13 millones de toneladas anualmente. Este valor está en continuo crecimiento al igual que el problema que supone la gestión de dicho residuo. Al ser utilizado para la sustitución de cemento, con sólo el 10% sustituido, el mortero alcanza altos niveles de resistencia a compresión (48 MPa) medido en muestras cúbicas de 50 mm con una proporción de agua-cemento de 0.55 y relación de cemento/arena de 1:2,75 (Usman, Sam, Sumadi, & Ola, 2015).

- *Ceniza de bagazo de caña de azúcar* (Aprianti, Shafiqh, Bahri, & Farahani, 2015): durante el proceso de producción de azúcar de caña, se genera el bagazo como residuo. Después de esto, tras un proceso de co-generación o combustión es obtenida la ceniza. La producción anual mundial de azúcar de caña es alrededor de 1,68 millones de toneladas, siendo Brasil el principal productor con el 43% de la producción anual total (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Con respecto a propiedades mecánicas aportadas al mortero, según la investigación de Ganesan et al. (2007) la sustitución del 10% del cemento provoca que las muestras alcancen una resistencia a compresión aproximada de 28.31 MPa a los 28 días. Estos datos son medidos en muestras cúbicas de 100 mm de lado, con una proporción a/c de 0,53 y cemento-arena de 1:3.

- *Ceniza de residuo de madera* (Ramos, Matos, & Coutinho, 2013): actualmente, más del 70% de los residuos generados por la industria de la madera son desechados directamente al medioambiente de diversas formas. Parte de este residuo es usado como pellet y quemado como combustible. Se estima que alrededor de 13 millones de toneladas son usadas anualmente en Europa (Pirraglia, Gonzalez, Saloni, & Wright, 2010). Además, podría ser un valioso sustitutivo para el cemento. García y Sousa-Coutinho (García & Sousa-Coutinho, 2013) han demostrado que unido al cemento, este mortero eco-eficiente puede alcanzar una resistencia a compresión de 44 MPa a los 28 días usando una mezcla de proporción

a/c 0,50, 1:3 de cemento/arena y 5% en peso sustituido por WWA. Esto es probado siguiendo las prescripciones de la norma EN 196-1.

- *Ceniza de hoja de bambú* (Aprianti, Shafigh, Bahri, & Farahani, 2015): el bambú es uno de los recursos vegetales de más rápido crecimiento. Alrededor de 20 millones de toneladas son producidas anualmente, principalmente en China (Yiping, Yanxia, Buckingham, Henley, & Guomo, 2010). Es usado directamente como caña o como fibra como material de construcción. La proporción óptima de sustitución es del 20%, con la que se obtienen unas propiedades mecánicas comparables a las del mortero de cemento Portland de referencia. En este caso, usando probetas cúbicas con relación a/c 0,48 y cemento/arena 1:2,7, se consigue una resistencia de 60 MPa.

- *Ceniza de mazorca de maíz* (Adesanya & Raheem, 1996): la resistencia a compresión mejora entre 4.9% y 16.7% cuando del 20% and 50% de cemento Portland es sustituido por esta ceniza, a pesar de ser menor que la del mortero de referencia en los primeros días. Esto es medido en probetas que presentan proporciones de 0,40 a/c y 1:3 cemento/arena. Por otro lado, la principal ventaja de usar este producto es su alta producción. Por ejemplo, alrededor de 8,04 millones de toneladas son generados anualmente en Sudáfrica, principal país productor del mismo (Aprianti, A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production e a review part II, 2016).

2.2 Morteros de cemento con sustitutivos inorgánicos

Otros tipos de sustitutivos son los inorgánicos, a través de los que se intenta reducir los residuos producidos por:

- *Cenizas volantes* (Yu, Spiesz, & Brouwers, 2015): las cenizas volantes (FA) son un subproducto industrial generado en plantas de procesamiento donde el carbón es usado como combustible (Kazemian, Gholizadeh Vayghan, & Rajabipour, 2015). La producción global de este tipo de ceniza ronda las 390 millones de toneladas por año (Malhotra, 1999) y ésta está creciendo actualmente en países como China e India (Hardjito, Wallah, Sumajouw, & Rangan, 2004) La producción en India es aproximadamente de 163,56 millones de toneladas. Es importante señalar que la reacción puzolánica de FA es bastante más lenta que la hidratación del cemento Portland. En relación a sus propiedades mecánicas, este mortero puede alcanzar alrededor de los 37 MPa de resistencia a compresión a los 28 días, utilizando mezclas con una relación a/c 0,30 y siendo sustituido 52% del cemento (Berry, Hemmings, & Cornelius, 1990).

- *Escorias granuladas de altos hornos* (Yu, Spiesz, & Brouwers, 2015): las escorias granuladas de altos hornos (GGBFS) son uno de los residuos generados en la industria de manufacturación del hierro (Liu, Zhu, & Yang, 2016). El Instituto Americano del Hierro y el Acero (American Iron and Steel Institute, 2011) asegura que sólo E.E.U.U. tuvo una producción aproximada de entre 8 y 9 millones

de toneladas de FA en 2011, siendo la del resto de países del mundo de 263 a 328 millones de toneladas. Las mezclas que incorporan GGBFS generalmente desarrollan su resistencia más lentamente que las que contienen solo cemento Portland como conglomerante, pero pueden desarrollar una igual o superior resistencia a largo plazo, debido al bajo calor durante la hidratación, que reduce a su vez su permeabilidad y mejora su resistencia a ataques químicos (van Oss, 2013). En relación a sus propiedades mecánicas, Barnett et al. (Barnett, Soutsos, Millard, & Bungey, 2006) exponen que con una sustitución del 35% del cemento por GGBFS a 20° de temperatura a los 8 días, es posible alcanzar 24 MPa de resistencia a compresión. Estos resultados son obtenidos tras ser experimentados siguiendo los requerimientos de la ASTM C1074.

- *Polvo de caliza* (Yu, Spiesz, & Brouwers, 2015): el efecto que produce el uso del polvo de caliza en el mortero está actualmente en debate. Hay investigadores que han demostrado que las propiedades del cemento no se ven afectadas negativamente por la adición de este producto, pero otros defienden lo contrario. Con respecto a sus propiedades mecánicas, el mortero formado con una sustitución del 10% del cemento por polvo de caliza permite alcanzar alrededor de 55,5 MPa de resistencia a compresión (Benn, Baweja, & Mills, 2014) y 7,8 MPa de resistencia a flexión (Ghrici, Kenai, & Said-Mansour, 2007).

2.3 Mortero de cal

La cal ha sido usada como conglomerante aproximadamente desde el sexto milenio A.C. Aunque los tiempos de puesta en obra y carbonatación con largos, la resistencia desarrollada a largo plazo es alta y asegura la compatibilidad de tensiones y deformaciones entre materiales (Pineda, Robador, & Perez-Rodriguez, 2013). Según Luso y Lourenço (Luso & Lourenço, 2016) el mortero de cal presenta una buena trabajabilidad y, en relación a sus propiedades mecánicas, puede alcanzar alrededor de los 18 MPa de resistencia a compresión.

2.4 Morteros de cal con sustitutivos orgánicos

En esta sección se proponen diferentes sustitutivos orgánicos para la cal en morteros:

- *Ceniza de cáñamo* (Chabannes, Garcia-Diaz, Clerc, & Bénézet, 2015): la combinación de agua, ceniza de cáñamo y cal produce un material de construcción que actúa como un perfecto aislante acústico y térmico. Además, este residuo confiere al mortero una resistencia a compresión de 1.01 ± 0.08 MPa y una fuerte ductilidad.

- *Ceniza de "elephant grass"* (Nakanishi, et al., 2014): estas cenizas son obtenidas de una planta de Brasil, denominada *elephant grass*. De esta planta se obtienen en torno a 1.2 Gt carbón vegetal y 2 Gt de bio aceite por año, usado para la generación de energía. Las cenizas de *elephant grass* han de ser mezcladas con al menos el 85% de cal para obtener un material cementoso como alternativa a los materiales puzolánicos tradicionales, económicamente más rentables (Nakanishi, et al., 2014).

2.5 Morteros de cal con sustitutivos inorgánicos

Los materiales estudiados son los siguientes:

- *Cenizas volantes y metacaolín* (Grist, Paine, Heath, Norman, & Pinder, 2015): la mezcla estudiada está formada por 70% de cal, 15% de cenizas volantes 15% de metacaolín. Las propiedades desarrolladas por este mortero son aproximadamente 22.1 MPa como resistencia a compresión y alrededor de 21 GPa de módulo elástico.
- *Humo de sílice* (Grist, Paine, Heath, Norman, & Pinder, 2015): el humo de sílice es un material puzolánico tradicionalmente usado en la industria de la construcción. Si en un mortero es sustituido el 30% de la cal por humo de sílice, se prevé que éste alcance 19.8MPa de resistencia a compresión, aproximadamente, y 11.5GPa de módulo elástico.
- *Humo de sílice y escorias granuladas de altos hornos* (Grist, Paine, Heath, Norman, & Pinder, 2015): la sustitución óptima para la obtención de las mejores propiedades mecánicas sería 25% de humo de sílice, 25% de escorias granuladas de altos hornos y dejando el 50% de cal. Este mortero puede alcanzar en torno a 28.1 MPa de resistencia a compresión y un módulo elástico de 13.5 GPa.
- *Humo de sílice y cenizas volantes* (Grist, Paine, Heath, Norman, & Pinder, 2015): según Grist et al. siguiendo la composición basada en el 50% cal hidráulica natural, 25% de humo de sílice y 25% de cenizas volantes alcanzaremos el mejor comportamiento mecánico. Con estas proporciones el mortero podría alcanzar 22.3 MPa de resistencia a compresión y 25 GPa de módulo de elasticidad, aproximadamente.

3 Análisis DAFO

Para la realización del análisis DAFO, se han elegido aquellos morteros en los que el cemento es sustituido por materiales orgánicos. Esto es debido a la alta contribución medioambiental del sustitutivo y a la necesidad de centrar nuestros esfuer-

zos en la reducción el uso del cemento, ya que, como se ha expuesto anteriormente, es uno de los productos de construcción más contaminantes.

De la misma forma, es importante fomentar el uso de cenizas vegetales obtenidas por la combustión y co-generación de biomasa.

- Mortero de cemento y RHA: la alta producción de cenizas de arroz, al igual que las buenas propiedades que confieren al mortero, hacen de este residuo un valioso material para la mejora de la sostenibilidad.

Tabla 1 DAFO del mortero de cemento y RHA

<p>DEBILIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Empeoramiento del tiempo de reacción 	<p>FORTALEZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Alta actividad puzolánica. - Resistencia a compresión suficiente para ser usado como material de estructural
<p>AMENAZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Depósito y transporte de la ceniza de cáscara de arroz problemática debido a su baja densidad. 	<p>OPORTUNIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Procede de uno de los productos más consumidos en el mundo

- Mortero de cemento y POFA: es importante destacar el beneficio aportado por este residuo a dicho mortero, al igual que su alta producción.

Tabla 2 DAFO del mortero de cemento y POFA

<p>DEBILIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> - La POFA produce un detrimento de la fluidez del mortero 	<p>FORTALEZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Alta resistencia a compresión para valores del 10% sustituido
<p>AMENAZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inexistencia de mecanismos de aprovechamiento del creciente uso del aceite de palma. 	<p>OPORTUNIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anualmente aumenta la producción del aceite de palma

- Mortero de cemento y SCBA: este mortero proporciona los mejores valores de resistencia a compresión.

Tabla 3 DAFO del mortero de cemento y SCBA

<p>DEBILIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> - La alta porosidad aumenta la demanda de agua del mortero y, como consecuencia, la fluidez, empeorando a su vez la trabajabilidad. 	<p>FORTALEZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - La resistencia a compresión aumenta proporcionalmente con la cantidad de residuo sustituido
<p>AMENAZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Carencia de sistema de gestión de estos residuos. 	<p>OPORTUNIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> - El etanol obtenido del azúcar de caña es reconocido el principal bio-combustible del mercado, hecho que aumenta la producción de SCBA.

- Mortero de cemento y WWA: a pesar de que este residuo no mejora significativamente las propiedades mecánicas del mortero, incrementa su sostenibilidad y es uno de los residuos más abundantes y asequibles.

Tabla 4 DAFO del mortero de cemento y WWA

DEBILIDADES	FORTALEZAS
- Baja actividad puzolánica	- Incrementa sostenibilidad del mortero
AMENAZAS	OPORTUNIDADES
- La incineración de madera produce relativamente poca ceniza	- El número de plantas de combustible que emplean madera está creciendo, al igual que su producción de cenizas. Se prevé que el consumo en Europa de madera como biomasa sea de 50 millones en 2020

- Mortero de cemento y BLA: este material es usado principalmente como material de construcción antes de ser quemado. La producción de ceniza está aún por desarrollar.

Tabla 5 DAFO del mortero de cemento y BLA

DEBILIDADES	FORTALEZAS
- La resistencia a compresión desarrollada en este mortero es menor a la del mortero de cemento de referencia	- Alta actividad puzolánica.
AMENAZAS	OPORTUNIDADES
- La producción de cenizas de bambú no está aún desarrollada por lo que su uso es limitado	- El bambú es la planta con el más rápido crecimiento de las estudiadas en este artículo. - La caña de bambú es usada en todo el mundo, pero su hoja acaba en vertederos o quemada de forma no controlada.

- Mortero de cemento y CCA: la mejora implementada al mortero se centra en su durabilidad y en el incremento de la producción de energía procedente del maíz.

Tabla 6 DAFO del mortero de cemento y CCA

DEBILIDADES	FORTALEZAS
- Baja resistencia a compresión en los primeros días	- Mejora de la durabilidad y trabajabilidad.
AMENAZAS	OPORTUNIDADES
- La producción de cenizas se lleva a cabo sólo por combustión, lo que produce gran cantidad de elementos contaminantes.	- Su uso como alimento para animales garantiza su continuada producción mundial.

4 Conclusión

Esta investigación muestra la posibilidad del uso de morteros eco-eficientes como materiales estructurales que garanticen tanto la seguridad de la construcción como la preservación del medioambiente en intervenciones de refuerzo/rehabilitación/consolidación de estructuras.

Para ello, son estudiados diferentes materiales como alternativa al conglomerante actual, centrándonos en sus características medioambientales y estructurales. En estos morteros, el conglomerante o bien es un material distinto al cemento o se realiza la sustitución de parte de éste por materiales orgánicos o inorgánicos como cenizas volantes, residuos de altos hornos, cáscaras de arroz, cenizas de aceite de palma, entre otros, o la combinación de estos, con lo que también se propiciaría la reducción de residuos que pasarían a inmovilizarse sin contaminar la naturaleza.

El resultado de esta revisión bibliográfica y el análisis DAFO permiten establecer una guía que facilite a los agentes implicados en las actuaciones de intervención estructural la selección de morteros eco-eficientes óptimos, tanto para garantizar la seguridad como para preservar el medioambiente.

5 Referencias

- (2015). *Fedepalma. Statistical Yearbook The Oil Palm Agroindustry in Colombia and the World 2010–2014*. Javegraf, Bogotá, Colombia.
- (2015, Diciembre). *Seguimiento del mercado del arroz de la FAO*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Adesanya, D., & Raheem, A. (1996). Evaluation of blended cement mortar, concrete and stabilized earth made from ordinary Portland cement and corn cob ash. *Construction and Building Materials*, 10(6), 451-456.
- American Iron and Steel Institute. (2011). Annual statistical report: Washington, DC. In *American Iron and Steel Institute* (pp. 121-126). Washington, DC.

- Aprianti, E. (2016). A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production e a review part II. *Journal of Cleaner Production*, Article in press, 1-17.
- Aprianti, E., Shafiqh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. *Construction and Building Materials*(74), 176-187.
- Barnett, S., Soutsos, M., Millard, S., & Bungey, J. (2006). Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies. *Cement and Concrete Research*, 36, 434-440.
- Benn, B., Baweja, D., & Mills, J. (2014). 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. *The compressive strength of mortar made with cement containing limestone mineral addition, cement kiln dust and fly ash*. Southern Cross University: ePublications@SCU.
- Berry, E., Hemmings, R., & Cornelius, B. (1990). Mechanisms of Hydration Reactions in High Volume Fly Ash Pastes and Mortars. *Cement & Concrete Composites*(12), 253-261.
- Chabannes, M., Garcia-Diaz, E., Clerc, L., & Bénézet, J.-C. (2015). Studying the hardening and mechanical performances of rice husk and hemp-based building materials cured under natural and accelerated carbonation. *Construction and Building Materials*(94), 105-115.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Chapter 3 Sugar cane. Retrieved 2016, from FAO Corporate document repository: <http://www.fao.org/>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 29, 515-524.
- Garcia, M., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. *Construction and Building Materials*(41), 897-910.
- Ghrichi, M., Kenai, S., & Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*(29), 542-549.
- Grist, E., Paine, K., Heath, A., Norman, J., & Pinder, H. (2015). Structural and durability properties of hydraulic lime–pozzolan concretes. *Construction and Building Materials*(62), 212-223.
- Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D., & Rangan, B. (2004). On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*(101), 467-472.
- Karim, M. R., Hossain, M., Newaz Khan, M. N., Zain, M. F., Jamil, M., & Lain, F. C. (2014). On the Utilization of Pozzolanic Wastes as an Alternative Resource of Cement. *Materials*(7), 7809-7827.
- Kazemian, A., Gholizadeh Vayghan, A., & Rajabipour, F. (2015). Quantitative assessment of parameters that affect strength development in alkali activated fly ash binders. *Construction and Building Materials*(93), 869-876.
- Khan, R., Jabbar, A., Ahmad, I., Khan, W., Khan, A., & Mirza, J. (2012). Reduction in environmental problems using rice husk ash in concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 360-365.
- Liu, Y., Zhu, W., & Yang, E.-H. (2016). Alkali-activated ground granulated blast-furnace slag incorporating incinerator fly ash as a potential binder. *Construction and Building Materials*, 112, 1005-1012.

- Luso, E., & Lourenço, P. B. (2016). Experimental characterization of commercial lime based grouts for stone masonry consolidation. *Construction and Building Materials*(102), 216-225.
- Malhotra, V. (1999). Making Concrete "Greener" with Fly Ash. *Concrete International*, 21(5), 61-66.
- Nakanishi, E., Frías, M., Martínez-Ramírez, S., Santos, S., Rodrigues, M., Rodríguez, O., et al. (2014). Characterization and properties of elephant grass ashes as supplementary cementing material in pozzolan/Ca(OH)₂ pastes. *Construction and Building Materials*(73), 391-398.
- Pineda, P., Robador, M. D., & Perez-Rodriguez, J. L. (2013). Characterization and repair measures of the medieval building materials of a Hispanic-Islamic construction. *Construction and Building Materials*(41), 612-633.
- Pirraglia, A., Gonzalez, R., Saloni, D., & Wright, J. (2010). *Biomass magazine*. Retrieved 05 21, 2016, from <http://www.biomassmagazine.com/articles/3853/woodpellets-an-expanding-market-opportunity>
- Potty, N. S., Vallyutham, K., Yusoff, M., Anwar, A., Haron, M., & Alias, M. (2014). Properties of Rice Husk Ash (RHA and MIRHA) Mortars. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(18), 3872-3882.
- Ramos, T., Matos, A., & Coutinho, J. (2013). Review- Mortar with wood waste ash; mechanical strength, carbonation resistance and ASR expansion. *Construction and Building Materials*(49), 343-351.
- Usman, J., Sam, A., Sumadi, S., & Ola, Y. (2015). Strength development and porosity of blended cement mortar: Effect of palm oil fuel ash content. *Sustainable Environment Research*, 25, 47-52.
- van Oss, H. (2013). Slag, Iron and Steel. In U. G. Survey, *2011 Minerals Yearbook* (pp. 69.1–69.9).
- Yang, W., Xue, Y., Wu, S., Xiao, Y., & Zhou, M. (2016). Performance investigation and environmental application of basic oxygen furnace slag – Rice husk ash based composite cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 123, 493-500.
- Yiping, L., Yanxia, L., Buckingham, K., Henley, G., & Guomo, Z. (2010). *Bamboo and climate change mitigation*. International Network for Bamboo and Rattan. Beijing, China: Technical Report.
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. (2015). Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Construction and Building Materials*(55), 383-394.