

Resistencia en mortero con cemento sustituido al 50% por residuos de chanque y bambú

Resistance mortar with 50% cement replaced by residues of chanque and bamboo

Argamassa de resistência com 50 % de cimento substituído por resíduos chanque e bambu

César H. Julián Benites¹, Gumercindo Flores Reyes¹, Luis Segura Terrones¹, Yudi S. Cribillero Maguiña¹ y Walter Z. Velásquez Pereyra¹.

Resumen

El objetivo de la investigación fue encontrar una aplicación a los residuos calcáreos del chanque (RCC) y a las hojas secas del bambú (HSB), como materiales suplementarios cementantes (MSC) en mezclas de mortero. Las HSB fueron activadas a 600°C y desarrollaron altos contenidos de óxidos de silicio y de aluminio, así como una estructura amorfa. Los RCC fueron activados a 1000°C y desarrollaron altos contenidos de óxido de calcio. Ambos materiales se trituraron a 150µm y combinando los dos en una relación 1:1 se reemplazó el 50% del cemento en una mezcla de mortero. La resistencia alcanzada fue de 48.85% respecto a un mortero patrón sin sustitución.

Palabras clave: Materiales cementantes; resistencia; residuos de chanque y hojas de bambú.

Abstract

This work aims to find an application to the lime scale in chanque (RCCh) and dried bamboo leaves (HSB) as supplementary cementations materials (SCM) in mortar mixes. The HSB were activated at 600°C and developed high levels of oxides of silicon and aluminum, and an amorphous structure. The RCCh were activated at 1000°C and developed high content of calcium oxide. Both materials were ground to 150µm and combining the two in a 1: 1 50% of the cement is replaced in a mortar mix. The resistance achieved was 48.85% compared to a standard mortar without replacement.

Keywords: cementations materials, strength, chanque residue and bamboo leaves.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo encontrar um aplicativo para o calcário em chanque (RCCh) e folhas de bambu secos (HSB) como materiais cimentícios suplementares (MSC) em misturas de argamassa. O HSB foram activadas a 600°C e desenvolveram níveis elevados de óxidos de silício e alumínio, bem como uma estrutura amorfa. O RCCh foram activadas a 1000°C e desenvolvido alto teor de óxido de cálcio. Ambos os materiais foram moídas para 150 µm e a combinação dos dois numa proporção de 1: 1 a 50% do cimento é substituída por uma mistura de argamassa. A resistência foi alcançado 48,85% em comparação com um padrão argamassa sem substituição.

Palavras chave: materiais de cimento; resistência; chanque folhas de resíduos e de bambu.

Introducción

En la actualidad el cemento se mantiene como uno de los materiales más utilizados en el mundo, pero en su producción utiliza materias primas no renovables como las rocas calizas y arcillas. La producción del cemento a partir de estas materias primas genera altos niveles de contaminación ambiental que a nivel global representan entre 5 al 8 % de dióxido de carbono. Por otro lado, las altas temperaturas de calcinación requieren de altas cantidades de energía, lo que determina los altos costos de su producción y margina su uso en las poblaciones de menores recursos económicos.

¹Facultad de Ingeniería, Universidad San Pedro, cjulianb@hotmail.com

Recibido, 2 de marzo de 2016
Aceptado, 8 de abril de 2016

Como una respuesta a esta realidad, a nivel mundial se vienen investigando alternativas con enfoques más sustentables como son los llamados materiales suplementarios cementantes (MSC), los cuales tienden a utilizar materias primas renovables, cuya activación requiera de menos consumo de energía y por ende producen menos contaminación medio ambiental. Además contribuyen a reducir el consumo del cemento y aminorar sus costos haciéndolo más accesible a la población marginal en el uso del cemento.

Dentro de la línea de los MSC se encuentran los estudios relacionados con el uso de la ceniza de los residuos agrícolas, como el bagazo de la caña de azúcar que por sus altos contenidos de óxido de silicio y óxido de aluminio que le dan su propiedad cementante (Arezki y Moniqui, 2013). También se encuentran los trabajos sobre el uso de *Concholepas concholepas* “concha de abanico” que por su alto contenido de óxido de calcio; permiten ser usados como componentes del concreto (Harusima et al., 2013).

Respecto al uso de las hojas secas de bambú (HSB) como MSC se encuentran los trabajos de Frias et al., (2012) quienes reportan la activación de las HSB por calcinación a 600°C durante 1.2 horas y una molienda a tamaño de grano de 45 µm. Al material así obtenido lo caracterizaron por Fluorescencia de Rayos X (FRX) y encontraron altos contenidos de óxido de silicio (78.71 %) y de óxido de calcio (7.82%). Un análisis estructural de difracción de rayos X (DRX) les permitió determinar el carácter predominante amorfo de las cenizas de las hojas de bambú. Al reemplazar el cemento en un 10 y 20 % con este material, en mezclas de mortero, les permitió a estos autores encontrar una alta resistencia a la compresión a los 28 días de 70 Mpa.

En el ámbito nacional, el trabajo de Julián et al. (2014) reporta un reemplazo del 5, 10 y 15 % de cemento por cenizas activadas de HSB a 600°C por 2 horas y un tamaño de grano del orden 150 µm. Para estos niveles de activación y los porcentajes de sustitución del cemento en concreto, reporta resistencias del orden de 343.5 Kg/cm² a los 28 días de curado. Estos mismos autores también reportan la activación de los residuos calcáreos de la concha de abanico a 900 °C durante 3 horas y de molienda a tamaño de grano de 150 µm. Cuando sustituyeron el polvo activado de la concha de abanico en porcentajes de 5, 10 y 15 % de cemento, en mezclas de concreto, alcanzaron resistencias de 298.63 Kg/cm² a los 28 días de curado.

Para el uso de los residuos calcáreos del chanque o residuos calcáreos de la “concha de abanico” (RCC) como MSC no se han encontrados antecedentes, lo que constituye una novedad para nuestra propuesta. Considerando que en Perú existen 1.5 millones de hectáreas (PERUBAMBU, 2013) cuyas hojas secas se caen del árbol y no tienen ninguna aplicación útil en nuestro país y tomando en cuenta que los RCC se generan a lo largo del litoral peruano en volúmenes aun no cuantificados, planteamos el reto de activar por separado los contenidos de silicio de las HSB y los contenidos de carbonato de calcio presentes en los RCC; para luego, reemplazar el cemento en un 50%, por 25% de HSB y 25% de RCC en una mezcla de mortero. Como una manera indirecta de evaluar los complejos mecanismos de reacción de los componentes activados que se están agregando y los remanentes del cemento no reemplazado en la mezcla de mortero, procedimos a medir su resistencia a la compresión tanto de un mortero patrón sin sustituir; como de los morteros experimentales sustituidos al 50% por los residuos activados de RCC y HSB. El reemplazo busca disminuir la contaminación y el precio

del cemento convencional que tienda a incluir al 72.3 % (INEI, 2013) de nuestra población rural marginada del uso de este costoso material constructivo.

Se formuló la hipótesis de que al mezclar los óxidos de silicio de HSB con los óxidos de calcio de RCC podría reaccionar puzolánicamente y generar un MSC capaz de generar resistencias en mezclas de mortero con potenciales aplicaciones prácticas en construcciones. El único antecedente encontrado sobre una mezcla similar a nuestra propuesta es el trabajo de Fernández et al. (2007). El objetivo de la investigación fue encontrar una aplicación a los residuos calcáreos del chanque (RCC) y a las hojas secas del bambú (HSB), como materiales suplementarios cementantes (MSC) en mezclas de mortero en proporción 1:1.

Materiales y métodos

Las HSB se colectaron en San Jorge Alto, Buena Vista, Chao y los RCC del mercado de la ciudad de Huarmey. La preparación de las muestras consistió en secar las HSB en sombra por una semana y luego, utilizando un cilindro recubierto de cerámica se quemaron a cielo abierto. Las muestras de chanque se limpiaron, se mantuvieron en agua por dos semanas y se secaron en estufa por 24 horas a 105°C.

La activación de HSB se efectuó por calcinación en mufla a 600°C durante 2 horas en los Laboratorios de Ingeniería de Materiales de la Universidad Nacional de Trujillo. Las conchas de chanque se calcinaron en los mismos laboratorios a 1000°C por 3 horas y 12 minutos. La activación mecánica de ambos materiales calcinados fue del orden de 150 µm.

Las cenizas de las HSB fueron analizadas por espectrometría de FRX en los Laboratorios Labicer de la Universidad Nacional de Ingeniería, utilizando un equipo SHIMADZU, EDX-800HS. Los componentes que favorecieron su actividad cementante fueron el Si y Al y los que lo perjudicaron el magnesio y el potasio.

Tabla 1. Composición química por espectrometría de fluorescencia de rayos x.

Composición química	Resultados (%)	Composición química	Resultados (%)
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	47.388	Óxido de Calcio (CaO)	93.317
Óxido de Magnesio (MgO)	15.449	Óxido de Potasio (K ₂ O)	2.328
Óxido de Potasio (K ₂ O)	14.947	Dióxido de Silicio (SiO ₂)	2.030
Trióxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	10.998	Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	1.808
Óxido de Calcio (CaO)	5.963	Óxido de Estroncio (SrO)	0.415
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	3.118	Trióxido de Azufre (SO ₃)	0.092
Pentóxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	1.320	Materia Orgánica	0.010
Trióxido de Azufre (SO ₃)	0.234		
Cloruro (Cl ⁻)	0.208		
Óxido de Titanio (TiO ₂)	0.181		
Óxido de Manganeso (MnO)	0.127		
Materia Orgánica	0.010		

(a) Ceniza de las hojas de bambú

(b) Polvo de concha de chanque

Así mismo, se realizó el análisis de su composición estructural por DRX en el Laboratorio de Física de la Universidad Mayor de San Marcos, utilizando un equipo BRUKER, modelo D8-FOCUS. El resultado de este análisis mostró su predominante carácter amorfo, que favoreció su actividad cementante. Éste carácter amorfo aparece en la figura 1; el mismo que, confirman los resultados reportado por Frías et al. (2012).

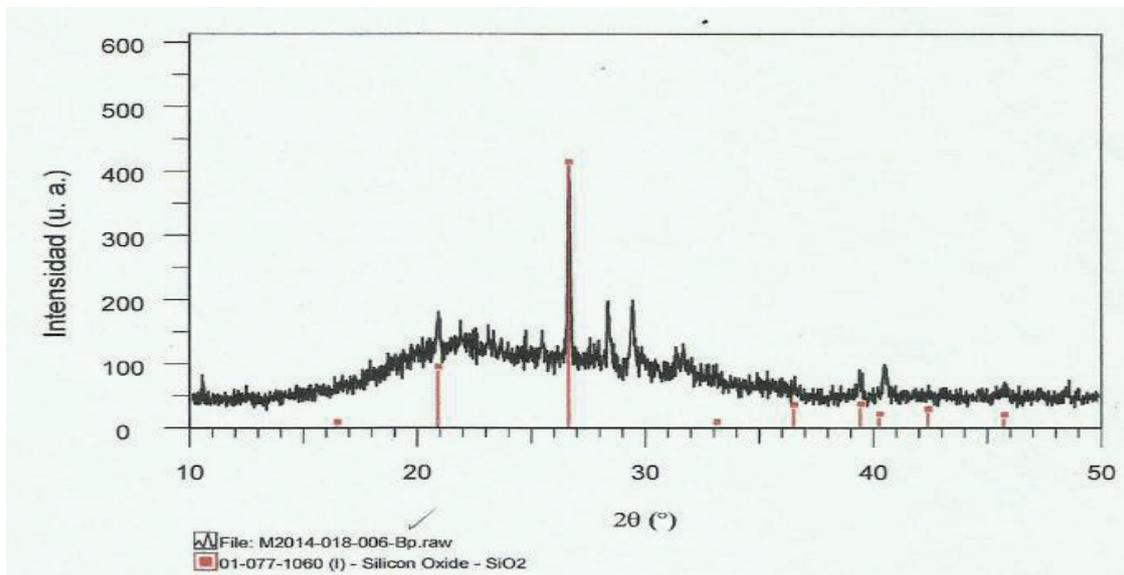


Figura 1. Fases presentes en una muestra de HSB calcinada a 600°C por 2 horas.

Igualmente el polvo activado de los RCC se sometió a un análisis químico de FRX y se encontró con un alto contenido de CaO (93.31%) frente a otros elementos minoritarios de potasio, silicio y hierro, como se aprecia en la tabla 1 (b). También se determinó la alcalinidad de ambos materiales activados y sus resultados se indican en la tabla 2.

Tabla 2. pH de los componentes activos del mortero experimental.

Materiales	pH
Cemento portland tipo I	11.46
Polvo de concha de chanque	11.90
Ceniza de hojas de bambú	8.84
25% de HSB + 25% de RCCh	12.15

De acuerdo a las especificaciones de la Norma Técnica Peruana (NTP, 2013) el nivel de trabajabilidad de un mortero estándar está determinado por la relación agua/cemento. Para nuestro trabajo, el mortero patrón tuvo el siguiente diseño: cemento 121 g, arena 726 g y agua 117.1 g, lo que equivale a una relación de 1: 3: 0.48; para un volumen de 3 moldes cúbicos de 5 x 5 x 5 cm. En la conformación del mortero patrón se consideró el siguiente orden de homogenización: primero, se mezcló en seco el cemento con la arena hasta alcanzar su uniformidad entre ambos y luego se vació en una batidora y se agregó el agua. La mezcla así obtenida, se vació en los 3 moldes.

Para la conformación de los morteros experimentales se procedió de la siguiente manera: primero, se mezcló 60.5 g de cenizas de hojas de bambú con 60.5 g de polvo de conchas de chanque (que representaron la sustitución del 50% del cemento); luego, a la

mezcla anterior se añadió el cemento y se volvió a mezclar hasta alcanzar su uniformidad con los componentes anteriores; para luego, finalmente añadir 726 g de arena. La mezcla de estos cuatro componentes se vació en una batidora a la cual se añadió 117.1 g de agua referenciales con respecto al patrón, pero como se encontró que la mezcla no era aún trabajable se procedió añadir 30.8 g de agua adicionales, lo que hizo un total de 147.9 g de agua para los morteros experimentales, en resumen el diseño de los morteros experimentales fue de 1: 3: 0.61.

Resultados

Para medir, de manera indirecta, la reactividad cementante de estos materiales activados en mezclas de mortero, se midió la resistencia a la compresión de los morteros patrón (con 0% de sustitución del cemento) y de los experimentales (con 50% de sustitución del cemento) a las edades de 7, 14 y 28 días. Los resultados aparecen en la tabla 3 (a) y (b).

Tabla 3. Resistencia a la compresión de morteros.

Edad (días)	Frecuencia	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia promedio (Kg/cm ²)	Edad (días)	Frecuencia	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia promedio (Kg/cm ²)
7	P-1	322.88	318.75	7	E-1	98.00	101.73
	P-2	314.44			E-2	101.72	
	P-3	318.92			E-3	105.48	
14	P-1	389.12	356.91	14	E-1	117.72	115.05
	P-2	400.80			E-2	112.28	
	P-3	280.80			E-3	115.16	
28	P-1	400.80	400.80	28	E-1	188.08	195.85
	P-2	400.80			E-2	198.56	
	P-3	400.80			E-3	200.92	

(a) Patrón

(b) Experimental

La resistencia promedio del mortero patrón y el experimental vs las edades de 7, 14 y 28 días de la Tabla 3 (a) y (b), se presentan en la figura 2. De igual manera las medidas de la tolerancia máxima a la resistencia en compresión de las unidades de los morteros patrón (0% de sustitución del cemento) y las experimentales (50% de sustitución del cemento) aparecen en la tabla 4.

Discusión

El material a sustituir en el presente trabajo es el Cemento Portland Ordinario (CPO) y tomamos su composición básica como referencia: 63.4% de CaO, 20.16% de SiO₂, 4.36% de Al₂O₃ (Frías et al., 2012).

Los resultados de Fluorescencia de Rayos X (FRX) nos indican que las cenizas de las HSB, después de haber sido activadas a 600°C por 2 horas contienen 47.3% de SiO₂ y 10.9% de Al₂O₃ (tabla 1 (a)); estos altos porcentajes, superan a los porcentajes del

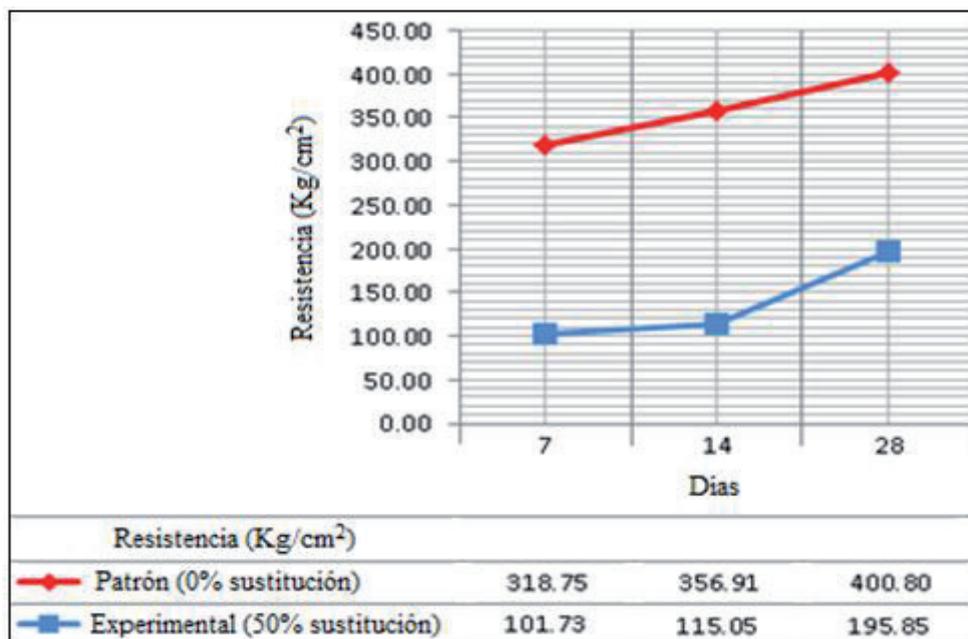


Figura 2. Resistencia del mortero patrón y experimental.

Tabla 4. Medidas de tolerancia máxima a la resistencia en compresión para morteros patrón 0%, y sustituidos al 50%.

Repeticiones	7 Días		14 Días		28 Días	
	Experimenta l	Patrón	Experimenta l	Patrón	Experimenta l	Patrón
1	98.00	322.0	117.72	389.12	188.05	400.80
2	101.72	314.4	112.28	400.80	198.56	400.80
3	105.48	318.9	115.16	280.80	200.92	400.80
Promedio	101.70	318.5	115.10	356.90	195.80	400.80
Desv. estándar	3.70	3.80	2.70	66.20	6.90	0.00
Homog.	0.01		13.81		12.55	
Varianzas	N.S.		P<0.05		P<0.05	
Homog. medias	-70.05		-6.33		-51.81	
	P<0.01		P<0.01		P<0.01	

CPO para estos mismos elementos; por lo tanto, permitieron su sustitución parcial. Además, los resultados de los análisis de difracción de Rayos X (DRX) de las HSB; nos indican que, su estructura es de carácter amorfo (figura 1), lo que facilitó la homogenización de la mezcla cuando reemplazamos al cemento por este material. Frías et al. (2013) también han reportado el carácter amorfo de este material; sin embargo, ellos reportan valores de 78.71% para SiO₂, muy superiores a los nuestros (47.3%); esta diferencia de niveles activados de SiO₂, se debería al hecho que, este equipo de trabajo, utilizó un tiempo de calcinación de 1.2 horas que es menor a la calcinación de 2 horas empleadas por nuestro equipo. En relación al tamaño de partícula el equipo de Frías alcanzó los 45 μm frente al nuestro que sólo alcanzó 76 μm. El menor tamaño de

partícula alcanzado por el equipo de Frías implica la mayor reactividad reportado por ellos.

Los resultados de nuestros análisis de FRX para el polvo de RCC señalan que el CaO_3 presente en este material se ha convertido en un 93.3% de material activo de CaO (Tabla 1 (b)). Este porcentaje supera al contenido de óxido de calcio presente en el CPO, y por lo tanto permitió su sustitución parcial. Al no encontrarse antecedentes directos con los RCCh, se toma como referencia el trabajo de Hazurina et al. (2013) quienes reportan la calcinación de las conchas de la *Anadara granosa* (“pata de mula”) a 1000°C por 1 hora, y alcanzan una conversión a carbonato de calcio de un 99%. La diferencia con nuestro resultado probablemente se deba a la diferente especie de concha y el tiempo de calcinación. La combinación del 25% de HSB con 25% de RCC generaron un $\text{pH}=12.15$ que contribuyó positivamente en la sustitución del cemento (tabla 2).

En la elaboración del mortero patrón se siguió la norma técnica peruana (NTP 2013) que establece una proporción cemento–arena de 1 a 3 y se determinó empíricamente una relación agua/cemento de 0.48. En la elaboración del mortero experimental se mantuvieron las proporciones en peso de la arena y el cemento; pero el 50% del peso del cemento se sustituyó por 25% de HSB y 25% por RCC. Esta sustitución determinó que para obtener una mezcla trabajable, fue necesario agregarle 30.8 g de agua a la mezcla. Debido a esta adición de agua la relación agua/cemento - hojas de bambú - chanque subió a 0.61. La adición de los 30.8 g de agua se hizo por tanteo, puesto que no se conocen los índices de absorción de los materiales adicionados; ni sus mecanismos de reacción entre ambos. Tampoco se conoce la reacción de estos materiales activados con la parte del cemento no sustituido, por tanto, la cantidad de agua adicionada se debe tomar como un dato referencial y requeriría de un mayor estudio.

Frías et al. (2012) hallaron que al reemplazar el 10 y 20% del cemento con cenizas de HSB alcanzaron a la edad de 28 días una resistencia en mortero de 700 kg/cm^2 y a la vez determinaron la alta reactividad de HSB durante las primeras 24 horas debido a la rápida reacción de su componente amorfo para conformar los hidratos de silicatos de calcio HSC (o Torbemorita) que desencadena el fraguado de la mezcla. Hazurina et al. (2013) al reemplazar el 25% del cemento por polvo de *Andara granosa* (“pata de mula”) en concreto, encontraron a los 28 días de edad una resistencia de 250 kg/cm^2 . Martínez et al. (2007) elaboran un aglomerante puzolánico con 30% de cal mineral y 70% de ceniza de caña de azúcar y logra obtener una resistencia de 130 kg/cm^2 a los 28 días de edad; un dato interesante es que el 64.73% de óxido de silicio presentes en las cenizas de la caña de azúcar y el 72.88% de óxido de calcio presentes en la cal mineral, al mezclarse ambos valores iniciales se redujeron a 45.73% de SiO_2 y tan solo 29.83% de CaO; lo cual evidencia que, dependiendo de las proporciones de la mezcla, estos componentes fundamentales tienden a disminuir y reducir la resistencia del material binario.

En el marco de los resultados del párrafo anterior, nuestra resistencia de 195.85 kg/cm^2 son inferiores a los encontrados por el equipo de Frías al usar sólo cenizas de HSB y también a los reportados por el equipo de Hazurina al usar sólo polvo de pata de mula; sin embargo, se supera al resultado del grupo de Martínez de 130 Kg/cm^2 cuando hace una sustitución binaria de cal mineral – ceniza de caña de azúcar.

Las medidas de tolerancia máxima a la resistencia en compresión para morteros patrón 0%, y sustituidos al 50% son estadísticamente significativos ($P<0.01$).

Conclusiones

Se alcanzaron altos niveles de activación del silicio y aluminio en las hojas secas del bambú y del calcio en los residuos calcáreos del chanque; los mismos que al combinarse en 1:1 originaron una reacción alcalina de 12.15 que permitió la sustitución del 50% del cemento en una mezcla de mortero.

La dosificación de agua/cemento de 0.48 permitió obtener un mortero de alta resistencia con potenciales aplicaciones estructurales; mientras que el mortero experimental con relación de agua/cemento de 0.61, presentó mediana resistencia con posibles aplicaciones en tabiquería.

Se logró evidenciar un grado de aplicación de los residuos calcáreos del chanque (RCC) y de las hojas secas del bambú (HSB), como materiales suplementarios cementantes (MSC) en mezclas de mortero en proporción 1:1 ya que existe una marcada diferencia en el desarrollo de la resistencia del mortero patrón y el experimental.

Referencias bibliográficas

- Frías, M., Sabastano, H., Villar, E., Sánchez, M. & Santos, S. (2012). Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. *Cement & concrete composites*, 34:1019-1023.
- Hazurina, O. N., Hisham, A. B., Mat, D. M., & Azmi, M. M. (2013). Cockle shell ash replacement for cement and filler in concrete. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 25(2):201-211.
- Julián, B. C., Manrique, C. C., Lizarzaburu, M. L., Hermoza, C. M., Campos, S. L., Zegarra, I. L. (2011). Sustitución parcial del cemento por residuos calcáreos de *Argopecten purpuratos* (conchas de abanico) en mezclas de concreto. *Conocimiento para el desarrollo*, 2:1-8.
- Julián, B. C., Segura, T. L., Jara, F. W. (2014). Resistencia de nuevos materiales para sustituir el cemento en concreto. *Conocimiento para el desarrollo*, 6 (2):1-8.
- Martínez, F. L., Quintana, P. R., Martirena, H. J. (2007). Aglomerante puzolánico formado por cal y cenizas de paja de caña de azúcar: la influencia granulométrica de sus componentes en la actividad aglomerante. *Revista Ingeniería de construcción*, 22(2): 113-121.
- PERUBAMBU. (2013). Promoción de la rehabilitación, manejo y uso sostenible de los bosques tropicales de bambú en la región noroccidental del Perú. Recuperado de <http://perubambu.org.pe/ProyectosActividades.php>.
- Tagnit, H. A., & Tognovi, M. T. (2015). Valorization of locally available industrial and agro-industrial wastes in concrete: A sustainable solution – A literature review. *Communication personal*, August 8, 2015.