

Comportamiento térmico en mezclas de cal hidratada, ceniza y roca volcánica (piedra pómez), en sustitución del cemento Portland



Colaboración

Christian Manuel Flores, José Manuel Guzmán Gileta, José Fidel Navarro Arellano, Luis Aarón García Solórzano, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Colima

RESUMEN: Las rocas y cenizas volcánicas han sido utilizadas en la construcción de edificaciones a lo largo de la historia. Sin embargo, en el presente estudio se analizan las propiedades térmicas de una mezcla elaborada con cal hidratada, ceniza y roca volcánica (piedra pómez) que pueda sustituir al cemento portland, sin comprometer la resistencia térmica de edificaciones sometidas a temperaturas elevadas, y permitiendo el ahorro de recursos relacionados con la calcinación de las rocas utilizadas en la elaboración del cemento, así como una reducción en las emisiones de dióxido de carbono. Se realizaron pruebas relacionadas con la medición del calor específico, conductividad, resistividad y difusión térmica a una serie de mezclas elaboradas con diferentes proporciones en cada uno de sus componentes, determinando aquellas que mostraron el mejor desempeño en cada una de las propiedades térmicas analizadas, los resultados sugieren que el índice de calor específico en la mezcla disminuye, conforme se incrementa la proporción de materiales volcánicos y cal hidratada, mientras que la conductividad y difusividad crecen.

PALABRAS CLAVES: Ceniza Volcánica, Puzolanas, Comportamiento Térmico, Innovación Tecnológica, Concreto, Morteros.

ABSTRACT: Volcanic rocks and ashes have been used in the construction of buildings throughout history. However, in the present study the thermal properties of a mixture made with hydrated lime, ash and volcanic rock (pumice stone) that can replace Portland cement are analyzed, without compromising the thermal resistance of buildings subjected to high temperatures, and allowing saving of resources related to the calcination of rocks used in the manufacture of cement, as well as a reduction in carbon dioxide emissions. Tests related to the measurement of specific heat, conductivity, resistivity and thermal diffusion were performed to a series of mixtures made with different proportions in each of its components, determining those that showed the best performance in each of the thermal properties analyzed. Results suggest that the specific heat index in the mixture decreases, as the proportion of volcanic materials and hydrated lime increases, while the conductivity and diffusivity increase.

KEY WORDS: Volcanic Ash, Puzolanas, Thermal Behavior, Technological Innovation, Concrete, Mortars.

INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción cada día surgen nuevos materiales que atienden de manera más efectiva las necesidades de los usuarios. Las empresas en el ramo de materiales han desarrollado una conciencia ecológica en los últimos años, por lo que en la fabricación de sus productos han estado buscando disminuir los estragos ambientales.

El cemento Portland es uno de los productos en la industria de la construcción que más es utilizado a nivel mundial. Este producto es resultado de calcinar hasta fusión parcial a una temperatura de 1450°C, por un proceso de síntesis en estado sólido, mezclas homogéneas de caliza y arcilla del cual se obtiene el Clinker, constituido principalmente por silicatos y aluminatos anhidros de calcio,

que se muelen con yeso para obtener finalmente el cemento. Este proceso de síntesis en estado sólido a alta temperatura, hace que la industria del cemento sea responsable del 5 al 7% de las emisiones antropogénicas globales de CO₂ a la atmósfera.[1]

En la producción del cemento, las emisiones de CO₂ se deben principalmente a la descomposición, en óxidos, de los carbonatos presentes en la piedra caliza. Para reducir las emisiones de CO₂, la industria cementera ha tomado diversas medidas para reducir el contenido de Clinker, entre las que se encuentra su reemplazo por materiales residuales como el sílica activa, ceniza volante o escoria de alto horno, y su uso como materia prima alternativa.[2]

Existen algunos desechos industriales que pueden ser viablemente utilizados como materiales cementantes y que, además, requieren poco o ningún tipo de tratamiento previo para su utilización en la mezcla para concreto y/o mortero. Por otro lado, también existen otros materiales cementantes de origen natural (por ejemplo, la ceniza volcánica) que se encuentran disponibles para su uso en la mezcla de concreto.[3]

Desde el punto de vista empresarial, el sector industrial ha percibido que los aspectos ambientales bien administrados pueden generar valor económico corporativo, bien sea por la reducción del riesgo, la reducción de los costos totales de producción, el aumento de los ingresos y la buena imagen pública de la empresa.[4]

El Estado de Colima es un lugar con actividad sísmica, debido a que se encuentra un Volcán activo en la cercanía del Estado. El volcán de Colima (103°37'w.19°30'45"N) se ubica en el sector sudoccidental de la Faja Neovolcánica Transmexicana y con base en su historia eruptiva, es considerado como el volcán más activo de México [5], constantemente realiza emisiones donde nos encontramos con cenizas volcánicas esparcidas en las cercanías al cono que lo conforma, este material natural es considerado como desecho, además de que puede causar problemas de salud si llega a ser inhalado. Otro material volcánico es la Piedra Pómez o Jal nombre otorgado popularmente dado que proviene del Estado de Jalisco, dicho material se forma durante un rápido enfriamiento de un magma ascendente de alta viscosidad.

Con base en lo anterior mencionado, el presente trabajo tiene por objeto el desarrollo de un material que pueda ser empleado en la construcción, en donde se utilicen algunas materias de la región de Colima, como lo es el material volcánico existente en la zona como lo es la ceniza rica en Sílice y la piedra pómez, además se busca reducir el consumo del cemento portland, siendo un producto responsable de emisiones contaminantes en el planeta, por lo que se empleara Cal hidratada con ceniza volcánica en sustitución parcial de este.

Las mezclas propuestas se someterán a una prueba de transmisión térmica para observar el comportamiento que puedan lograr. Para efectos de este artículo de investigación solo se realizarán pruebas a un cierto número del diseño de mezclas, donde variará la cantidad de proporción de los materiales mencionados.

Las consideraciones a evaluar de la transmisión térmica serán el Calor Específico, siendo representado por "C", entendiéndose por la energía que necesita una unidad de masa de una sustancia para aumentar su calor en un grado Celsius, la Conductividad Térmica es representado por " λ ", y se entiende por la capacidad de permitir el paso de energía cinética de sus moléculas a otras sustancias adyacentes, la Resistividad Térmica es representado por "r" y es el término opuesto al de conductividad, y se puede definir como la resistencia de ciertos materiales a la transmisión del calor por sus moléculas. Por último, la Difusividad siendo representada por " α " y se entiende que es la tasa de cambio con que un material aumenta de temperatura, al ser puesto en contacto con una fuente de calor.

Producir cemento es un proceso costoso, pues involucra un gran requerimiento energético y presenta altos impactos ambientales, debido a la producción de gases y alta demanda de materiales provenientes de la minería.

Con el fin de reducir costos en la producción de los cementos, así como de ser ambientalmente sostenibles, hoy en día la mayoría de los cementos se constituyen de una mezcla entre clinker, yeso y adiciones. Estos materiales son generalmente materiales de origen natural o subproductos de otros procesos. Las Adiciones o puzolanas pueden clasificarse según su origen en, puzolanas naturales y puzolanas artificiales; entre las primeras se encuentran las cenizas volcánicas, tobas volcánicas, zeolitas, tierras de diatomeas (diatomitas), en las segundas se destacan las cenizas volantes, arcillas activadas térmicamente, microsílíce (humo de sílice), cenizas de cáscara de arroz y escoria de Alto Horno o de fundición. [6]

Una vez que se cuente con la mezcla, su uso puede disminuir los costos en la elaboración del cemento portland, aprovechando el uso de recursos naturales de origen volcánico.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cal hidratada, según la norma N-CMT-4-03-001/02 se define como un producto cementante seco, hidratado, obtenido al calcinar calizas que contienen sílice (SiO) y alúmina (Al₂O₃) a una temperatura cercana a la de fusión incipiente, de tal forma que se obtiene suficiente óxido de calcio (CaO) para permitir la hidratación y, al mismo tiempo, dejando suficientes silicatos de calcio (CaSiO₃) sin hidratar, con lo que resulta un polvo seco, que cumple con las propiedades hidráulicas.

cas requeridas en algunas aplicaciones, destacándose la propiedad de fraguar y endurecer, aun bajo el agua.

La piedra pómez (también llamada pumita o Jal) es una roca ígnea volcánica vítrea, con baja densidad y muy porosa, de color blanco o gris. El origen volcánico le dio ciertas características a la piedra pómez: una multitud de poros y células cerradas que dan por resultado una porosidad con una solidez de grano al mismo tiempo. Debido a su ligereza puede flotar sobre las aguas a causa del aire contenido en sus cavidades. Aparte de eso la piedra pómez es resistente al frío, al fuego y a la intemperie y libre de sales solubles en agua. Las partículas de esta roca volcánica poseen varias formas, predominando las alargadas y las angulosas. Sus poros cerrados le confieren una baja densidad, por lo que el comportamiento al impacto es muy ligero. La piedra pómez comúnmente es utilizada en industrias de la construcción para la fabricación de morteros u hormigones de áridos ligeros, destinados a mejorar las condiciones térmicas y acústicas. [7]

El abasto de la mayor parte de los materiales son de fácil obtención, a excepción de la ceniza volcánica, la cual no es un material en la región de Colima comerciable, por lo que la obtención de esta se conseguirá de la depresión Cordobán (Rio Cordobán), donde se encuentran depósitos que descienden de las partes más altas del volcán por su flanco sudoccidental, hasta llegar al poblado de La Becerrera. [5]

Las cenizas y rocas del Complejo Volcánico de Colima están compuestas en general, de andesitas básicas calcoalcalinas a andesitas silíceas con presencia de anfíboles. Una tendencia al decremento en contenido de sílice en las lavas eruptadas de norte a sur y es correlacionada con una tendencia al incremento en la tasa de erupción. [8]

Como sustento para un buen diseño de proporción de mezcla, se consideró emplear el utilizado en la fabricación de concretos por parte de la PCA (Portland Cement Association), donde nos menciona que las proporciones de la mezcla para un metro cúbico de concreto se calculan usando el rendimiento de la mezcla (volumen) y la densidad (peso volumétrico, peso unitario, masa unitaria, peso específico). [9]. Para efectos de prueba exploratoria de esta investigación se desarrollaron las proporciones de forma arbitraria, variando un 5% la cantidad de material en cada módulo. (tabla 1).

Tabla 1. En la tabla se muestra el diseño de proporción de materiales para cada probeta.

Modulo	Cemento	Cal	Ceniza	Piedra Pómez	%
M-01	30	5	20	45	100
M-02	25	10	25	40	100
M-03	20	15	30	35	100
M-04	15	20	35	30	100
M-05	10	25	40	25	100
M-06	5	30	45	20	100

En la elaboración de las mezclas de acuerdo a la tabla 1, se manejaron los porcentajes a el peso del material más denso, en este caso la ceniza volcánica, utilizando como medida 1 kg de ceniza como el 100%. Como ejemplo, en la elaboración de la mezcla M-01, se colocaron 2 recipientes iguales vacíos sobre una báscula electrónica, al primero se le vertió 1kg de ceniza y al otro el equivalente al 30% del kilo en cemento, dan por resultado 1.3kg de peso neto en material, así sucesivamente se procedió a pesar el resto de los materiales. En el caso de la piedra pómez o Jal, antes de ser pesada, primero se pasó por una malla criba del no.4, para tener partículas uniformes.

Una vez pesados los materiales para cada mezcla prototipo se vacían a un cajón mezclero, vertiéndose en el siguiente orden: primero la ceniza, cal y cemento, mezclando con una cuchara de albañilería hasta homogenizar, después se añade el jal y se agrega agua poco a poco hasta lograr una consistencia manejable, lograda la consistencia se vierte en la cimbra asignada.

Las cimbras utilizadas fueron de madera con forma de cubo de 10 cm de dimensión (Figura 1), donde se les marco con un plumón el tipo de mezcla para identificarlas. Las mezclas se dejan fraguar 7 días para su desmolde y posteriormente realizar 2 perforaciones de 5 cm de profundidad aproximadamente y separadas 0.6 cm una de otra, utilizando un taladro con una broca 5/64" o 2mm.



Figura 1. Muestra de los módulos empleados para las probetas.

El siguiente paso es realizar una tabla de valoración de cada módulo donde se especifique las características de cada espécimen, así como las propiedades a evaluar.

Previo a la realización de la prueba, el equipo "Kd2 Pro" se le debe de realizar una calibración, para esto hay que esperar 15 min para que el equipo registre la temperatura del lugar, después realizar una medición de prueba a una sustancia (Glicerina) la cual nos debe de arrojar datos establecidos en el manual operativo. La

prueba se llevó a cabo en un aula con una temperatura estable, en este caso en particular se mantuvo a 23°C. Una vez realizada la calibración del equipo se procede a efectuarse la prueba con el sensor SH-1 en cada probeta, previamente los orificios de los módulos fueron rellenos con vaselina como indica el manual de operaciones [10], para después proceder a realizar las mediciones, el tiempo estimado por cada probeta es de 2 minutos (Figura 2).



Figura 2. Instrumento Kd2 Pro realizando el análisis en el módulo M5.

Una vez finalizada la medición de cada espécimen, se procede a dar lectura de los datos obtenidos, conjuntamente se fue registrando en el formato elaborado previamente. (Figura 3).

Las unidades que maneja el dispositivo Kd2 Pro son las del Sistema Internacional de Unidades (SI).

De tal modo, el coeficiente de Calor Específico "C", se medirá en Mega Joule / metro cúbico x Grado Kelvin (MJ/m³K).

La Conductividad Térmica "λ", se medirá en Vatios / (metro x Kelvin) (W/(m•K)).

En Resistividad Térmica "r", será en (Grado Celsius x Centímetro) / Watt (C.cm/W).

Por último, la Difusividad Térmica "α", será en milímetro cuadrado / segundo (mm²/s).

MATERIAL: Mezcla Prototipo 1	
CARACTERÍSTICAS ANALISADAS	
Notas	Calor específico (C) MJ/m ³ -K 2.874
	Conductividad térmica (K) W/m-K 0.412
Físicas	Resistividad térmica (RHO) C-cm/W 242.8
Peso (Kg)	1.79
Volumen (M3)	0.001
Densidad	1790
	Difusividad térmica (D) mm ² /s 0.143

Ceniza Volcánica 20%, Piedra Pómez 45%, Cemento 30%, Cal 05%.

Figura 3. Muestra las características consideradas para evaluar a las probetas.

Registrado los datos obtenidos de cada prototipo, se procede a ordenar la información, para realizar una tabulación general y comenzar la generación de gráficas, facilitándonos el proceso de análisis e interpretar la información recabada.

RESULTADOS

Con la elaboración de una tabla general, se muestra un concentrado ordenado de los resultados arrojados en las mediciones de cada prototipo, permitiendo observar y realizar una comparativa rápida de la proporción empleada en cada mezcla, así como las características físicas y térmicas. (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados obtenidos de los prototipos.

Módulo	Datos Generales		Características Físicas			Características Térmicas			
	Material	Material %	Peso (Kg)	Volumen (M3)	Densidad	Calor Específico (MJ/m ³ -K)	Conductividad Térmica (W/m-K)	Resistividad Térmica (C-cm/W)	Difusividad Térmica (mm ² /s)
M-1	Ceniza Volcánica	20%	1.79	0.001	1790	2.874	0.412	242.8	0.143
	Piedra Pómez	45%							
	Cemento	30%							
	Cal	5%							
M-2	Ceniza Volcánica	25%	1.765	0.001	1765	2.518	0.391	255.7	0.155
	Piedra Pómez	40%							
	Cemento	25%							
	Cal	10%							
M-3	Ceniza Volcánica	30%	1.77	0.001	1770	2.31	0.403	236.9	0.209
	Piedra Pómez	35%							
	Cemento	20%							
	Cal	15%							
M-4	Ceniza Volcánica	35%	1.77	0.001	1770	2.33	0.42	237.9	0.218
	Piedra Pómez	30%							
	Cemento	15%							
	Cal	20%							
M-5	Ceniza Volcánica	40%	1.77	0.001	1770	1.911	0.47	212.6	0.246
	Piedra Pómez	25%							
	Cemento	10%							
	Cal	25%							
M-6	Ceniza Volcánica	45%	1.77	0.001	1770	1.876	0.461	217.1	0.248
	Piedra Pómez	20%							
	Cemento	5%							
	Cal	30%							

Al expresar en forma gráfica los resultados de la tabla general, nos permite observar un panorama general del desempeño individual que logro cada prototipo en cada una de las características térmicas, además nos facilita realizar un análisis e interpretación efectiva y sencilla de la influencia de los materiales en cada prototipo.

El resultado obtenido en la sección de calor específico "C", indicó la temperatura propia de cada mezcla, además se observa claramente una tendencia descendiente entre las mezclas M-1 a M-6. Esto es debido a la variación de cantidad en el material empleado de cada prototipo, acentuando que ante mayor proporción de cemento y jal se emplee, el coeficiente en "C" es mayor, por consiguiente, ante la ausencia de estos y el incremento de ceniza volcánica y cal, el índice en "C" tendera a ser menor. (Figura 4).

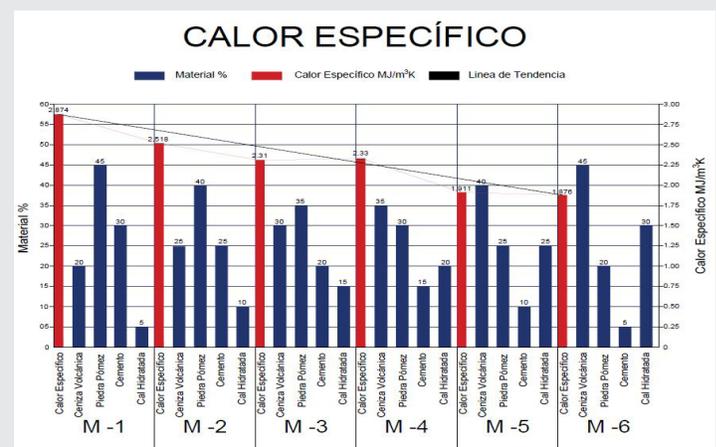


Figura 4. Valores obtenidos de Calor Específico.

Realizando una comparación entre los prototipos M-1 y M-6, siendo estos el de mayor y menor índice obtenidos, resultó una diferencia en "C" de 0.998 MJ/m3K, esto representa una diferencia del 53.19% de la mezcla M-6 respecto a M-1. La variación en proporción en material fue de un 25% en cemento y 25% en jal.

Los resultados en tema de conductividad " λ ", indico una tendencia con altibajos en las mediciones, pero manteniendo una línea ascendente. Este comportamiento puede derivarse de la presencia en mayores proporciones de ceniza volcánica y cal, pues se observa que ante mayor cantidad de estos elementos el grado de conductividad registró un índice propenso a elevarse. (Figura 5).

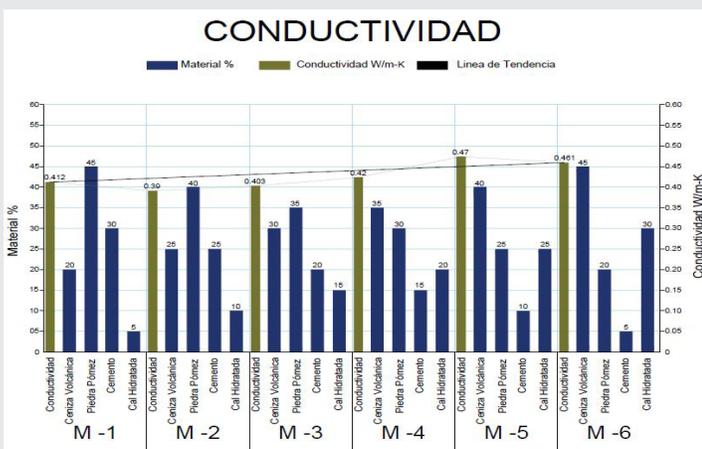


Figura 5. Valores obtenidos de Conductividad Térmica.

En este caso se observa que los prototipos M-5 y M-2 resultaron obtener el mayor y menor índice de desempeño en " λ ", existiendo un 22% de diferencia entre ambos, es decir un 0.079 W/m-K, y un 15% de diferencia en contenido de ceniza volcánica y cal.

Los resultados en resistividad térmica " r ", reflejan una tendencia inversa al de conductividad, esta conducta era esperada dado a que son conceptos opuestos. Se observa que los prototipos que alcanzaron un mejor desempeño en " λ ", consiguieron un índice en " r " menor. Se puede teorizar que la presencia de ceniza y cal en altos porcentajes reduce su capacidad de resistencia térmica, así como el aumento de jal y cemento gana un grado mayor de resistividad. (Figura 6).

Los resultados de mayor y menor grado de resistividad térmica, se presentó en los prototipos M-2 y M-5, contrario a los obtenidos en conductividad, como era esperado. Existiendo una diferencia de 43.1 C-cm/W, esto representa un 20.7% en el índice de " r " entre ambos.

Por último, los resultados obtenidos en materia de difusividad térmica " α ", se observa una disposición ascendente. Los prototipos mostraron un mayor índice de velocidad de transmisión de calor, ante la presencia de

mayor cantidad de ceniza volcánica y cal se emplee. (Figura 7).

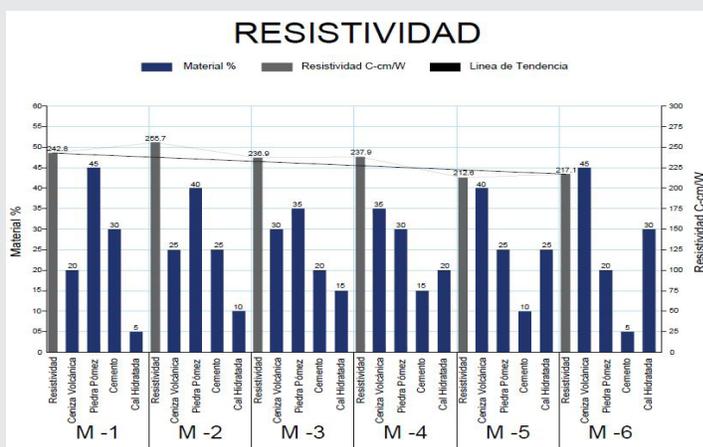


Figura 6. Valores obtenidos de Resistividad Térmica.

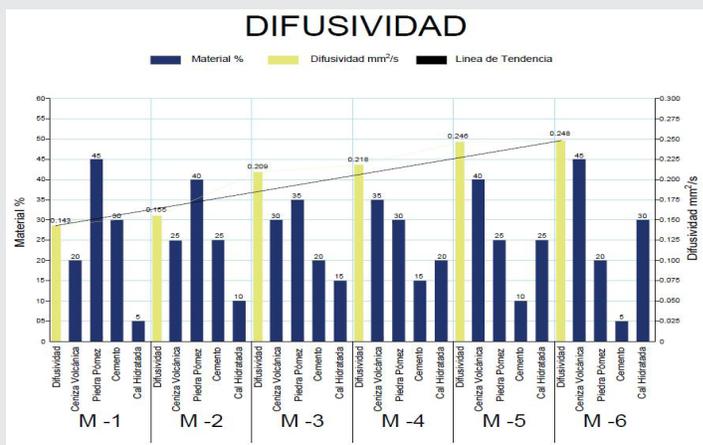


Figura 7. Valores obtenidos de Difusividad Térmica.

Los prototipos M-1 y M-6 obtuvieron el menor y mayor desempeño en " α ". La diferencia obtenida entre ambos es de 0.105 mm²/s que equivale a un 73.42%.

CONCLUSIONES

La mezcla de ceniza volcánica con cal hidratada en distintas proporciones parece demostrar que ante mayor cantidad de estas se emplee, menor será la cantidad de calor necesario para elevar su temperatura. Por consiguiente, la transferencia de calor en este tipo de mezclas será mayor, pues si se observa en los resultados, el mayor índice de conductividad obtenido se logró ante el uso de mayor proporción de ceniza y cal. Lo que supone que al estar en contacto con una fuente de calor este fluirá con mayor facilidad en este material, mencionado esto se deduce que la capacidad de resistencia que se presenta en estas mezclas es bajo, provocando que la tasa de transferencia de calor se logre a una mayor velocidad, tomando en cuenta los resultados obtenidos en difusividad.

Se debe considerar que los resultados obtenidos no son contundentes, dado que los prototipos utilizados en las pruebas contaban con 7 días de edad, se recomienda repetir el estudio con probetas de 15 y 30 días para refrendar resultados.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Juan Restrepo, O. R. (2013). Reducción de CO2 en la industria cementera por medio de procesos de síntesis química. *Revista Colombiana de Materiales*, 54-60.

[2] Izquierdo, I. S. (2018). Propiedades físicas y mecánicas del hormigón usando polvo residual de desechos orgánicos como reemplazo parcial del cemento. *Revista ingeniería de construcción*, 33(3), 229-240. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000300229>

[3] Cabrera-Madrid, J. A.-G.-B. (2016). Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. *ALCONPAT*, 6(1), 64-83. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352016000100064

[4] Aura Navas, R. R. (09 de 12 de 2015). Impactos ambientales asociados con el proceso de producción. *Enfoque UTE*, 6(4), 67-80. doi:e-ISSN: 1390-6542 / p-ISSN: 1390-9363

[5] Rodríguez, S. R. (1995). Estratigrafía y estructura del volcán de Colima, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12(1), 22-46.

[6] Arenas, C. A. (2018). Elaboración de cemento gris, usando como adición el retal cerámico, residuo proveniente de la industria cerámica. Universidad Militar Nueva Granada. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17786>

[7] CASTRO, D. C. (2010). OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GEOPOLÍMEROS, SINTETIZADOS A PARTIR DE CENIZA VOLANTE Y PIEDRA PÓMEZ, UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DEL CONCRETO (Vol. 9). <https://doi.org/10.1558/jsrnc.v4il.24>

[8] Komorowski, J. ., & Navarro, C. (n.d.). Petrología y geoquímica. Retrieved October 1, 2019, from <https://portal.ucol.mx/cueiv/Volcan-colima.htm#Volcan-colima>

[9] Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño Y Control De Mezclas De Concreto* (1 ed.). Skokie, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association. Recuperado el 11 de noviembre de 2019, de https://www.academia.edu/33383752/Dise%C3%B1o_Y_Control_De_Mezclas_De_Con

[creto_-_Steven_H._Kosmatka_Beatrice_Kerkhoff_and_William_C._Panarese_1ra_Edici%C3%B3n?auto=download](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10841-9_18).

[10] Decagon Devices, I. (2016). KD2 Pro Thermal Properties Analyzer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10841-9_18