



Uso de residuos sólidos en la elaboración de concreto celular: una revisión

Use of solid waste in cell concrete processing: a review

SÓCRATES MUÑOZ PÉREZ ¹, WILLIAMS GARCÍA CHUMACERO¹ y TATIANA SALAZAR PRETEL¹

RESUMEN

Cada año, a nivel mundial, se generan millones de toneladas de diferentes tipos de desechos y se espera que aumente en el futuro. La mayoría de estos residuos se vierten a través de vertederos o incineración, lo que genera grandes preocupaciones ambientales. Una alternativa para la reutilización de estos desechos es incorporándolos como reemplazantes parciales o totales de los componentes del concreto celular. En este sentido, el hormigón celular podría proporcionar un medio excelente para incorporar estos residuos en un gran volumen, principalmente debido al requisito de baja resistencia. Este documento tiene como objetivo describir y analizar el uso de varios tipos de desechos: los de residuos sólidos industriales y residuos sólidos agrícolas, como reemplazo potencial del cemento y el agregado fino en el concreto celular aireado o espumado. Se revisaron 53 artículos indexados entre los años 2006 al 2020, los cuales se distribuyen de la siguiente manera: 45 artículos en Scopus, 3 en ScienceDirect, 3 en Semantic Scholar y 2 en ResearchGate, utilizando palabras claves en inglés como *celular concrete*, *foamed concrete*, *aerated concrete*; *pre-foamed concrete*.

Palabras clave: concreto celular; concreto aireado en autoclave; concreto espumado; residuos sólidos; propiedades mecánicas.

¹Universidad Señor de Sipán. Chiclayo, Perú

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite: **Compartir**-copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, **Adaptar**-remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

ABSTRACT

Every year millions of tons of different types of waste are generated worldwide and are expected to increase in the future. Most of this waste is dumped through landfills or incineration, which generates great environmental concerns. An alternative for the reuse of these wastes is to incorporate them as partial or total replacements of the cellular concrete components. In this regard, cellular concrete could provide an excellent means of incorporating these wastes in a large volume primarily due to the low strength requirement. This document aims to describe and analyze the use of various types of waste, such as industrial solid waste and agricultural solid waste, as a potential replacement for cement and fine aggregate in aerated or foamed cellular concrete. Fifty-three articles indexed between 2006 to 2020 were reviewed and distributed as follows: 45 articles in Scopus, 3 in ScienceDirect, 3 in Semantic Scholar and 2 in ResearchGate, using keywords such as: cellular concrete, foamed concrete, aerated concrete and pre-foamed concrete.

Keywords: cellular concrete; autoclaved aerated concrete; foamed concrete; solid waste; mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

El concreto celular es definido como un tipo de mortero donde burbujas de aire quedan incrustadas por medio de un agente espumante apropiado. También se le conoce al concreto cuya densidad varía entre 300- 1800 kg/m^3 (Amran et al. , 2015; Raj et al., 2019). Lo que diferencia el concreto celular a otros concretos ligeros es que debe contener un mínimo del 25 % (Gelim y Ali, 2011) (en volumen) de contenido de aire.

El concreto celular se clasifica en dos tipos según su método de fabricación: el método de arrastre de aire y el método espumoso (Hamad , 2014). i) El método de arrastre de aire o también denominado concreto aireado autoclavado (AAC) es elaborado a partir de la mezcla de cal, arena, cemento y un agente de expansión, generalmente usando agentes químicos Bing et al. (2012) como el carburo de calcio, el peróxido de hidrogeno y polvo de aluminio (este último se utiliza como especialista en formador de aireación en el AAC en todo el mundo) (Kalpana y Mohith, 2020). ii) El concreto celular espumado se produce de dos formas, con espuma preformada o con espumado mixto (Mohammed y Hamad, 2014). El proceso de prespumado consiste en ge-

nerar la mezcla base y la espuma acuosa preformada estable por separado (mediante un operador de espuma con agua) (Raj et al., 2019; Kalpana y Mohith, 2020). Por otra parte, en el proceso de espumado mixto, el agente tensioactivo se combina con los ingredientes de la mezcla de mortero base y durante el proceso de mezcla se genera una estructura celular en el concreto Hamad (2014).

El crecimiento urbanístico y de la población ha ocasionado el aumento drástico de los volúmenes de residuos (Chen, 2018). Por otro lado, en China, el 2016 se informó de la acumulación de 30, 91 mil millones de toneladas de residuos sólidos industriales, perjudiciales para el medio ambiente; lo que ha provocado numerosos estudios sobre cómo utilizar estos desechos sólidos como materiales en la producción de concreto aireado (Yao et al., 2019). Además de los residuos sólidos urbanos e industriales, existen los residuos agrícolas cuya producción anual aumenta a una tasa promedio de 5 – 10 %. Estos residuos incluyen hojas, tallos, paja y cenizas; la mayoría desechadas en los alrededores, ocasionando problemas de vertedero (Wang et al., 2016).

Teniendo en cuenta todos los riesgos que representan los residuos sólidos, diferentes autores han hecho estudios de cómo reutilizar estos desechos en la producción de concreto celular. Por lo tanto, la presente investigación consiste en una revisión de los distintos tipos de residuos sólidos utilizados en la preparación de concreto celular, analizando la influencia que tienen sobre las propiedades de este; detallando las mejoras y limitaciones de estos residuos que generan en el concreto celular.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la presente revisión literaria se hizo uso de las bases de datos Scopus, ScienceDirect, ResearchGate y Semantic Scholar. Los artículos están distribuidos de la siguiente manera: 45 artículos en Scopus, 3 en ScienceDirect, 3 en Semantic Scholar y 2 en ResearchGate. Para la búsqueda en cada base de datos (entre los años 2006 al 2020) se utilizaron palabras claves en inglés como *celular concrete*, *foamed concrete*, *aerated concrete*, *pre-foamed concrete* en combinaciones con los residuos seleccionados en la revisión. Solo se seleccionaron investigaciones relacionados con residuos sólidos usados en concreto celular. Luego de dar lectura a más de 100 artículos, 53 artículos quedaron seleccionados; de los cuales, 9 se encuentran en la introducción y 44 se encuentran en la redacción del desarrollo de la presente revisión. El análisis y revisión de los artículos se llevaron a cabo en base a 2 tipos de residuos sólidos, 30 artículos para residuos indus-

triales y 14 para residuos agrícolas. Se detallaron las mejoras y desventajas de la incorporación de estos residuos en el concreto celular, para luego ser finalmente discutidos.

Tabla 1. Rangos de pendiente por tipo de cobertura vegetal

No.	Base de datos	Año de Publicación			Total
		2006 – 2010	2011 – 2015	2016 – 2020	
1	Scopus	4	17	24	45
2	ScienceDirect	0	0	3	3
3	Semantic Scholar	0	2	1	3
4	ResearchGate	0	1	1	2
	Total	4	20	29	53

DESARROLLO

Residuos sólidos industriales

Residuos de centrales eléctricas

En las centrales eléctricas del carbón se genera las denominadas cenizas volantes, este residuo se captura comúnmente de las chimeneas, y es uno de los materiales antropogénicos más complejos por lo que su disposición inadecuada puede causar contaminación del suelo y el agua (Yao et al., 2015). Reddy y Kumar (2017) demostraron que con un reemplazo del 15 % del cemento de la mezcla con cenizas volantes, añadiendo polvo de aluminio en 0, 25 % se obtiene la mayor fuerza compresiva de 23, 75 MPa, y la mayor resistencia de tracción dividida de 2, 48 MPa; ambas a los 28 días. También, Muthu-Kumar y Ramamurthy (2017) elaboraron un mortero de geopolímero aireado utilizando cenizas volantes clase F (FA) como aglomerante y polvo de aluminio al 0, 1 %; obteniendo valores de resistencia a la compresión de 2, 5 – 10 MPa, y 0, 25 – 5, 5 MPa, y densidades secas de 800 – 1500 Kg/m³ y 900 – 1100Kg/m³ para 60°C y 90°C. de temperatura de curado. Por otro lado, Drochytka y Helanová (2015) también hicieron uso CFBC y cenizas volantes de alta temperatura (HTC), y demostraron que las muestras con 13 % de CBFC influye positivamente en la conductividad térmica, debido a que presenta una menor densidad aparente; sin embargo, la resistencia a la compresión también se ve mermada.

En concretos celulares espumados, Harith (2018) sustituyó un 25 % del peso parcial del cemento

Portland con cenizas volantes (FA); mejorando la fluidez, trabajabilidad, resistencia a la compresión y disminuyendo la contracción por secado de la mezcla. Del mismo modo, [Jitchaiyaphum et al. \(2011\)](#) para proporciones del 10, 20 y 30 % de FA en la mezcla, el resultado fue alta resistencia del concreto en su etapa inicial.

Se encontraron investigaciones en la que las FA han sido reemplazantes del agregado fino de la mezcla patrón del concreto celular elaborado con el método de preespumado; por ejemplo, se reemplazó en un 50 % el relleno por FA, provocando una mejora en la resistencia a largo plazo del concreto preespumado ([Nambiar y Ramamurthy, 2006](#); [Bing et al., 2012](#)), una mejor distribución de los huecos de aire al proporcionar, una capa más uniforme en cada burbuja (evitando que se fusionen y superpongan) y un aumento en la capacidad de sorción del concreto debido al mayor requerimiento de agua en las mezclas; lo que da como resultado una mezcla más permeable ([Nambiar y Ramamurthy, 2007a, b](#)).

Otro de los residuos producidos en centrales eléctricas son las cenizas de fondo de carbón (BA), cenizas de naturaleza gruesas que son extraídas del fondo del horno de las centrales térmicas ([Singh et al., 2018](#)). Estudios han afirmado que con un reemplazo del 20 % del cemento con BA en concretos ligeros esterilizados en autoclaves, superan considerablemente al concreto patrón a base de cemento, pues forman tobermorita, debido al contenido de sílice del (BA) ([Wongkeo y Chaipanich, 2010](#); [Wongkeo et al., 2012](#)). Por otra parte, [Suksiripattanapong et al. \(2020\)](#) elaboraron un concreto celular liviano a base de BA como aglomerante, con un activador alcalino líquido y arena de cuarzo como agregado; logrando obtener el menor peso unitario ($11,09 \text{KN}/\text{m}^3$), con una relación de arena/BA de 1 : 1, con un contenido de espuma del 3 %.

Las cenizas de fondo (BA) también han sido utilizadas como reemplazo del agregado fino en concretos celulares espumados, presentando una mayor resistencia en los especímenes en comparación con muestras que contenían solo agregado de cantera, debido a que presentan una distribución más estrecha de los huecos de aire ([Krishnan y Anand, 2018](#); [Hendawitharana y Nanayakkara, 2018](#)). Según [Onprom et al. \(2015\)](#), el reemplazo óptimo de BA en el agregado fino del concreto celular es del 25 %, generando mejoras en propiedades de compresión, densidad y absorción del agua.

Subproductos de la industria del hierro

Otro residuo utilizado en la elaboración de AAC, son los relaves de hierro; los cuales se eliminan apilándolos al aire libre después de solidificarlos con un agente de curado, causando problemas de contaminación del suelo, río o del agua subterránea (Ma et al., 2016). Tian (2011) hizo uso de relaves de hierro en la producción de AAC, consiguiendo una resistencia de 7,5 MPa, considerable para un concreto celular sin autoclave. Asimismo, Ma et al. (2016) demostraron que el contenido adecuado y la finura de los relaves de hierro en la fabricación de AAC se da en una proporción de masa del 27 – 34 % del peso total y un tamaño de partícula de $80 \mu m \geq 83,57 \%$.

La escoria de alto horno granulada molida (GBS) es un subproducto de los altos hornos de hierro (Özbay et al., 2016). (Pachideh y Gholhaki, 2019) utilizaron residuos puzolánicos como el humo de sílice, zeolita y (GBFS) en cantidades de 7, 14 y 21 % en peso del cemento logrando demostrar que la resistencia a la compresión se puede mejorar en un 72 % para GBFS. El-Didamony et al. (2019) también hicieron uso de GBFS como reemplazo parcial del cemento en AAC, concluyendo que las propiedades mecánicas del AAC con GBFS fueron superiores comparadas al AAC con metacaolín MK como sustituto parcial del cemento, en todos los niveles de reemplazo.

Como reemplazo parcial del cemento en la elaboración de concreto preespumado, el uso de 50 % de GBS mejoró la resistencia a la compresión y la velocidad del pulso ultrasónico, así como las propiedades de aislamiento térmico (Zhao et al., 2015). Asimismo, a un nivel de reemplazo de cemento del 30 %, el aumento de la resistencia fue de aproximadamente el 25 %, mientras que más allá del 30 %, se redujo la mejora en la resistencia a la compresión (Awang y Aljoumaily, 2017).

Residuos de productos sintéticos

Los residuos sintéticos más comunes y de gran utilidad son el polipropileno (PP), el polivinilo (PW) y el caucho de neumáticos (RPW). El polipropileno es un producto petroquímico corriente que se deriva del monómero de olefina propileno, tiene la densidad más baja que otros plásticos de consumo; material sin color, con excelentes propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y resistencia al impacto) y resistencia química y a altas temperaturas (Maddah, 2016). Como sustituto del agregado fino en una mezcla de concreto celular de espuma pre formada,

Chandni y Anand (2018) concluyeron que el uso de PP da como resultado una demanda mayor de agua y proporcionó resistencias adecuadas tanto para ser utilizado como material de aislamiento como para soporte de carga. Por otra parte, se encontró que el concreto espumado con desechos de PW como reemplazo de agregado fino mejoró su resistencia a la compresión y registró valores más bajos de deflexión para la misma carga (Ikponmwoşa et al., 2017).

El caucho de neumáticos se produce a partir de polímeros que se encuentran en el petróleo crudo, cada año millones de caucho de llantas de desecho se almacenan, se tiran en vertederos o se entierran y solo una pequeña cantidad se recicla (Sofi, 2018). La resistencia a la compresión del hormigón celular que contiene caucho de neumático RPW se incrementó de manera constante con el aumento del porcentaje de RPW y a lo largo del período de curado creciente de 7, 14 y 28 días (Kadir et al., 2017); pero solo se registró un aumento del 50 % con respecto a la mezcla base (Kashani et al., 2017). Esto puede deberse a la débil adhesión entre el cemento y el caucho (Kashani et al., 2018).

Residuos sólidos agrícolas

Ceniza de cáscara de arroz (RHA)

La cascarilla de arroz (RHA) es un residuo agrícola, cuya degradación natural está restringida debido a la superficie abrasiva irregular y la alta composición silíceas (Thomas, 2018). Como sustituto de la arena de cuarzo en la producción AAC, generó un aumento del requerimiento de agua, teniendo un efecto negativo en la resistencia a la compresión, pero a la vez disminuyendo la densidad de este. Considerando como nivel óptimo de reemplazo el 75 % (Kunchariyakun et al., 2015). Por su parte, Kunchariyakun et al. (2018) sustituyeron la arena de sílice con RHA negra de relativa finura en un 30 y 50 %, mejorando la resistencia a la compresión del AAC en todas condiciones.

En concretos de espuma pre formada, como reemplazo parcial del cemento, se presentaron mejoras entre un 10 % y 28 % en la resistencia a la compresión, debido a las propiedades puzolánicas de la RHA en la mezcla (Bayuaji, 2015). Así mismo, de acuerdo a la investigación hecha por (Hussein et al., 2014) las propiedades óptimas del concreto celular se lograron con una composición de (RHA) del 10 %. También es utilizado como reemplazo del agregado fino, generando un concreto celular más liviano y resistente. La adición de cenizas de cáscara de arroz generó un

aumento de casi el 70 % de la resistencia a la compresión en una muestra de densidad igual a $1800\text{Kg}/\text{cm}^3$ (Hadipramana et al., 2014).

Cenizas de combustible de aceite de palma (POFA)

La extracción de este aceite da como resultado la producción de una gran cantidad de residuos que se utilizan normalmente como combustible en las calderas; de las cuales se produce, cenizas de combustible de aceite de palma, POFA (Hamada et al., 2018). Como material sustituyente del cemento, Munir et al. (2015), examina que, pese a la disminución de la resistencia a la compresión del concreto, el POFA generado con un 20 % de sustitución sigue siendo aplicable para elementos de construcción no estructurales. Por otra parte, el POFA fue usado como material reemplazante del agregado en un 10 % y 20 %, observándose mejoras en la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por flexión y rotura, ductilidad y tenacidad a la compresión del concreto. Se debe tener en cuenta que con el uso de POFA se registró una disminución en la fluidez de la mezcla, así como del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson en comparación con mezclas que presenten un relleno de arena al 100 % (Lim et al. , 2013).

Torta de filtración de caña de azúcar incinerada

La torta de filtración es un subproducto del proceso de clarificación y tratamiento del jugo de caña de azúcar; mediante el calentamiento, el jugo crudo este se separa en dos partes: una forma líquida y una forma sólida, que se denominan torta de filtro (Chauhan et al., 2011). Como reemplazante parcial del cemento en mezclas de concreto celular preespumado, Makul y Suaiam (2016), encontró que la resistencia, trabajabilidad y conductividad térmica disminuía con niveles mayores al 10 %; esto debido a la mayor porosidad y absorción de agua que requiere la mezcla. Por otra parte, Kunchariyakun et al. (2018), elaboraron AAC con cenizas de bagazo de caña en un nivel de reemplazo de 30 % y 50 %, alcanzando resistencias alrededor de 18 y 14 MPa, debido al elevado contenido de Al que presenta, mejorando la formación de tobermorita en un mayor tiempo de curado en autoclave.

Cáscara de palma de aceite (OPS)

La cáscara de palma aceitera (OPS) es el producto de desecho al momento de extraer el aceite de palma. Al ser utilizado como reemplazante parcial del agregado fino en un 50 %, se genera un concreto que se puede considerar semi estructural y aislante (Alengaram et al. , 2013). De

igual forma, Liu et al. (2016) informaron que se obtuvo una resistencia inicial del concreto preespumado de hasta el 87 % de su resistencia a la compresión a los 28 días, pero la resistencia final se incrementa en un mínimo del 8 % con respecto a mezclas sin la utilización de (OPS).

DISCUSIÓN

La mayoría de los residuos con los que se han experimentado son los subproductos derivados del sector industrial, específicamente de centrales eléctricas e industrias del hierro debido a sus propiedades puzolánicas y por el rico contenido de sílice. Pero en el presente se hizo una revisión de la bibliografía de desechos tanto industriales como agrícolas; y cada uno de ellos contribuye de manera distinta en las propiedades del concreto celular aireado y/o celular espumado ya sea como reemplazante del agregado fino, del cemento u otro de sus materias primas.

Residuos industriales derivados de las centrales eléctricas como las cenizas volantes (FA) y cenizas de fondo (BA), utilizados en la elaboración de concreto celular, tanto reemplazantes del cemento como del agregado fino, contribuyen a la reactividad puzolánica que ayuda a refinar los poros y mejorar la resistencia a la compresión del concreto final. Del mismo modo, residuos de la industria del hierro como los relaves y la escoria de alto horno granulada (GBS) como sustituyentes del cemento, contribuyeron también en la mejora de las propiedades mecánicas del concreto celular en un porcentaje óptimo aproximado del 25 %. Además de eso, residuos de productos sintéticos abundantes y comunes como el polipropileno (PE), polivinilo (PW) y caucho de neumáticos (RPW), han sido muy estudiados como reemplazantes del agregado en una mezcla de concreto celular de espuma pre formada. El uso de (PE) en la mezcla presentó resultados como cortas mejoras en la resistencia, pero se logró la formación de un material óptimo para ser utilizado como aislamiento y soporte de cargas. Por su parte, el uso de (RPW) registró también un aumento en la resistencia, pero solo hasta en un 50 %. De manera similar sucede con la utilización de (PW) en el concreto, se disponen de mejoras en la resistencia a la compresión, pero se registraron valores más bajos de deflexión a nivel que el reemplazo aumentaba provocando fallas por flexión y cizallamiento en las muestras.

Los materiales de desecho son comúnmente de naturaleza porosa, especialmente los de desechos agrícolas, y como tales son más livianos que los materiales convencionales. Se han realizado muchas investigaciones utilizando este tipo de subproductos, estos que representan un significativo potencial puzolánico debido a su contenido silicio que podría ayudar al desarrollo de las propie-

dades mecánicas y térmicas del concreto espumado. La cascarilla de arroz (RHA) presenta mejor comportamiento al ser reemplazada por cemento que por la arena ya que se genera un mayor requerimiento de agua, un efecto negativo en la resistencia a la compresión del concreto. Varios autores coinciden que con niveles mayores al 10 % de reemplazo de POFA y torta de filtración de caña de azúcar incinerada, se presenta una disminución de la resistencia, pero sigue siendo aplicable para elementos de construcción no estructurales como bloques de concreto para muros no portantes.

CONCLUSIONES

El concreto celular es un tipo de mortero donde burbujas de aire se quedan incrustadas por medio de la incorporación de un agente espumante apropiado, cuya densidad varía entre 300 – 1800kg/m³; calcificándose en dos tipos según su modo de fabricación: Concreto aireado autoclavado AAC y concreto espumado. Una revisión de la literatura sobre el uso de diferentes materiales de desecho como sustituto parcial del cemento o agregados en la producción de concreto celular AAC o de espuma pre formada, destaca la importancia de este en el ejercicio de la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente. De esta manera, se puede reducir el frecuente y masivo uso de materias primas convencionales en la fabricación de este tipo de concreto, e influir en la utilización de nuevos materiales y los problemas asociados con su eliminación. La revisión identifica los cambios en las propiedades físicas y mecánicas que se producen en el concreto al utilizar este tipo de desechos, teniendo una vía prometedora debido a que el hormigón celular presenta requisitos mínimos de resistencia y durabilidad considerablemente más bajos para su aplicación que el concreto convencional, al tiempo que permite la inclusión de una gran cantidad de materiales de desecho.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alengaram, U. J.; Al Muhit, B. A.; Jumaat, Z. y Liu, M. Y. J. 2013. «A comparison of the thermal conductivity of oil palm shell foamed concrete with conventional materials». *Materials and Design* 51: 522 – 529 <[10.1016/j.matdes.2013.04.078](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.078)>
- Amran, Y. H. M; Farzadnia, N. y Abang Ali, A. A. 2015. «Properties and applications of foamed concrete; a review». *Construction and Building Materials* 101, Part 1: 990 – 1005. <doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>

- Awang, Hanizam y Aljoumaily, Zaid. 2017. «Influence of granulated blast furnace slag on mechanical properties of foam concrete». *Cogent Engineering* 4: 1 – 14 <doi.org/10.1080/23311916.2017.1409853>
- Bayuaji, Ridho. 2015. «The influence of microwave incinerated rice husk ash on foamed concrete workability and compressive strength using Taguchi Method». *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* 75, nº 1: 265 – 274. <[doi:10.11113/jt.v75.3804](https://doi.org/10.11113/jt.v75.3804)>
- Bing, Chen; Zhen, Wu y Ning, Liu. 2012. «Experimental Research on Properties of High-Strength Foamed Concrete». *Journal of Materials in Civil Engineering* 24, nº 1: 113 – 118. <[doi:10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000353)>
- Chandni, T. y Anand K. 2018. «Utilization of Recycled Waste as Filler in Foam concrete». *Journal of Building Engineering* 19: 154 – 160. <[doi:10.1016/j.jobe.2018.04.032](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.032)>
- Chauhan, M. K.; Varun; Chaudhary, S.; Kumar, S. y Samar. 2011. «Life cycle assessment of sugar industry: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, nº 7: 3445 – 3453. <[doi:10.1016/j.rser.2011.04.033](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.033)>
- Chen, Ying-Chu. 2018. «Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology». *Journal of Cleaner Production* 192: 262 – 269. <doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.260>
- Drochytka, R. y Helanová, E. 2015. «Development of Microstructure of the Fly Ash Aerated Concrete in time». *Procedia Engineering* 108:624–631. <[10.1016/j.proeng.2015.06.189](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.189)>
- El-Didamony, H.; Amer, A. A.; Mohammed, M. S. y El-Hakim, M. A. 2019. «Fabrication and properties of autoclaved aerated concrete containing agriculture and industrial solid wastes». *Journal of Building Engineering* 22: 528 – 538. <[10.1016/j.jobe.2019.01.023](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.023)>
- Gelim, M. y Ali, Khadin. 2011. «Mechanical and physical properties of fly ash foamed». M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University Tun Hussein Onn Malaysia. <<https://www.semanticscholar.org/paper/Mechanical-and-physical-properties-of-fly-ash-Gelim-Ali/a9b7548d787ccf8cfd3e73688ef3aed71735b515>>[Consulta: 13 – 12 – 2020].

- Hadipramana, Josef; Samad, Abdul Aziz A.; Zaidi, Ahmad Mujahid A.; Mohamad, Noridah y Riza, Fetra Venny. 2014. «Contribution of RHA Granules as Filler to Improve the Impact Resistance of Foamed Concrete». *Key Engineering Materials* Vol 594 – 595: 93 – 97. <[10.4028/www.scientific.net/KEM.594-595.93](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.594-595.93)>
- Hamad , Ali J. 2014. «Materials, Production, Properties and Application of Aerated Lightweight Concrete: Review». *International Journal of Materials Science and Engineering* 2: 152 – 157. <[doi:10.12720/ijmse.2.2.152-157](https://doi.org/10.12720/ijmse.2.2.152-157)>
- Hamada, Hussein M.; Jokhio, Gul A.; Yahaya, Fadzil M.; Humada, Ali M. y Gul, Yasmeen. 2018. «The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete». *Construction and Building Materials* 175: 26 – 40. <[10.1016/j.conbuildmat.2018.03.227](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.227)>
- Harith, Iman. 2018. «Study on polyurethane foamed concrete for use in structural applications». *Case Studies in Construction Materials* 8: 79 – 86.<doi.org/10.1016/j.cscm.2017.11.005>
- Hendawitharana, S. y Nanayakkara, S. 2018. «Use of Bottom Ash from Coal Fired Thermal Power Plants in Production of Cellular Lightweight Concrete». *Moratuwa Engineering Research Conference*, 209 – 214.<[10.1109/MERCon.2018.8421957](https://doi.org/10.1109/MERCon.2018.8421957)>
- Hussein, A. A. E.; Shafiq, N. y Nuruddin, M. F. 2014. «Effects of microwave incinerated rice husk ash (Mirha) on hydratio characteristic and mechanical properties of foamed concrete». *Advanced Materials Research* 935: 193 – 196.<[10.4028/www.scientific.net/AMR.935.193](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.935.193)>
- Ikponmwosa, Efe; Fapohunda, Christopher; Kolajo; Olamiposi y Eyo, Otu. 2017. «Structural behaviour of bamboo-reinforced foamed concrete slab containing polyvinyl wastes (PW) as partial replacement of fine aggregate». *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 29, nº 4: 348 – 355.<doi.org/10.1016/j.jksues.2015.06.005>
- Jitchaiyaphum, K.; Sinsiri, T. y Chindaprasirt, P. 2011. «Cellular Lightweight Concrete Containing Pozzolan Materials». *Procedia Engineering* 14: 1157–1164. <[10.1016/j.proeng.2011.07.145](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.145)>
- Kadir, Aeslina; Hassan, Mohd; Sarani, Noor; Yatim, Fatin y Jaini, Zainorizuan. 2017. «A practical approach for solving disposal of rubber waste: Leachability of heavy metals from foamed

- concrete containing rubber powder waste (RPW)». *Electronic and Green Materials International Conference* Vol 1885, n° 020081. <doi.org/10.1063/1.5002275>
- Kalpana, M. y Mohith, S. 2020. «A study on compressive behavior of AAC added with industrial waste». *Materials Today: Proceedings* 22: 1043 – 1046. <doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.286>
- Kashani, A.; Ngo, T.; Hemachandra, P. y Hajimohammadi, A. 2018. «Effects of surface treatments of recycled tyre crumb on cement-rubber bonding in concrete composite foam». *Construction and Building Materials* 467 – 473: 467 – 473. <doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.154>
- Kashani, A.; Ngo, T.; Mendis, P.; Black, J. y Hajimohammadi A. 2017. «A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete». *Journal of Cleaner Production* 149: 925 – 935. <doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.163>
- Krishnan, Gokul y Anand, K. 2018. «Industrial waste utilization for foam concrete». *Materials Science and Engineering* 310, n° 1: 012062. <[10.1088/1757-899X/310/1/012062](https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012062)>
- Kunchariyakun, K.; Asavapisit, S. y Sombatsompop, K. 2015. «Properties of autoclaved aerated concrete incorporating rice husk ash as partial replacement for fine aggregate». *Cement and Concrete Composites* 15: 11 – 16. <doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.043>
- Kunchariyakun, K.; Asavapisit, S. y Sinyoung, S. 2018. «Influence of partial sand replacement by black rice husk ash and bagasse ash on properties of autoclaved aerated concrete under different temperatures and times». *Construction and Building Materials* 173: 220 – 227. <[10.1016/j.cemconcomp.2014.07.021](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.021)>
- Lim, S. K.; Tan, C. S.; Lim, O. Y. y Lee, Y. L. 2013. «Fresh and hardened properties of lightweight foamed concrete with palm oil fuel ash as filler». *Construction and Building Materials* 46: 39 – 47. <[10.1016/j.conbuildmat.2013.04.015](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.015)>
- Liu, M. Y. J.; Alengaram, U. J.; Santhanam, M.; Jumaat, M. Z. y Mo, K. H. 2016. «Microstructural investigations of palm oil fuel ash and fly ash based binders in lightweight aggregate foamed geopolymer concrete». *Construction and Building Materials* 120: 112 – 122. <[10.1016/j.conbuildmat.2016.05.076](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.076)>

- Ma, Bao-guo; Cai, L.-X.; Li, Xiang-guo y Jian, S. 2016. «Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products». *Journal of Cleaner Production* 127: 162 – 171. <doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.172>
- Maddah, Hisham. 2016. «Polypropylene as a Promising Plastic: A Review». *American Journal of Polymer Science* 6, nº 1: 1 – 11. <[10.5923/j.ajps.20160601.01](https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01)>
- Makul, N. y Sua-iam, G. 2016. «Characteristics and utilization of sugarcane filter cake waste in the production of lightweight foamed concrete». *Journal of Cleaner Production* 126: 118 – 133. <[10.1016/j.jclepro.2016.02.111](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.111)>
- Mohammed, J. y Hamad, A. 2014. «Materials, properties and application review of lightweight concrete». *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia* 37, no. 2: 10 – 15. <https://www.researchgate.net/publication/290090521_Materials_properties_and_application_review_of_lightweight_concrete>[Consulta: 13 – 12 – 2020].
- Munir, Abdul; Abdullah; Huzaim; Sofyan; Irfandi y Safwan. 2015. «Utilization of palm oil fuel ash (POFA) in producing lightweight foamed concrete for non-structural building material». *Procedia Engineering* 125: 739 – 746. <[10.1016/j.proeng.2015.11.119](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.119)>
- Muthu Kumar, E. y Ramamurthy, K. 2017. «Influence of production on the strength, density and water absorption of aerated geopolymer paste and mortar using Class F fly ash». *Construction and Building Materials* 156: 1137 – 1149. <doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.153>
- Nambiar, K. y Ramamurthy, K. 2007. «Air-void characterisation of foam concrete». *Cement and Concrete Research* 37, nº 2: 221 – 230. <[10.1016/j.cemconres.2006.10.009](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.009)>
- Nambiar, K. y Ramamurthy, K. 2006. «Influence of filler type on the properties of foam concrete». *Cement & Concrete Composites* 28, nº 5: 475 – 480. <[10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001)>
- Nambiar, K. y Ramamurthy, K. 2007. «Sorption characteristics of foam concrete». *Cement and Concrete Research* 37, nº 9: 1341 – 1347. <[10.1016/j.cemconres.2007.05.010](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.010)>

- Onprom, P.; Chaimoon, K. y Cheerarot, R. 2015. «Influence of Bottom Ash Replacements as Fine Aggregate on the Property of Cellular Concrete with Various Foam Contents». *Advances in Materials Science and Engineering*, nº 381704: 1 – 11. <[10.1155/2015/381704](https://doi.org/10.1155/2015/381704)>
- Özbay, E.; Erdemir, M. y Durmus, H. 2016. «Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - A review». *Construction and Building Materials* 105:423 – 434.<[10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153)>
- Pachideh, G. y Gholhaki, M. 2019. «Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete». *Journal of Building Engineering* 26, nº 100856. <[10.1016/j.jobe.2019.100856](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100856)>
- Raj, A.; Sathyan, D. y Mini, K. M. 2019. «Physical and functional characteristics of foam concrete: A review». *Construction and Building Materials* 221: 787 – 799. <doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052>
- Reddy, K. C. y Kumar, S. Dinesh. 2017. «Effect of fly ash and aluminium powder on strength properties of concrete». *Journalnx - a Multidisciplinary Peer Reviewed Journal* 3, nº 7: 57 – 61. <doi.org/10.5281/zenodo.1420856>
- Singh, N.; Mithulraj, M. y Arya, S. 2018. «Influence of coal bottom ash as fine aggregates replacement on various properties of concretes: A review». *Resources, Conservation and Recycling* 138: 257 – 271. <[10.1016/j.resconrec.2018.07.025](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.025)>
- Sofi, A. 2018. «Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete - A review». *Ain Shams Engineering Journal* 9, nº 4: 2691 – 2700. <[10.1016/j.asej.2017.08.007](https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.08.007)>
- Suksiripattanapong, C.; Krosoongnern, K.; Thumrongvut J.; Sukontasukkul, P.; Horpibulsuk, S. y Chindaprasirt, P. 2020. «Properties of cellular lightweight high calcium bottom ash-portland cement geopolymer mortar». *Case Studies in Construction Materials* 12: e00337. <[10.1016/j.cscm.2020.e00337](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00337)>
- Thomas, Blessen. 2018. «Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material - A comprehensive review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <[10.1016/j.rser.2017.10.081](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081)>

Sócrates Muñoz, Williams García y Tatiana Salazar

- Tian, Y. 2011. «Experimental Study on Aerated Concrete Produced by Iron Tailings». *Advanced Materials Research* 250 – 253: 853 – 856. <[10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.853](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.853)>
- Wang, B.; Dong F.; Chen, M. y Zhu, J. 2016 «Advances in recycling and utilization of agricultural wastes in China: Based on environmental risk, crucial pathways, influencing factors, policy mechanism». *Procedia Environmental Sciences* 31: 12 – 17. <[10.1016/j.compositesb.2019.107076](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107076)>
- Wongkeo, W.; Thongsanitgarn, P.; Pimraksa, K. y Chaipanich, A. 2012 «Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials». *Materials and Design* 35: 434 – 439. <[10.1016/j.matdes.2011.08.046](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.046)>
- Wongkeo, W. y Chaipanich, A. 2010. «Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume». *Materials Science and Engineering A* 527, nº 16 – 17: 3676 – 3684. <[10.1016/j.msea.2010.01.089](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.089)>
- Yao, Xingliang; Wang, W.; Liu, M.; Yonggang, Y. y Wu, S. 2019. «Synergistic use of industrial solid waste mixtures to prepare ready-to use lightweight porous concrete». *Journal of Cleaner Production* 211: 1034 – 1043. <[10.1016/j.jclepro.2018.11.252](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.252)>
- Yao, Z; y otros. 2015. «A comprehensive review on the applications of coal fly ash.». *Earth-Science Reviews* 141: 105 – 121. <[10.1016/j.earscirev.2014.11.016](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016)>
- Zhao, Xiao; y otros. 2015. «Properties of Foamed Mortar Prepared with Granulated Blast-Furnace Slag.». *Materials* 8, nº 2: 462 – 473. <[10.3390/ma8020462](https://doi.org/10.3390/ma8020462)>

Fecha de recepción: 30/11/2020

Fecha de aceptación: 14/05/2021

Correspondencia

Sócrates Muñoz Pérez

msocrates@crece.uss.edu.pe